

CARLOS ROBERTO WEIDE MOURA

COEFICIENTE DE CULTURA BASEADO NO CONCEITO DE GRAUS-DIA E
AVALIAÇÃO DE MÉTODOS DE ESTIMATIVA DE EVAPOTRANSPIRAÇÃO
DA ALFACE HIDROPÔNICA SOB AMBIENTE PROTEGIDO

Dissertação apresentada à
Universidade Federal de Viçosa,
como parte das exigências do
Programa de Pós-Graduação em
Meteorologia Agrícola, para obtenção
do título de *Magister Scientiae*.

VIÇOSA
MINAS GERAIS – BRASIL
2007

CARLOS ROBERTO WEIDE MOURA

COEFICIENTE DE CULTURA BASEADO NO CONCEITO DE GRAUS-DIA E
AVALIAÇÃO DE MÉTODOS DE ESTIMATIVA DE EVAPOTRANSPIRAÇÃO
DA ALFACE HIDROPÔNICA SOB AMBIENTE PROTEGIDO

Dissertação apresentada à
Universidade Federal de Viçosa,
como parte das exigências do
Programa de Pós-Graduação em
Meteorologia Agrícola, para obtenção
do título de *Magister Scientiae*.

APROVADA: 10 de dezembro de 2007.

Prof. Aristides Ribeiro
(Co-orientador)

Prof. Rubens Alves de Oliveira
(Co-orientador)

Pesq. Williams Pinto Marques Ferreira

Pesq. Antonio José Steidle Neto

Prof. Sérgio Zolnier
(Orientador)

*Ao meu pai, **Abrão da Silveira Moura** (in memorium), pelos ensinamentos e exemplo de vida.*

DEDICO

*À minha mãe **Lourdes Weide Moura**, e irmã **Patricia Weide Moura**, que mesmo longe me incentivaram e depositaram sua confiança em mim.*

OFEREÇO

AGRADECIMENTOS

À Universidade Federal de Viçosa, por meio do programa de Pós-Graduação em Meteorologia Agrícola, pela oportunidade de realização do curso.

Ao Professor Sérgio Zolnier, pela paciência, orientação e honestidade.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pela concessão da bolsa de estudo.

Aos Professores Aristides Ribeiro, Rubens Alves de Oliveira, e aos Doutores Williams Pinto Marques Ferreira e Antonio José Steidle Neto, pelas críticas construtivas, sugestões apresentadas e pela amizade.

Aos meus amigos de república Rafael (Polacão), Thieres (Thithi) e Renato (Ratão), pelos momentos de alegria, pela descontração, pelo companheirismo e pela convivência na mesma casa durante o período em Viçosa.

Aos meus amigos Giana Braga Soares (Tinha), Rafael (Polacão), Thieres (Thithi), Renato (Ratão), Lucas Leal, Leonardo Neves (Coelho), Leonardo Aguiar (Léo), Evandro (Peão), Sérgio Mattos, Antônio Steidle e aos integrantes da República Satisfação: Ricardo (Zanca), Eduardo (Du) e Ronie (Ronieman), que direta ou indiretamente, contribuíram para a realização deste trabalho.

Aos amigos da música Geraldo Carreiro, Carreiro Filho, Seu Raimundo, Zé Luizinho e à Banda Chão Batido, que proporcionaram momentos de descontração e alegria.

À turma da pós-graduação em Meteorologia Agrícola, pelos muitos momentos de convivência e companheirismo. Em especial, a Thieres e Antônio, pelo constante incentivo, pelas sugestões e dicas ao trabalho.

BIOGRAFIA

CARLOS ROBERTO WEIDE MOURA, filho de Abrão da Silveira Moura e Lourdes Weide Moura, nasceu em 26 de fevereiro de 1982, na cidade de Cachoeira do Sul, RS.

Em 2001, iniciou o Curso de Meteorologia na Universidade Federal de Pelotas, graduando-se em Agosto de 2005.

No mesmo mês e ano, ingressou no Programa de Pós-Graduação, em nível de Mestrado, em Meteorologia Agrícola, com área de concentração em Interação Planta-Ambiente, da Universidade Federal de Viçosa, em Viçosa, MG, submetendo-se à defesa de dissertação em 10 de dezembro de 2007.

SUMÁRIO

	Página
LISTA DE TABELAS	vii
LISTA DE FIGURAS	viii
LISTA DE SÍMBOLOS	x
RESUMO	xii
ABSTRACT	xiv
1. INTRODUÇÃO	1
2. REVISÃO DE LITERATURA	4
2.1. Cultivo em casas-de-vegetação	4
2.2. Microclima no interior de casas-de-vegetação	6
2.3. Hidroponia e o sistema NFT (Nutrient Film Technique)	9
2.4. Alface	10
2.5. Evapotranspiração e coeficiente da cultura (K_c)	13
3. MATERIAL E MÉTODOS	16
3.1. Local de realização do experimento e casa-de-vegetação	16
3.2. Medição das variáveis meteorológicas e do consumo de água	18

3.3. Métodos de estimativa da evapotranspiração de referência (ET_0)	21
	Página
3.3.1. Penman-Monteith FAO (PMF)	21
3.3.2. Penman-Monteith Modificado Para Ambiente Protegido (PMAP)	22
3.3.3. Penman-Monteith Modificado Para Ambiente Protegido Simplificado (PMAPS).....	23
3.3.4. Priestley-Taylor (PT)	24
3.3.5. Radiação Solar (RS)	24
3.3.6. Radiação Solar Simplificado (RSS).....	25
3.4. Estimativa do coeficiente de cultura (K_c).....	25
3.5. Análise e avaliação dos métodos de estimativa da evapotranspiração.....	26
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	28
4.1. Variáveis microclimáticas no interior da casa-de-vegetação....	28
4.2. Coeficiente de cultura baseado no conceito de graus-dia	31
4.3. Evapotranspiração da cultura em base horária.....	34
4.4. Evapotranspiração da cultura em base diária	43
5. CONCLUSÕES.....	49
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	51
APÊNDICE.....	59

LISTA DE TABELAS

	Página
1. Coeficiente de cultura inicial (K_{c_inc}), parâmetros do modelo sigmoidal (a, b, c) obtidos a partir de análise de regressão e coeficiente de correlação ajustado para três cultivares de alface produzidos em sistema hidropônico sob ambiente protegido. O erro padrão de estimativa dos parâmetros é apresentado entre parênteses.....	33
2. Graus-dia acumulados e coeficiente de cultura da alface hidropônica para todo o ciclo da cultura e para as cultivares Grand Rapids, Regina e Great Lakes.....	34
3. Desempenho estatístico dos métodos PMF, PMAP, PMAPS, PT, RS e RSS para estimativa da evapotranspiração horária dos cultivares de alface Grand Rapids, Regina e Great Lakes em sistema hidropônico sob ambiente protegido. O período experimental compreendeu cinco etapas de medição, cada uma com duração de três dias, que foram conduzidas após o transplântio.....	36
4. Desempenho estatístico dos métodos PMF, PMAP, PMAPS, PT, RS e RSS para estimativa da evapotranspiração diária dos cultivares de alface Grand Rapids, Regina e Great Lakes em sistema hidropônico sob ambiente protegido. O período experimental compreendeu 5 etapas de medição, cada uma com duração de três dias, que foram conduzidas após o transplântio.....	44

LISTA DE FIGURAS

	Página
1. Vista geral da casa de vegetação, localizada na área experimental da Meteorologia Agrícola, Universidade Federal de Viçosa – UFV, Viçosa/MG.....	17
2. Vista geral das bancadas de cultivo, com a cultura da alface na fase inicial.....	18
3. Mangueira milimetrada acoplada ao tanque de medição (A), reservatório de solução nutritiva (B).....	20
4. Irradiância solar global diária (R_g), e dos valores médios de déficit de pressão de saturação de vapor de água no ar (DPV_{ar}) e velocidade do ar (U) (Figura A) e temperatura do ar (t) e umidade relativa do ar (UR) (Figuras B) ao longo do ciclo de crescimento da alface hidropônica, expresso em dias após o transplântio (DAT), para o período diurno.....	29
5. Valores médios de déficit de pressão de saturação de vapor de água no ar (DPV_{ar}) e velocidade do ar (U) (Figura C) e temperatura do ar (t) e umidade relativa do ar (UR) (Figuras D) ao longo do ciclo de crescimento da alface hidropônica, expresso em dias após o transplântio (DAT), para o período noturno.	30
6. Valores diários estimados (linhas) e medidos (pontos) do coeficiente da cultura (K_c) para a alface cultivada em sistema hidropônico sob ambiente protegido, tendo como variável independente os graus-dia acumulados após o transplântio (GDA). Os valores apresentados referem-se aos cultivares Grand Rapids	

(GR), Regina (RG) e Great Lakes (GL).....	32
---	----

Página

7. Valores diurnos medidos e estimados da evapotranspiração (ET_c) de três cultivares de alface hidropônica sob ambiente protegido (eixo esquerdo) e alterações correspondentes do déficit de pressão de saturação de vapor de água no ar (eixo direito). As medições e estimativas de ET_c foram realizadas no 5º dia após o transplântio, por meio dos métodos PMF, PMAP e PMAPS.....	39
8. Valores diurnos medidos e estimados da evapotranspiração (ET_c) de três cultivares de alface hidropônica sob ambiente protegido (eixo esquerdo) e alterações correspondentes do déficit de pressão de saturação de vapor de água no ar (eixo direito). As medições e estimativas de ET_c foram realizadas no 5º dia após o transplântio, por meio dos métodos PT, RS e RSS.....	40
9. Valores diurnos medidos e estimados da evapotranspiração (ET_c) de três cultivares de alface hidropônica sob ambiente protegido (eixo esquerdo) e alterações correspondentes do déficit de pressão de saturação de vapor de água no ar (eixo direito). As medições e estimativas de ET_c foram realizadas no 25º dia após o transplântio, por meio dos métodos PMF, PMAP e PMAPS.....	41
10. Valores diurnos medidos e estimados da evapotranspiração (ET_c) de três cultivares de alface hidropônica sob ambiente protegido (eixo esquerdo) e alterações correspondentes do déficit de pressão de saturação de vapor de água no ar (eixo direito). As medições e estimativas de ET_c foram realizadas no 25º dia após o transplântio, por meio dos métodos PT, RS e RSS.....	42
11. Valores medidos e estimados da evapotranspiração (ET_c) de três cultivares de alface ao longo do ciclo de crescimento em sistema hidropônico sob ambiente protegido. As estimativas de ET_c foram realizadas por meio dos métodos PMF, PMAP e PMAPS.....	47
12. Valores medidos e estimados da evapotranspiração (ET_c) de três cultivares de alface ao longo do ciclo de crescimento em sistema hidropônico sob ambiente protegido. As estimativas de ET_c foram realizadas por meio dos métodos PT, RS e RSS..	48

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Descrição
ET_c	evapotranspiração da cultura ($\text{kg m}^{-2} \text{d}^{-1}$)
K_c	coeficiente de cultura (adimensional)
LE_o	fluxo de calor latente de referência à superfície da cultura hipotética (W m^{-2})
R_n	saldo de radiação à superfície (W m^{-2})
F	fluxo de calor sensível na solução nutritiva, normalizado para a área da bancada de cultivo (W m^{-2})
Δ	tangente à curva de pressão de saturação do vapor de água com respeito à temperatura ($\text{Pa } ^\circ\text{C}^{-1}$)
ρ_{ar}	densidade absoluta do ar (kg m^{-3})
c_{par}	calor específico do ar à pressão constante ($\text{J kg}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$)
DPV_{ar}	déficit da pressão de saturação do vapor de água no ar (Pa)
γ	coeficiente psicrométrico ($\text{Pa } ^\circ\text{C}^{-1}$)
r_a	resistência aerodinâmica (s m^{-1})
r_s	resistência de superfície da cultura de referência (s m^{-1})
Ω	fator de desacoplamento (adimensional)
e_s	pressão de saturação de vapor de água (Pa)

e_{s_min} pressão de saturação calculada a partir da temperatura mínima do ar medida ao nascer do sol (Pa)

Símbolo	Descrição
α	parâmetro de Priestley-Taylor (adimensional)
r	fator de correção do método da radiação solar (RS), específico para condições de ambiente protegido
R_s	radiação solar global incidente ($\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$)
R_a	radiação solar incidente instantânea no topo da atmosfera em (W m^{-2}) para a escala horária e em ($\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$) para a escala diária
k_r	coeficiente de ajuste ($^{\circ}\text{C}^{-0,5}$)
t_m	temperatura média do ar para o período considerado ($^{\circ}\text{C}$)
t_{min}	temperatura mínima do ar em escala diária ($^{\circ}\text{C}$)

RESUMO

MOURA, Carlos Roberto Weide, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, dezembro de 2007. **Coeficiente de cultura baseado no conceito de graus-dia e avaliação de métodos de estimativa de evapotranspiração da alface hidropônica sob ambiente protegido.** Orientador: Sérgio Zolnier. Co-orientadores: Aristides Ribeiro e Rubens Alves de Oliveira.

A produção e o consumo de alface cultivada em sistemas hidropônicos do tipo NFT (*nutrient film technique*), aumentaram consideravelmente nos últimos anos no Brasil. Sistemas automáticos para aplicação de solução nutritiva, baseados em estimativas de evapotranspiração (ET_c), têm sido desenvolvidos, mas um dos grandes problemas refere-se ao seu custo de implantação. O método de Penman-Monteith, recomendado como padrão para a estimativa da evapotranspiração de referência, requer medições de radiação solar, temperatura, umidade relativa e velocidade do ar, inviabilizando a automação do sistema de cultivo em pequenas propriedades. Neste contexto, no presente trabalho teve-se como objetivos: a) propor a adoção de um coeficiente de cultura (K_c) específico para a produção de alface em sistemas hidropônicos do tipo NFT, utilizando-se o conceito de graus-dias acumulados (GDA) e os cultivares Grand Rapids, Regina e Great Lakes e; b) avaliar a precisão e exatidão de diferentes métodos para a estimativa de

evapotranspiração após o transplântio da alface, visando à implementação de sistemas de automação de baixo custo. Para alcançar os objetivos propostos, foram conduzidos dois experimentos independentes, sendo que um conjunto de dados foi utilizado para obtenção do modelo do K_c e estimativa dos diversos parâmetros dos modelos de evapotranspiração e outro conjunto para validação das estimativas realizadas em base horária e diária. Os dois experimentos foram conduzidos na área experimental da Meteorologia Agrícola do Departamento de Engenharia Agrícola (DEA), situada no campus da Universidade Federal de Viçosa. As estimativas de evapotranspiração foram realizadas por meio dos métodos de Penman-Monteith-FAO (PMF), Penman-Monteith modificado para condições aerodinâmicas de ambientes protegidos (PMAP), Penman-Monteith simplificado para ambiente protegido (PMAPS), Priestley Taylor (PT), Radiação Solar (RS) e Radiação Solar Simplificado (RSS), os quais foram, posteriormente, comparadas com os valores medidos. Para avaliar o desempenho dos métodos foram utilizados os seguintes índices estatísticos: a) coeficiente de correlação “r” (precisão); b) índice de concordância “d” (exatidão); c) erro médio de estimativa (MBE) e; d) raiz quadrada do quadrado do erro médio de estimativa (RMSE). Verificou-se que o modelo sigmoidal com quatro parâmetros se ajustou bem aos valores observados de K_c para os três cultivares avaliados no período pós-transplântio, proporcionando coeficientes de determinação ajustados de 0,99, 0,98 e 0,98 para os cultivares Grand Rapids, Regina e Great Lakes, respectivamente. Com relação às estimativas de valores horários de ET_c , observou-se que os métodos PMAP e PMAPS apresentaram melhor desempenho estatístico quando comparados aos métodos PMF, PT, RS e RSS. O método PMF não apresentou resultados satisfatórios no período da tarde, em decorrência do aumento do déficit de pressão de vapor de água no ar. Para as estimativas diárias de ET_c , os resultados deste trabalho sugerem melhor desempenho estatístico dos métodos PMF, PMAP e RS em relação aos métodos PMAPS, PT e RSS, independentemente do cultivar avaliado. No entanto, o método PMF subestimou sistematicamente a ET_c no período inicial de crescimento da alface.

ABSTRACT

MOURA, Carlos Roberto Weide, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, December, 2007. **Crop coefficient based on the concept of degree day and evaluation of the methods of evapotranspiration estimates of Lettuce hydroponics under protected environment.** Adviser: Sergio Zolnier. Co-Advisers: Aristides Ribeiro and Rubens Alves de Oliveira.

The production and consumption of tull lettuce in hydroponics system of a kind NFT (*nutrient film technique*) increased considerably in last years in Brazil. The automatics system for application of nutrient solution, based on estimation of evapotranspiration (ET_c), has been developed, but one of the big problem is in relation to the cost of implementing the system. The Penman-Monteith method recommended as standard for the estimation of reference evapotranspiration, require measure on solar radiation, temperature, humidity, and air velocity, this make unviable automation of the system for cultivation in small farms. In this context, the present work has the following objectives: a) propose adoption of the coefficient of cultivation (K_c) specific for production of lettuce in hydroponics systems of a kind NFT using the concept of accumulated degree day (GDA), and cultivars Grand Rapids, Regina, and Great Lakes and b) evaluate the precession and exactness of different methods for evapotranspiration estimation after transplanting of lettuce using the implementation of automation system of low cost. To attain the proposed

objectives, were conducted two experiments independently, and the combined data's were used to estimate K_c and other parameters of the model of evapotranspiration. The other combined data's for validation of estimates realized based on days and hours. The two experiments were conducted in experimental station of Agricultural Meteorology located in the campus of Universidade Federal de Viçosa – UFV. The evapotranspiration estimates were realized by the methods of Penman-Mantheit-FAO (PMF), Penman-Monteith modified for conditions aerodynamics of protected environments (PMAP), Priestley Taylor (PT), Solar Radiation (RS), and Solar Radiation Simplified (RSS), and these were after compared with the measured values. To evaluate the performance of the methods, were utilized the following statistical indexes: a) coefficient of correlation “r” (precision) ,b) agreement index “d” (exactness), c) error mean of the estimates (MBE) and, d) square root of the error mean square of the estimates (RMSE). The result verified that the sigmoid model for the four parameters was well adjusted with the observed values of K_c for the three cultivars evaluated in the period of transplanting, in proportion of adjusted coefficient of determination of 0,99, 0,98 and 0,98 for the cultivars Grand Rapids, Regina e Great Lakes, respectively. In relation to the estimates of hours value of ET_c , observed that the methods PMAP and PMAPS presented better performance statistics when compared with the methods of PMF, PT, RS and RSS. The method of PMF not presented results of statistics in the period of the afternoon, due to the low evaporation pressure of water in the air. For the daily estimates of ET_c , the results this work suggested the better performance statistics of the methods PMF,PMAP and RS in relation to the methods PMAPS, PT and RSS, independent of cultivars evaluated. Even though, the method PMF sub estimated systematically the ET_c in the initial period of development of Lettuce.

1. INTRODUÇÃO

Após várias décadas de adaptação, as hortaliças representam hoje uma importante fonte de alimento para os brasileiros, destacando sua relação com saúde e longevidade (COSTA, 2000).

Originária da Ásia, a alface (*Lactuca sativa* L.) pertence ao grupo das hortaliças folhosas mais populares, dentre as quais, se destaca como uma das que tem maior importância econômica, além de fácil aquisição e adaptação das suas cultivares, o que permite ser cultivada ao longo de todo o ano (OLIVEIRA et al., 2004; SOUSA et al., 2007; STRECK et al., 2007). No Brasil, são aproximadamente 30 mil hectares cultivados com alface, sendo responsável pela geração de 60 mil empregos diretos (GRANGEIRO et al., 2006).

A produção e o consumo de alface cultivada em sistemas hidropônicos do tipo NFT (*nutrient film technique*) aumentaram consideravelmente nos últimos anos no Brasil (OHSE et al., 2001). Os principais fatores que proporcionam o aumento de produção estão associados à redução do ciclo da cultura, menor incidência de pragas e doenças, grande potencial para promover o uso eficiente de água e de fertilizantes e possibilidade de aproveitamento de pequenas áreas próximas aos centros consumidores (FELTRIN et al., 2005; SILVA et al., 2005; LUZ et al., 2006; MAGGI et al., 2006). As principais desvantagens desta técnica de cultivo estão relacionadas ao elevado custo inicial para sua implantação, à falta de automação do processo de preparo da

solução nutritiva e ao empirismo associado à frequência de aplicação da solução nutritiva (LUZ et al., 2006; ZOLNIER et al., 2004).

O sistema de controle dos intervalos de aplicação da solução nutritiva é um aspecto importante a ser considerado, pois afeta a disponibilidade de oxigênio na superfície das raízes, favorece a ocorrência de doenças no sistema radicular e, por outro lado, pode causar estresse hídrico ao longo do ciclo da cultura (JONES, 1997). Basicamente, duas técnicas de controle são adotadas para aplicação da solução nutritiva, sendo uma por meio de temporizadores e outra baseada na estimativa de evapotranspiração. Em decorrência da ausência de substrato neste sistema de cultivo, as estimativas de evapotranspiração precisam ser realizadas em curtos períodos de tempo, necessitando, assim, de monitoramento contínuo das variáveis meteorológicas no ambiente de cultivo.

De acordo com ZOLNIER et al., (2004), a principal desvantagem do uso de temporizadores está relacionada à necessidade de se adotar valores fixos para o controle da duração e dos intervalos de aplicação da solução nutritiva. No caso da alface, usualmente, a solução é recirculada durante um período 10 a 15 min, mantendo-se intervalos de 15 a 20 min entre eventos de aplicação. Em decorrência disso, essa técnica de controle não é capaz de realizar ajustes da frequência de aplicação da solução nutritiva, de acordo com alterações das condições meteorológicas ao longo do dia e aumento do consumo de água, devido à expansão foliar, ao longo do período de crescimento.

Normalmente, a estimativa da evapotranspiração em sistemas hidropônicos é realizada por meio de modelos baseados no balanço de energia, dentre os quais destaca-se o de Penman-Monteith (1965). Apesar de proporcionar bom desempenho para estimativa da evapotranspiração da cultura (ET_c) da alface hidropônica em condições de ambiente protegido (LYRA, 2002), o método tem como principal desvantagem a necessidade de medições da radiação solar, velocidade do ar, temperatura do ar e da solução nutritiva, bem como, da umidade relativa do ar, além da estimativa de certos parâmetros, como a resistência da cultura (r_s) ao processo de difusão de vapor de água e a resistência aerodinâmica (r_a) ao processo de difusão de calor sensível, os quais são disponíveis apenas para condições ambientais específicas e para um número limitado de culturas (LYRA et al., 2003). Portanto, a avaliação de métodos alternativos, que requerem um número menor de variáveis a serem

monitoradas, é fundamental para redução dos custos de estimativa do uso de água em sistemas hidropônicos e manejo da concentração de fertilizantes na solução nutritiva.

Em condições de campo, a ET_c diária pode ser estimada por meio da multiplicação do coeficiente de cultura (K_c) pela evapotranspiração potencial (ET_p), adotando-se um método específico, conforme a disponibilidade de dados meteorológicos (DOORENBOS & PRUITT, 1977). Com a implantação de redes automáticas de superfície em escala global para medição das variáveis meteorológicas, a ET_p foi substituída pela evapotranspiração de referência (ET_o), conforme a parametrização do modelo de Penman-Monteith proposta por Allen et al.,(1998). Infelizmente, os dados medidos nas estações meteorológicas automáticas não podem ser utilizados diretamente para estimativa do uso de água em ambiente protegido, em razão de características microclimáticas específicas desse sistema de cultivo, as quais são influenciadas, principalmente, pela transmissividade do material de cobertura e taxa de ventilação da instalação (HANAN, 1998). Desta forma, a utilização da metodologia sugerida por Doorenbos e Pruitt (1977), para estimativa da ET_c da alface cultivada em sistema hidropônico sob condições de ambiente protegido, está condicionada à estimativa do K_c após o transplântio, assim como, estimativa da evapotranspiração de referência.

Diante das considerações apresentadas, o presente trabalho buscou atingir os seguintes objetivos:

a) Propor a adoção de um coeficiente de cultura, baseado no conceito de graus-dia acumulados após o transplântio, para estimativa da evapotranspiração horária e diária da alface cultivada em sistema hidropônico do tipo NFT sob ambiente protegido.

b) Avaliar a precisão e exatidão de diferentes métodos para estimativa de evapotranspiração da alface, cultivada em sistema hidropônico do tipo NFT em ambiente protegido, visando à implementação de sistemas de automação de baixo custo.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1. Cultivo em casas-de-vegetação

Casas-de-vegetação são instalações de proteção ambiental para a produção de hortaliças ou flores, formadas por uma estrutura ou armação, construídas de diversos materiais (bambu, madeira, concreto, ferro galvanizado etc.) e cobertas com materiais transparentes (polietileno, fibra de vidro, policarbonato, vidro etc.) que permitem a passagem da radiação solar para o seu interior favorecendo o crescimento e o desenvolvimento das plantas.

A origem e o desenvolvimento de casas-de-vegetação ocorreram nos países do hemisfério norte, em função de suas necessidades e dificuldades de produção durante o inverno (NELSON, 1991). No Brasil, o cultivo protegido foi introduzido por produtores holandeses na década de 50, para produção de flores, e na década de 60 para cultivos de hortaliças. Entretanto, somente no final da década de 80 e, principalmente, no início da década de 90 é que esta técnica de produção passou a ser amplamente utilizada (MOREIRA, 2002; GRANDE et al., 2003).

O maior impulso dado ao cultivo em casa-de-vegetação foi o desenvolvimento do plástico. Em 1930 foi criado o polietileno, que se tornou o material pioneiro utilizado como cobertura em casas-de-vegetação na metade do Século XX. Por ser um material mais leve, prático e barato, quando comparado às estufas de vidro, o polietileno permitiu maior acesso aos

produtores, ampliando rapidamente a sua utilização em várias partes do mundo (SGANZERLA, 1995; ATARASSI, 2000).

A utilização de casas-de-vegetação não se limita apenas a regiões frias (SGANZERLA, 1995). De acordo com a região e época do ano, a casa-de-vegetação pode ter finalidades diferentes: proteger a cultura de precipitação ou radiação intensa (efeito “guarda-chuva” – regiões de menores latitudes e estações chuvosas) e contra a queda acentuada da temperatura (em regiões de maiores latitudes e em cultivos no inverno). Assim, a produção de culturas antes inviáveis em determinadas condições climáticas passou a ser possível a partir da adoção correta de técnicas de cultivo em ambiente protegido, consolidando-se com isso o uso de casas-de-vegetação, em mais uma estratégia para a obtenção de êxito na produção agrícola (FILGUEIRA, 2000).

O cultivo em casa-de-vegetação pode proporcionar inúmeras vantagens, desde que manejado de forma correta. As principais vantagens são: aumento da produtividade, podendo atingir produções entre 3 e 5 vezes maiores quando comparada ao sistema de cultivo em campo; colheita na entressafra, tanto aproveitando o “efeito guarda-chuva”, contra o excesso de chuva no verão, como contra o frio rigoroso do inverno, em regiões como o sul do Brasil, permitindo boas produções durante o ano todo; precocidade das colheitas, obtida pelas melhores condições ambientais internas; melhor qualidade dos produtos, tanto no aspecto visual quanto no sabor; controle mais eficiente de doenças e pragas, obtido com o melhor controle da umidade e temperatura do ar, reduzindo a disseminação e o desenvolvimento de doenças; maior eficiência no uso dos defensivos agrícolas, que podem ser usados em doses menores, comparadas às utilizadas em sistema de céu aberto e por não sofrerem lixiviação pelas chuvas; e proteção contra adversidades climáticas como chuvas intensas, granizo, seca, ventos, etc. (SGANZERLA, 1995; ATARASSI, 2000; MAGGI et. al., 2006).

Porém, os cultivos protegidos possuem algumas desvantagens, dentre as quais destacam-se: aumento da resistência de doenças, principalmente as de solo; intensificação da salinização do solo ou substrato; proliferação de pragas, por falta de inimigos naturais; e pouca pesquisa e divulgação para melhoria das técnicas de manejo em casa-de-vegetação (OLIVEIRA, 1995).

A utilização da cobertura plástica nas casas de vegetação promove alterações dos elementos meteorológicos que interferem no desenvolvimento da cultura, e a compreensão dos efeitos dessas alterações se torna um fator importante, visando gerar tecnologia de produção apropriada em todos os aspectos do sistema de cultivo.

2.2. Microclima no interior de casas-de-vegetação

O cultivo em ambiente protegido apresenta diferenças no ambiente quando comparado com o cultivo a céu aberto, no que diz respeito à temperatura e umidade relativa do ar, radiação solar, velocidade do ar e, conseqüentemente, a evapotranspiração. A cobertura plástica utilizada nessas construções age como filtro, transmitindo parte da radiação solar e retendo uma fração da radiação terrestre no seu interior, determinando o “efeito estufa”.

Dentre as variáveis meteorológicas, a primeira a ser modificada com o uso da cobertura plástica em casas-de-vegetação é o balanço de energia radiante, uma vez que parte da radiação de ondas longas emitida pelo solo, estruturas internas e pela cultura fica retida dentro delas, o que provoca o aquecimento do seu interior (MATTOS, 2000). Além disso, o processo de absorção e reflexão do material de cobertura faz com que a radiação solar global observada no interior da casa-de-vegetação seja menor do que aquela observada no exterior (FOLEGATTI et al., 1997; GUISELINI et al., 2004).

Apesar da redução no total da radiação solar global transmitida, a cobertura plástica atua como meio dispersante da radiação, podendo aumentar a fração da radiação difusa em relação ao total de radiação. Esse efeito dispersante é interessante porque a luz difusa é multidirecional podendo ser mais bem aproveitada pelas plantas (ATARASSI, 2000; MATTOS, 2000).

A modificação do balanço de energia radiante afeta a temperatura do ar dentro da casa-de-vegetação, sendo esta uma variável importante a ser considerada nesse tipo de ambiente.

A temperatura do ar no interior as casas-de-vegetação está intimamente ligada ao balanço de energia, que, por sua vez, depende de vários fatores, como o tamanho da estufa, o ângulo de incidência dos raios solares, as propriedades óticas da cobertura e as condições meteorológicas locais

(FARIAS et al., 1992; FOLEGATTI et al., 1997; FACCIOLI, 1998; BURRIOL et al., 2000; MATTOS, 2000).

Segundo vários autores, o efeito da cobertura plástica sobre a temperatura do ar ocorre principalmente sobre as máximas (FARIAS et al., 1992; CAMACHO et al., 1995, PEZZOPANE et al., 1995). Farias et al., (1992), trabalhando com estufa plástica de polietileno de baixa densidade (PEBD) em Pelotas, RS, encontraram as médias das temperaturas máximas entre 1,2 a 4,4 °C acima das verificadas no ambiente externo. Camacho et al., (1995) também encontraram valores médios de temperatura máxima interna superiores aos externos, ao longo do ano. Evangelista (1999), avaliando métodos de determinação da evapotranspiração no interior de casa-de-vegetação, no município de Lavras, MG, encontrou diferença de até 6,2 °C entre a temperatura máxima obtida no interior da estufa plástica e os valores medidos no ambiente externo a estufa.

Os valores médios internos e externos, das temperaturas mínimas são muito semelhantes (FARIAS et al., 1992; CAMACHO et al., 1995; EVANGELISTA, 1999). Evangelista (1999) encontrou uma diferença de 0,1°C entre a temperatura mínima obtida no interior da estufa plástica em relação aos valores medidos do lado externo, resultado esse relativamente próximo ao encontrado por Fernandes (1996), que obteve a diferença de 0,6°C, trabalhando em casa-de-vegetação com cultivo de crisântemos nas condições climáticas do estado de São Paulo.

A variação da umidade do ar no interior das estufas depende principalmente da temperatura do ar e da ventilação interna. A temperatura do ar, como já foi mencionado, varia principalmente em função da densidade de fluxo de radiação solar incidente como também da própria ventilação, a qual depende da área, localização e manejo das aberturas e da velocidade de troca do ar do interior com o exterior (BURRIOL et al., 2000).

Para um mesmo conteúdo de vapor de água no ar, a umidade relativa é inversamente proporcional à temperatura do ar. Assim, a umidade relativa do ar no interior das estufas diminui durante o período diurno, nas horas em que a temperatura do ar encontra-se em elevação, atingindo, muitas vezes, valores inferiores aos verificados no ambiente externo. Farias et al., (1992), atribuíram esse comportamento devido às maiores temperaturas diurnas encontradas

neste ambiente. Entretanto, no período noturno, a umidade relativa aumenta bastante, chegando, quase sempre, a 100% logo antes do nascer do sol, devido a queda acentuada da temperatura verificada neste período e pela retenção de vapor de água pela cobertura (FARIAS et al., 1992; FACCIOLI, 1998; BURIOL et al., 2000).

Farias et al., (1992) encontraram valores médios da umidade relativa máxima no interior da casa-de-vegetação (95,6 a 99,2%) superiores aos valores verificados a céu aberto (91,4 a 99,0%). Maiores umidades relativas máximas também foram encontradas por Pezzopane et al., (1995) e Evangelista (1999). Quanto à média da umidade relativa mínima no interior da casa-de-vegetação, Farias et al., (1992) e Evangelista (1999) encontraram valores inferiores aos encontrados no ambiente externo.

Vale ressaltar que a umidade relativa é influenciada pelo estágio de desenvolvimento da cultura, a qual evapotranspira mais ou menos, e também pelo manejo das aberturas da estufa, podendo-se obter valores de umidade relativa média, externa e interna, muito semelhantes (FERNANDES, 1996; BURIOL, et al, 2000).

Em geral, no interior de casas-de-vegetação, a evapotranspiração é menor que a verificada externamente, o que é devido basicamente à parcial opacidade da cobertura plástica à radiação solar e à redução da ação dos ventos, que são os principais fatores da demanda evaporativa da atmosfera, embora a temperatura do ar, em alguns momentos possa ser maior, e a umidade relativa menor no interior da estufa, o que contribuiria para a maior evapotranspiração (FARIAS et al., 1994; MARTINS et al., 1995; EVANGELISTA, 1999; ATARASSI, 2000).

Nesse contexto, vários trabalhos foram feitos a fim de se determinar a diferença entre a evapotranspiração dentro e fora da casa-de-vegetação. Farias et al., (1994), trabalhando com estufa plástica de PEBD em Pelotas, RS, encontrou redução de 46,0% na evapotranspiração potencial. Faccioli (1998) obteve valores médios de evaporação do “Tanque Classe A”, 54% inferiores dentro da casa-de-vegetação, em relação ao exterior, em Viçosa, MG. Em Lavras, MG, Evangelista (1999) observou que os valores de evapotranspiração potencial determinados pelos métodos de Penman-Monteith, Penman modificado, Makkink e Radiação Solar dentro da casa-de-vegetação foram 36,

33, 26 e 30% inferiores aos valores verificados externamente. Buriol et al., (2001), determinaram diferenças entre a evaporação de água diária no interior e exterior de uma estufa plástica do tipo capela, com dados de 1990 a 1993, obtendo reduções no interior da estufa em relação aquela do exterior de 48,6 e 51,7%, respectivamente, no Tanque Classe A e no Evaporímetro de Piche.

Considerando que o comportamento ambiental em casa de vegetação é diferente daquele encontrado a céu aberto, e sendo a cobertura plástica impermeável à entrada de chuvas, torna-se extremamente importante um melhor conhecimento das exigências hídricas das plantas em seu interior.

2.3. Hidroponia e o sistema NFT (Nutrient Film Technique)

O termo hidroponia deriva das palavras gregas hidro+ponos, que literalmente significa “trabalho na água”; porém, em seu uso corrente, significa “cultivo na água”. Embora seja uma técnica datada de antes da era cristã, o interesse pela aplicação do cultivo hidropônico na produção comercial surgiu nos anos 30, quando o Professor William Frederick Gericke, da Universidade da Califórnia, nos EUA, passou a utilizar esta técnica em escala comercial (SANCHEZ, 2007).

No entanto, o grande marco no desenvolvimento da hidroponia econômica e comercial foi resultante do conceito de NFT (Nutrient Film Technique), traduzido como Técnica de Fluxo Laminar, desenvolvida pelo inglês Allen Cooper no ano de 1965, em Littlehan, Inglaterra. Tal técnica de cultivo consiste na aplicação de solução nutritiva em forma de filme sobre uma canaleta com declive de 2 a 4%, onde se encontram as plantas (KOPP et al., 2001; MARTINEZ, 2006). No sistema NFT a planta se desenvolve com 2/3 de seu sistema radicular submerso na solução nutritiva, fornecida à planta sob a forma de um fluxo intermitente, de onde ela retira os nutrientes, enquanto a porção restante do sistema radicular se desenvolve ao ar livre para a absorção de oxigênio (PILAU et al., 2002; VILLELA JUNIOR et al., 2003).

Entre as diversas vantagens, o cultivo hidropônico apresenta maior rendimento por área, melhor qualidade do produto, redução do ciclo da cultura, menor incidência de pragas e doenças, maior eficiência do uso de água e de fertilizantes, redução do uso de mão-de-obra nas atividades de capina e

preparo do solo, regularidade de oferta ao longo do ano e possibilidade de aproveitamento de pequenas áreas próximas aos centros consumidores (FELTRIN et al., 2005; SILVA et al., 2005; LUZ et al., 2006; MAGGI et al., 2006; MARTINEZ, 2006; SANCHEZ, 2007). As principais desvantagens desta técnica de cultivo estão relacionadas ao elevado custo inicial para sua implantação, necessidade de mão-de-obra e assistência técnica especializada, à falta de automação do processo de preparo da solução nutritiva e ao empirismo associado à frequência de aplicação da solução nutritiva (LUZ et al., 2006; ZOLNIER et al., 2004; SANCHEZ, 2007; STEIDLE NETO, 2007).

O cultivo sem solo, principalmente o sistema NFT, vem colaborar com as expectativas de sustentabilidade dos sistemas de produção vegetal através da redução do consumo de água, eficiência no uso de nutrientes e agrotóxicos. A técnica NFT promove a recirculação da solução nutritiva e possibilita maior eficiência na utilização da água (MONTEZANO et al., 2002). López-Galvez e Peil (2000) compararam a produção de frutos e os resíduos produzidos pela cultura do tomate em sistema NFT e em substrato, e concluíram que essa técnica melhorou em 62% a eficiência da água. Para as culturas do pepino, Peil et al., (1998), e do feijão-vagem, Peil et al., (1999), também observaram altas eficiências no uso da água no sistema NFT.

No Brasil, cerca de 90% dos hidroponicultores cultivam a alface (*Lactuca Sativa* L.) pela técnica NFT. Isso se deve à sua fácil adaptação ao sistema, o qual tem revelado alto rendimento e reduções de ciclo em relação ao cultivo no solo, viabilizando, dessa forma, o rápido retorno de capital (OHSE et al., 2001; PILAU et al., 2002, BACKES et al., 2004; TEIXEIRA et. al., 2006).

2.4. Alface

A alface (*Lactuca sativa* L.) tem como provável centro de origem o sul da Europa e o oeste da Ásia. Depois de ser difundida por toda Europa, foi introduzida nas Américas, sendo então trazida ao Brasil no ano de 1647, com a vinda dos portugueses (SANCHEZ, 2007).

É a folhosa de maior importância econômica no Brasil, com uma área plantada de aproximadamente 30 mil ha, responsável pela geração de 60 mil empregos diretos. Seu cultivo é intensivo e atualmente o mercado de sementes

de alface é estimado em torno de US\$ 2 milhões ano⁻¹ (COSTA e SALA, 2005; GRANGEIRO et al., 2006).

É uma planta anual, de porte herbáceo, com caule pequeno, ao qual se prendem as folhas. Essas, por sua vez, são amplas e crescem em volta do caule (em roseta), podendo ser lisas ou crespas, formando ou não uma cabeça. Conforme a cultivar, a coloração pode ocorrer em vários tons de verde e roxo. O sistema radicular é muito ramificado e superficial. Na ocasião em que a planta é transplantada, o sistema radicular explora apenas os primeiros centímetros do solo. Em semeadura direta a raiz pivotante pode atingir até 60 cm de profundidade (FILGUEIRA, 2000).

A alface se destaca por ser fonte de vitaminas e sais minerais, constituindo-se uma planta das mais populares dentre aquelas em que as folhas são consumidas. O consumo da alface é feito *in natura*, e nessas condições apresenta a seguinte composição média, por 100 g: água: 94%; valor calórico: 18 Kcal; proteína: 1,3 g; extrato etéreo: 0,3 g; carboidratos totais: 3,5 g; fibra: 0,7 g; cálcio: 68 mg; fósforo: 27 mg; ferro: 1,4 mg; potássio: 264 mg; tiamina: 0,05 mg; riboflavina: 0,08 mg; niacina: 0,4 mg; vitamina C: 18,0 mg, para alface produzida no solo. Com relação à alface produzida em sistema hidropônico, o conhecimento de sua qualidade nutricional é muito resumido (OHSE et al., 2001)

A alface é a espécie mais difundida entre os produtores hidropônicos, principalmente no sistema NFT, provavelmente devido ao seu pioneirismo como cultura hidropônica no país, e vantagens como a facilidade de cultivo, o ciclo curto, a alta produtividade, o rápido retorno do capital investido e a maior conservação no período pós-colheita (OHSE et al., 2001; BACKES et al., 2004; BENINNI et al., 2005; SANCHEZ, 2007).

Devido a sua origem, as cultivares de alface crescem e se desenvolvem bem em temperaturas amenas, tendo como fatores limitantes os danos causados às folhas pelos ventos frios e pelas geadas. No verão, os fatores limitantes são as chuvas convectivas, de curta duração e de alta intensidade, a elevada densidade de fluxo de radiação solar incidente e as altas temperaturas do ar, que favorecem o pendoamento das plantas (STRECK et al., 2007), ressaltando ainda mais a importância do cultivo em ambiente protegido.

Segundo Sganzerla (1995) e Martinez (2006), a temperatura máxima tolerável pela cultura da alface está em torno de 30°C e a mínima por volta dos 6°C. Caron et al., (2003), trabalhando com a cultivar Regina em casa-de-vegetação, encontrou a maior taxa de crescimento absoluto (0,884 g dia⁻¹) na faixa de valores de temperatura média do ar situada entre 7,5°C e 29°C. O autor ainda encontrou taxa de crescimento absoluto, para a mesma cultivar, de 0,099 g dia⁻¹, em condições de temperatura média das máximas de 37,2°C e de 0,024g dia⁻¹ com temperatura média das mínimas igual a 2,1°C. Por isso, ao indicar limites ótimos de temperatura para o desenvolvimento da alface, deve-se ter cautela, pois estes estão associados a outras condições, como umidade relativa do ar, variedade e formas de irrigação (SANCHEZ, 2007).

Quanto à umidade relativa do ar, a faixa compreendida entre 60 e 80 % é a ideal para a cultura da alface (MARTINEZ, 2006), embora, em determinadas fases de seu ciclo, apresente melhor desempenho com valores inferiores a 60% (RADIN et al., 2004).

Com relação à temperatura no sistema hidropônico de cultivo, Bliska Júnior e Honório (1996), recomendam que a temperatura da solução nutritiva não deva ultrapassar os 30 °C, sob pena de causar danos às plantas; no entanto, essa exigência pode variar com a espécie e cultivar utilizadas.

O fotoperíodo também afeta a cultura da alface, pois ela necessita de dias curtos para se manter na fase vegetativa e dias longos para que ocorra o pendoamento. Sabe-se que os valores críticos, para temperatura e fotoperíodo, variam amplamente entre as diferentes cultivares (SANCHEZ, 2007).

Até o início da década de oitenta, o cultivo da alface no Brasil era restrito às regiões de climas amenos, as quais possibilitavam o cultivo durante todo ano. Devido às evoluções técnicas, como o melhoramento genético da cultura da alface e o cultivo protegido, aliadas ao aumento de consumo no país, seu cultivo se expandiu para todo o território nacional, principalmente próximo aos grandes centros urbanos como Belo Horizonte, Brasília, Curitiba, capitais do nordeste e grandes cidades do interior de São Paulo que, no passado, dependiam da produção do cinturão verde da Capital do Estado (BRANCO, 2001).

2.5. Evapotranspiração e coeficiente da cultura (K_c)

O conceito de evapotranspiração, utilizado por Thornthwaite no início da década de 40, refere-se ao total de água perdida por evaporação e por transpiração para a atmosfera a partir de uma superfície vegetada. Sua determinação, seja por modelos matemáticos ou por lisimetria, tem como principal finalidade avaliar a influência direta dos elementos meteorológicos na quantidade de água evapotranspirada e, de modo indireto, como a atmosfera induz o processo. As pesquisas sobre essa variável são diversificadas, normalmente aplicadas a cultivos agrícolas, estabelecidos no campo ou em casas-de-vegetação, mas com a finalidade específica de relacioná-la com o coeficiente de cultura (K_c) ou com o índice de área foliar (IAF), verificar qual variável contribui para sua alteração e comparar métodos de estimativa (FARIAS, et al., 1994; JESUS e ASSIS, 2005).

O conceito de evapotranspiração potencial (ET_p) foi introduzido por Thornthwaite, em 1948, e aperfeiçoado em diversas oportunidades. Em síntese, a ET_p corresponde à água utilizada por uma extensa superfície vegetada, cobrindo totalmente o solo, em crescimento ativo e sem restrição hídrica. PENMAN (1948), também definiu a ET_p , ressaltando que a vegetação deveria ser baixa e com altura uniforme.

A definição de evapotranspiração de referência (ET_0) surgiu no início dos anos 70, visto que as definições originais não especificavam o tipo de vegetação, o grau e a altura da cobertura vegetal do solo, as dimensões da superfície e as condições de bordadura (FRIZZONE, 2004). Depois das definições de JENSEN (1973) e DOORENBOS e PRUITT (1977), divergindo quanto à cultura de referência, sua altura e condições de bordadura, SMITH (1991) propôs a adoção de uma definição padronizada para a ET_0 , como sendo aquela de uma cultura hipotética, com altura fixa de 0,12 m, albedo igual a 0,23, e resistência da cobertura ao transporte de vapor de água, que representaria a evapotranspiração de um gramado verde, de altura uniforme, em crescimento ativo, cobrindo totalmente a superfície do solo, e sem restrições hídricas.

Atendo-se à diferença existente entre a grama em crescimento ativo e outras culturas, em qualquer estágio de desenvolvimento, ambas vegetando

sem restrição hídrica, definiu-se evapotranspiração da cultura (ET_c), na qual se refere à perda de água por uma cultura qualquer, em condições de nenhuma restrição hídrica e em qualquer estágio de desenvolvimento.

A ET_c pode ser determinada a partir de medidas diretas, baseadas no balanço hídrico em volume de solo conhecido, por meio de lisímetros e, ou, sistemas específicos, ou ainda através de estimativas, multiplicando-se a ET_p ou ET_0 pelo coeficiente de cultura (K_c), conforme metodologia recomendada pela FAO (DOORENBOS e PRUITT, 1977).

O coeficiente de cultura (K_c) é um indicador de significado físico e biológico, uma vez que depende da área foliar, da arquitetura (parte aérea e sistema radicular), da cobertura vegetal e da transpiração da planta (ALLEN et al., 1998).

O método de Penman-Monteith, padronizado como recomendado por Allen et al., (1998), é utilizado como padrão por diversos pesquisadores para estimativa do K_c em condições de campo (GARCIA et al., 2004; Katerji e Rana, 2006; PEREIRA et al., 2006). Em cultivos protegidos, entretanto, a velocidade do ar está, em geral, abaixo de $0,5 \text{ m s}^{-1}$ na maioria das instalações, mesmo com a utilização de ventilação mecânica (HANAN, 1998). Em razão dessa especificidade microclimática, a resistência aerodinâmica (r_a) da equação de Penman-Monteith será severamente superestimada se a parametrização proposta por Allen et al., (1998) for implementada, pois o parâmetro r_a é determinado pela relação $208/U_2$, em que U_2 é a velocidade do ar medida a dois metros de altura no interior da instalação.

O desenvolvimento e a validação de modelos matemáticos, que possibilitam estimativas do coeficiente de cultura em sistemas de cultivos específicos, têm sido realizados por diversos pesquisadores. Amayreh & Al-Abed (2005) determinaram o coeficiente de cultura do tomateiro em condições de campo, a partir da utilização de dados meteorológicos e de medições de ET_c de plantas cultivadas em solo coberto com filmes plásticos pretos e irrigadas por gotejamento. Os autores observaram que os valores de K_c , obtidos em meados do ciclo de crescimento, nestas condições específicas de cultivo, foram 31% menores que os recomendados por Doorenbos & Pruitt (1977). Jayanthi et al., (2007) propuseram o uso de medições de reflexão do dossel

vegetativo para quantificar a expansão foliar e proporcionar estimativas do coeficiente de cultura da batata no Estado de Idaho, nos Estados Unidos.

Através do acúmulo térmico, também conhecido como graus-dias acumulados (GDA), têm-se obtido ótimas correlações com o coeficiente de cultura (K_c). Medeiros et al., (2000), encontraram relações altamente significativas entre o K_c e GDA para a cultura do feijão em Campinas, no estado de São Paulo. Orgaz et al., (2005) utilizaram o conceito de graus-dias acumulados para ajustar modelos de estimativa do K_c ao longo do ciclo de crescimento das culturas do melão, feijão, pimentão e melancia. O tempo térmico acumulado também foi utilizado por Oliveira et al., (2005) para estimativa do coeficiente de cultura da alface com formação de cabeça, a qual foi cultivada em solo e irrigada por gotejamento subsuperficial.

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1. Local de realização do experimento e casa-de-vegetação

O trabalho foi realizado na área experimental reservada ao curso de Meteorologia Agrícola, e pertencente ao Departamento de Engenharia Agrícola (DEA), no Campus da Universidade Federal de Viçosa (UFV), Viçosa – MG, de coordenadas geográficas: latitude 20° 45' 45" S, longitude 42° 52' 04" W e altitude 690 m.

Foram coletados dados do ambiente interno a casa-de-vegetação e da cultura da alface, cultivares Grand Rapids, Regina e Great Lakes, para dois experimentos, no período de 18 de maio a 09 de junho e de 24 de junho a 26 de julho de 2001 em sistema hidropônico com circulação laminar de nutrientes (NFT), em condições de casa-de-vegetação.

O experimento foi conduzido em casa-de-vegetação não-climatizada, tipo cobertura em arco, com a maior dimensão orientada no sentido Norte-Sul, coberta com polietileno de baixa densidade (PEBD), aditivado contra raios ultravioleta (UV) e espessura de 150 µm. As laterais foram revestidas com tela plástica de cor branca, com 1mm de malha, conhecida comercialmente como “clarite” para reduzir a entrada de insetos no ambiente de cultivo, o que reduziu bastante a velocidade do vento no interior do ambiente (Figura 1).



Figura 1 – Vista geral da casa-de-vegetação, localizada na área experimental da Meteorologia Agrícola, Universidade Federal de Viçosa – UFV, Viçosa/MG.

As bancadas de crescimento foram compostas de cinco tubos de polipropileno, denominados comercialmente de perfis hidropônicos, com 6,0 m de comprimento, 0,09 m de largura e com orifícios de 0,05 m de diâmetro, onde foram colocadas as mudas dos três cultivares, adotando-se o espaçamento de 0,25 m entre plantas e linhas (Figura 2).

As sementes foram colocadas para germinar em células de espuma fenólica com formato cúbico, tendo 0,02 m de aresta. Depois da semeadura, as células foram mantidas em um sistema hidropônico, especialmente construído para a produção de mudas, com área de aproximadamente 2 m², o qual foi colocado sobre uma bancada na casa-de-vegetação. No período da semeadura até a germinação, a aplicação de água foi realizada durante dez minutos com intervalos de uma hora.

Depois da germinação, as plantas passaram a receber solução nutritiva de acordo com a formulação proposta por FURLANI (1998) para hortaliças de folhas.



Figura 2 – Vista da geral das bancadas de cultivo, com a cultura da alface na fase inicial.

Aos 21 dias depois da sementeira, as mudas com três a quatro folhas definitivas foram transplantadas nas bancadas de cultivo, descritas anteriormente, permanecendo até o final de cada experimento (09/06/01 e 26/07/01 para o 1º e para o 2º experimento, respectivamente).

Após o transplante, a solução circulou intermitentemente das 05:00 às 19:00 h nas bancadas de crescimento, sendo que cada aplicação da solução nutritiva era realizada durante dez minutos, com intervalos de vinte minutos de drenagem e oxigenação das raízes. Adicionalmente, uma aplicação era realizada às 24:00 h, para evitar um possível estresse hídrico das plantas devido à transpiração noturna.

3.2. Medição das variáveis meteorológicas e do consumo de água

O sistema de aquisição de dados do ambiente de cultivo foi constituído por sensores de radiação solar, velocidade do ar, umidade relativa do ar e temperaturas: do ar e da solução nutritiva e os dados foram armazenados em um microcomputador. Para implementação desse sistema, foi utilizada uma

placa de aquisição de dados (CYDAS 1602HR, CYBERRESEARCH, Brandford, CT), constituída de 16 canais de entrada analógica com 16 bits. Os canais analógicos foram conectados aos sensores responsáveis pelo monitoramento do ambiente físico.

A densidade de fluxo de radiação solar foi medida por meio de um piranômetro Eppley, o qual foi instalado a 0,50 m acima do dossel da cultura. A temperatura e a umidade relativa do ar foram medidas por meio de um instrumento que combina dois sensores independentes (Modelo HUMITTER 50Y, VAISALA, Woburn, EUA). A velocidade do ar foi medida utilizando-se de um anemômetro de fio quente (Modelo FMA-903-I, OMEGA, Stamford, EUA).

O consumo de água foi obtido a partir do desenvolvido de um sistema de medição específico para o cultivo hidropônico, o qual foi interligado ao sistema hidráulico das bancadas de cultivo (ZOLNIER et al., 2004). O sistema de medição era composto de um tubo de PVC, com diâmetro de 0,15 m para medições da ET_c a partir do transplântio até duas semanas subseqüentes e de 0,20 m dessa data até final do ciclo da cultura. Ao tubo de PVC, com 0,72 m de altura, chamado de tanque de medição, foi conectado externamente uma mangueira de polietileno transparente, graduada em milímetros, para facilitar a leitura da variação do nível da solução nutritiva, em intervalos pré-determinados (Figura 3 - A). Acoplado ao tanque de medição, um reservatório da solução nutritiva, com capacidade de aproximadamente 120 L, era usado periodicamente para repor a solução utilizada pela planta (Figura 3 - B). O reservatório era isolado hidráulicamente do tubo de PVC durante os períodos de medição da ET_c . Assim, nos intervalos de medições, as torneiras que ligavam o reservatório da solução nutritiva ao resto do sistema hidráulico eram fechadas, e dessa forma o sistema se tornava um volume de controle, onde as únicas perdas eram por evapotranspiração ou pela água incorporada no tecido da planta. O desenvolvimento deste sistema permitiu a medição individual da ET_c para cada unidade experimental, consistindo de 120 plantas, totalizando seis bancadas para os três cultivares avaliados.

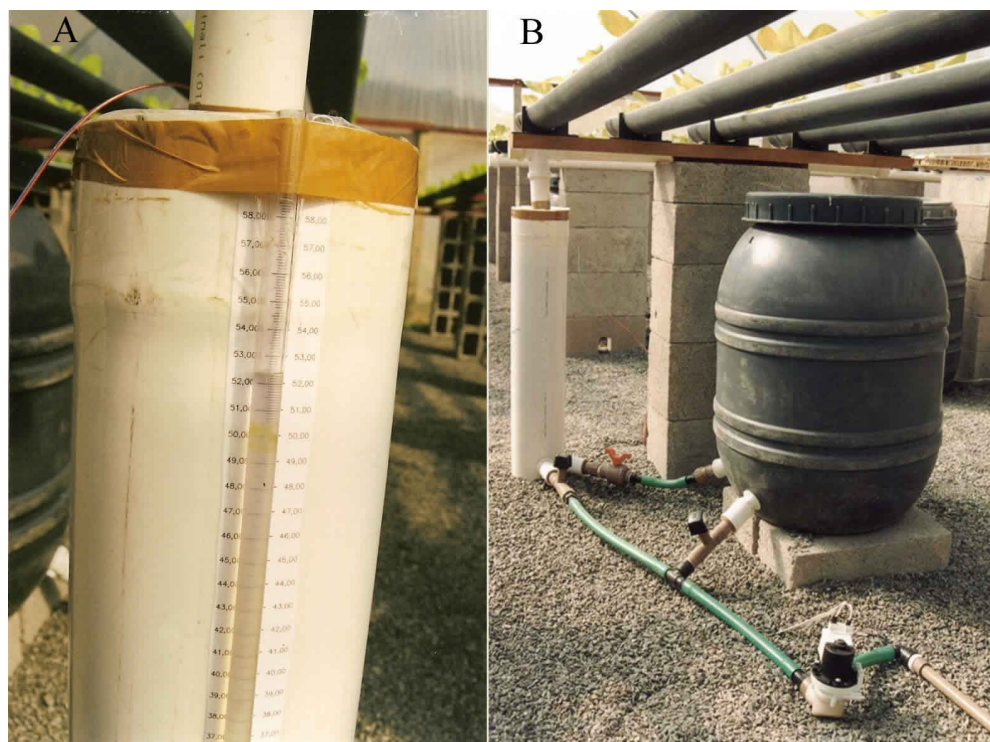


Figura 3 – Mangueira milimetrada acoplada ao tanque de medição (A), reservatório de solução nutritiva (B).

As medições de ET_c foram realizadas ao longo do ciclo da cultura nos dois experimentos mencionados anteriormente, sendo que um conjunto de dados foi utilizado para determinação dos parâmetros dos métodos de estimativa da evapotranspiração, bem como do coeficiente de cultura, e o segundo conjunto foi aplicado para validação da ET_c da alface a partir da multiplicação do K_c estimado pela ET_o . O símbolo ET_o refere-se a estimativa da evapotranspiração de uma cultura hipotética com resistência de superfície (r_s) igual a 70 s m^{-1} , conforme sugerido por Allen et al., (1998).

Para determinação dos parâmetros dos métodos de estimativa da ET_c e do K_c da alface, foram realizadas sete campanhas de medição, totalizando 21 dias úteis entre o transplântio e a colheita. No entanto, para validação das estimativas de ET_c pelos diferentes métodos, foram utilizados valores de ET_c obtidos em 15 dias úteis no período pós-transplântio, provenientes de cinco campanhas de medição. Nos dois experimentos, cada conjunto de dados foi constituído por três dias de medição de ET_c , seguidos por um intervalo de dois dias sem medições.

3.3. Métodos de estimativa da evapotranspiração de referência (ET₀)

Seis métodos de estimativa de evapotranspiração da alface, cultivada em sistema hidropônico sob ambiente protegido, foram avaliados no presente estudo. Três deles são baseados em princípios físicos-biológicos/fisiológicos, tendo como referência o modelo de Penman-Monteith, com variações na parametrização da estimativa da resistência aerodinâmica e no número de variáveis meteorológicas exigidas para o cálculo da ET_c. Além disso, foram utilizados os métodos empíricos propostos por Priestley-Taylor, o método da radiação recomendado pela FAO e o método da radiação simplificado por Hargreaves e Samani (1982).

3.3.1. Penman-Monteith FAO (PMF)

Esse método é utilizado como referência para estimativa da evapotranspiração de uma cultura hipotética, a qual é posteriormente multiplicada pelo coeficiente de cultura (K_c) para estimativa do uso de água pelas diferentes espécies vegetais ao longo do período de crescimento. Em sistemas hidropônicos, o fluxo de calor sensível corresponde ao aquecimento ou resfriamento da solução nutritiva (ZOLNIER et al., 2004).

$$LE_o = \frac{\Delta (R_n - F) + \rho_{ar} c_{par} DPV_{ar} / r_a}{\Delta + \gamma (1 + r_s / r_a)} \quad (1)$$

em que:

LE_o = fluxo de calor latente de referência à superfície da cultura hipotética (W m⁻²);

R_n = saldo de radiação à superfície (W m⁻²);

F = fluxo de calor sensível na solução nutritiva, normalizado para a área da bancada de cultivo (W m⁻²);

Δ ≅ tangente à curva de pressão de saturação do vapor de água em relação à temperatura (Pa °C⁻¹);

ρ_{ar} = densidade absoluta do ar (kg m⁻³);

c_{par} = calor específico do ar à pressão constante ($J\ kg^{-1}\ ^{\circ}C^{-1}$);

DPV_{ar} = déficit da pressão de saturação do vapor de água no ar (Pa);

γ = coeficiente psicrométrico ($Pa\ ^{\circ}C^{-1}$);

r_a = resistência aerodinâmica ($s\ m^{-1}$);

r_s = resistência de superfície da cultura de referência ($s\ m^{-1}$).

No cálculo dos parâmetros necessários para aplicação deste método, foram utilizados os procedimentos propostos por Allen et al., (1998). Com base nessa metodologia, o termo r_a é estimado pela relação $208/U_2$, sendo U_2 a velocidade do ar a dois metros de altura, expressa em $m\ s^{-1}$.

3.3.2. Penman-Monteith Modificado para Ambientes Protegidos (PMAP)

Neste método, a resistência aerodinâmica da equação de Penman-Monteith-FAO (Equação 1) foi substituída conforme descrito a seguir, a partir da utilização do fator de desacoplamento (Ω) proposto por McNaughton e Jarvis (1983):

$$\Omega = \frac{1}{1 + \frac{\gamma}{\Delta + \gamma} \left[\frac{r_s}{r_a} \right]} \quad (2)$$

De acordo com os autores, o Ω médio para uma superfície de grama com crescimento rasteiro, cobrindo totalmente o solo, bem irrigada e com albedo de 0,23 será aproximadamente 0,80. Substituindo-se o valor $\Omega = 0,80$ sugerido pelos autores e $r_s = 70\ s\ m^{-1}$, proposto por Allen et al., (1998), na relação usada para obtenção do fator de desacoplamento, a resistência aerodinâmica (r_a) poderá ser estimada por:

$$r_a = \frac{280\ \gamma}{\gamma + \Delta} \quad (3)$$

A utilização do fator Ω para estimativa do parâmetro r_a , em oposição à metodologia proposta por Allen (1998), se justifica pelos valores da resistência aerodinâmica não tenderem ao infinito quando a velocidade do ar tende para zero ou valores extremamente baixos, como os observados em ambiente protegido (WANG et al., 1999; BOULARD et al., 2004; MOLINA-AIZ et al., 2004; BARTZANAS et al., 2005). Com a utilização do fator de desacoplamento, é importante observar que a velocidade do ar não é mais necessária para a estimativa do termo r_a .

3.3.3. Penman-Monteith Modificado Para Ambiente Protegido Simplificado (PMAPS)

Devido à queda acentuada da temperatura do ar no período noturno e condições microclimáticas específicas de ambientes protegidos, os valores de umidade relativa do ar encontram-se próximos à 100% ao nascer do sol (FARIAS et al., 1992; BURIOL et al., 2000). Assim, considerando-se essa especificidade meteorológica, o DPV_{ar} ao longo do período diurno pode ser estimado pela diferença entre a pressão de saturação de vapor de água (e_s), determinada a partir da temperatura média do ar do período de estimativa da evapotranspiração, e a pressão de saturação (e_{s_min}), calculada com a temperatura mínima do ar medida ao nascer-do-sol. Dessa forma, o método PMAP foi simplificado, conforme equação a seguir:

$$LE_o = \frac{\Delta (R_n - F) + \rho_{ar} c_{par} (e_s - e_{s_min}) / r_a}{\Delta + \gamma (1 + r_s / r_a)} \quad (4)$$

em que:

e_s = pressão de saturação de vapor de água (Pa);

e_{s_min} = pressão de saturação calculada a partir da temperatura mínima do ar medida ao nascer do sol (Pa).

Deve-se observar que este método não necessita de medições da velocidade do ar e umidade relativa no ambiente de cultivo, em decorrência do uso do fator de desacoplamento e da simplificação descrita anteriormente.

3.3.4. Priestley-Taylor (PT)

O método de Priestley-Taylor pode ser interpretado como uma simplificação do método originalmente proposto por Penman, onde a evapotranspiração potencial é estimada exclusivamente a partir da evapotranspiração de equilíbrio (McNAUGHTON e JARVIS, 1983). Nesse caso, um fator de ajuste α , universalmente conhecido como parâmetro de Priestley-Taylor, compensa os efeitos do termo aerodinâmico que são simplificados pelo método:

$$LE_p = \alpha \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} (R_n - F) \quad (5)$$

em que:

α = parâmetro de Priestley-Taylor (adimensional)

É importante notar que, para utilização da Equação 5, são necessários dados da temperatura do ar, da solução nutritiva para estimativa da variável F e medições ou estimativas do saldo de radiação.

3.3.5. Radiação Solar (RS)

Este método requer apenas medições da radiação solar global incidente (R_g), expressa em $W m^{-2}$, temperatura do ar no ambiente interno e calibração preliminar para determinação do fator de correção (r), nesse caso, específico do ambiente protegido, sendo dado, segundo PEREIRA et al., (1997), por:

$$LE_p = r \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} R_g \quad (6)$$

em que:

r = fator de correção do método da radiação solar (RS) específico para condições de ambiente protegido.

3.3.6. Radiação Solar Simplificado (RSS)

Esse método é bastante similar ao da radiação solar, no entanto, a variável R_g é estimada pela equação proposta por Hargreaves e Samani (1982). Para possibilitar a estimativa de R_g ao longo do período diurno, em escala horária, a temperatura máxima diária foi substituída pela temperatura média do ar no período de estimativa considerado.

$$LE_p = r \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} k_r \sqrt{t_m - t_{min}} R_a \quad (7)$$

em que:

k_r = coeficiente de ajuste ($^{\circ}\text{C}^{-0,5}$);

t_m = temperatura média do ar para o período considerado ($^{\circ}\text{C}$);

t_{min} = temperatura mínima do ar em escala diária ($^{\circ}\text{C}$);

R_a = radiação solar incidente instantânea no topo da atmosfera em (W m^{-2}) para a escala horária e em ($\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$) para a escala diária.

3.4. Estimativa do coeficiente de cultura (K_c)

Como discutido na introdução, para corrigir a sensibilidade da resistência aerodinâmica devido aos baixos valores de velocidade do vento observados em casa-de-vegetação, quando estimada pela parametrização proposta por Allen et al., (1998), esta foi estimada a partir da parametrização proposta por McNaughton e Jarvis (1983).

O coeficiente de cultura (K_c) foi determinado para cada um dos cultivares de alface, dividindo-se os valores diários medidos de ET_c pelos valores estimados correspondentes da evapotranspiração de referência (ET_o). Em seguida, os resultados de K_c obtidos foram relacionados com os graus-dia acumulados (GDA) no período pós-transplante, visando à obtenção de um modelo matemático para estimativa posterior deste parâmetro.

Os graus-dia acumulados depois do transplante das mudas foi determinado pela equação proposta por SCAIFE et al., (1987). O mesmo autor propõe a utilização do valor de $3,5^{\circ}\text{C}$ para a temperatura base.

3.5. Análise e avaliação dos métodos de estimativa da evapotranspiração

Após a determinação dos parâmetros necessários para implementação dos métodos descritos anteriormente, foi utilizado um conjunto independente de valores medidos das variáveis meteorológicas para estimativa da evapotranspiração da alface (ET_c) ao longo do ciclo de crescimento. A ET_c foi obtida a partir da multiplicação do coeficiente de cultura K_c pela evapotranspiração de referência (LE_o) ou potencial (LE_p). Em seguida, os valores de ET_c estimados foram comparados com os valores medidos. Para teste de desempenho dos métodos de estimativa da evapotranspiração, foram determinados índices estatísticos de precisão (coeficiente de correlação, r) e de exatidão (índice de concordância de Willmott, d) (WILLMOTT et al., 1985). O índice “ d ” está associado ao desvio entre valores estimados e observados, sendo que quanto mais próximo de 1, maior é a exatidão do modelo de predição da variável analisada. Por outro lado, o coeficiente “ r ” indica a precisão do modelo, indicando o grau de dispersão dos dados obtidos em relação à média. Adicionalmente, foram estimados os seguintes erros estatísticos: erro médio de estimativa (MBE) e a raiz quadrada do quadrado do erro médio de estimativa (RMSE). As expressões utilizadas para estimativa de cada um dos índices são:

$$r = \frac{\left[\sum_{i=1}^n LEi_{est} (LEi_{obs} - \overline{LEi_{obs}}) \right]}{\left[\sum_{i=1}^n (LEi_{obs} - \overline{LEi_{obs}})^2 \sum_{i=1}^n (LEi_{est} - \overline{LEi_{est}})^2 \right]^{1/2}} \quad (8)$$

$$d = 1 - \left[\frac{\sum_{i=1}^n (LEi_{est} - LEi_{obs})^2}{\sum_{i=1}^n (|LEi_{est} - \overline{LEi_{obs}}| + |LEi_{obs} - \overline{LEi_{obs}}|)^2} \right] \quad (9)$$

$$MBE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (LEi_{est} - LEi_{obs}) \quad (10)$$

$$\text{RMSE} = \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\overline{\text{LEi}}_{\text{est}} - \overline{\text{LEi}}_{\text{obs}})^2 \right]^{1/2} \quad (11)$$

em que:

n = número de observações;

$\overline{\text{LEi}}_{\text{obs}}$ = valores de evapotranspiração observados;

$\overline{\text{LEi}}_{\text{est}}$ = valores de evapotranspiração estimados.

A barra sobre os símbolos $\overline{\text{LEi}}_{\text{est}}$ e $\overline{\text{LEi}}_{\text{obs}}$ refere-se ao valor médio dos dados considerados.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Variáveis microclimáticas no interior da casa-de-vegetação

Na Figura 4, observa-se a variação da irradiância solar global diária (R_g) e dos valores médios diurnos do déficit de pressão de saturação de vapor de água no ar (DPV_{ar}), velocidade do ar (U), temperatura do ar (t) e umidade relativa do ar (UR) ao longo do ciclo de crescimento da alface hidropônica, expresso em dias após o transplântio (DAT). Na Figura 5 observa-se a variação dos valores médios noturnos do déficit de pressão de saturação de vapor de água no ar (DPV_{ar}), velocidade do ar (U), temperatura do ar (t) e umidade relativa do ar (UR) ao longo do ciclo de crescimento da alface hidropônica, expresso em dias após o transplântio (DAT). Os valores exibidos nesta figura foram empregados nos diversos métodos de estimativa de ET_c para os três cultivares de alface.

Os valores de R_g oscilaram de 3 a 14 $MJd^{-1}m^{-2}$, no período compreendido entre a data de transplântio e o 25 DAT, em decorrência da passagem de duas frentes frias e de condições parcialmente nubladas, características do clima da localidade em estudo. Assim, essas duas condições ditaram o comportamento da temperatura, umidade relativa e do déficit de pressão de vapor de água no ar. Os valores diurnos de t , UR e DPV_{ar} estiveram compreendidos entre 19 e 25 °C, 50 e 85% e 3 e 14 hPa, respectivamente.

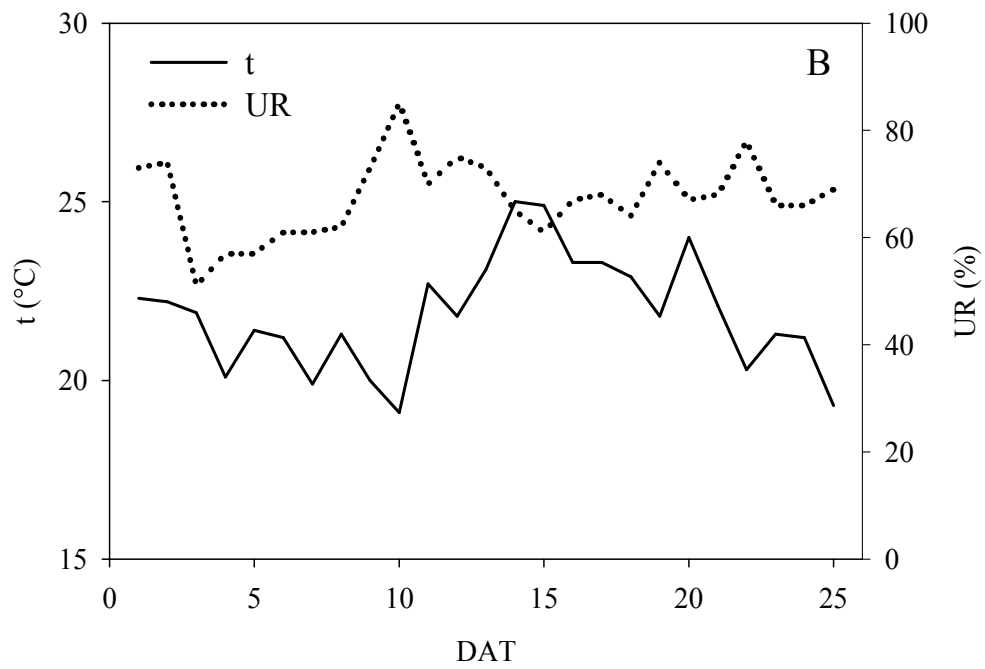
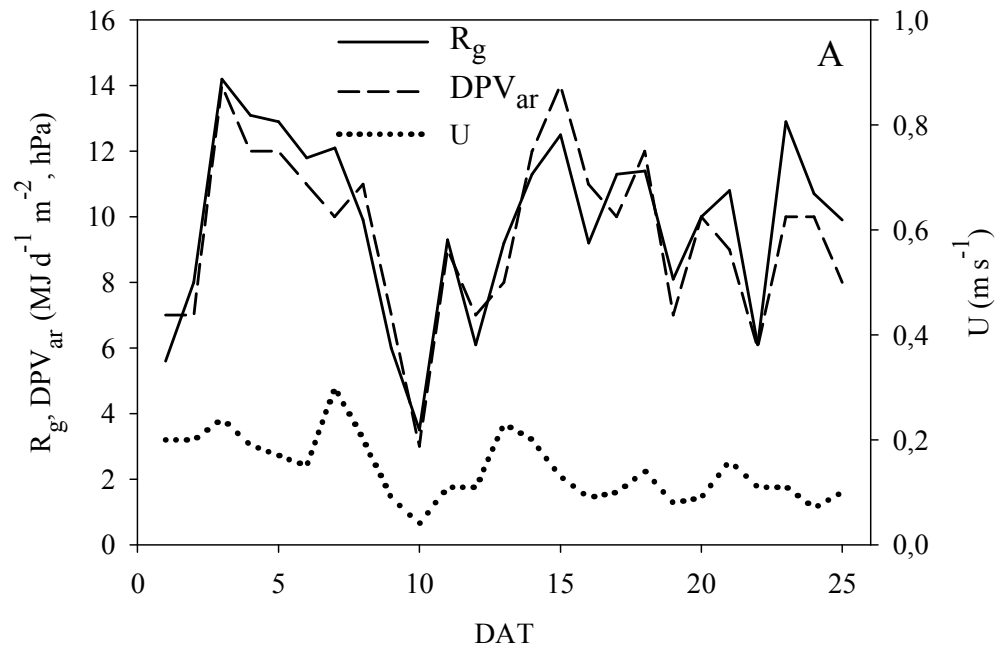


Figura 4 – Irradiância solar global diária (R_g), e dos valores médios de déficit de pressão de saturação de vapor de água no ar (DPV_{ar}) e velocidade do ar (U) (Figura A) e temperatura do ar (t) e umidade relativa do ar (UR) (Figuras B) ao longo do ciclo de crescimento da alface hidropônica, expresso em dias após o transplante (DAT), para o período diurno.

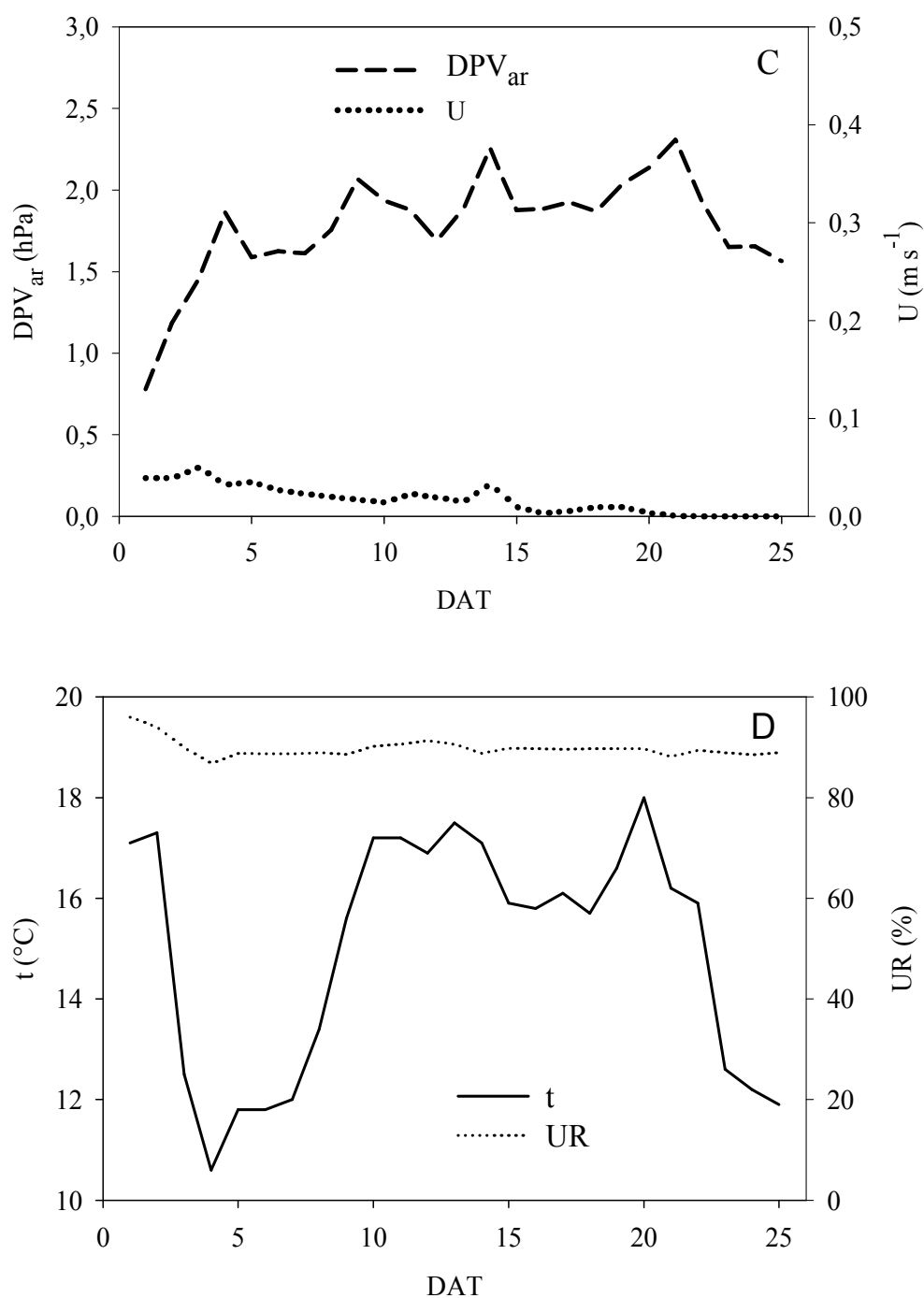


Figura 5 – Valores médios de déficit de pressão de saturação de vapor de água no ar (DPV_{ar}) e velocidade do ar (U) (Figura C) e temperatura do ar (t) e umidade relativa do ar (UR) (Figuras D) ao longo do ciclo de crescimento da alface hidropônica, expresso em dias após o transplante (DAT), para o período noturno.

No período noturno, a UR apresentou pequenas variações, em torno de 90%. Em contraste, a temperatura do ar foi severamente afetada pela passagem das frentes frias anteriormente mencionadas, sendo uma em 3 DAT e outra no 22 DAT. Apesar da variação marcante da temperatura do ar à noite, o DPV_{ar} variou somente entre 0,9 e 2,3 hPa como resultado da alta umidade relativa.

Devido à utilização de telas plásticas nas laterais da instalação para evitar a presença de insetos no ambiente de cultivo, a velocidade do ar esteve sempre abaixo de $0,3 \text{ m s}^{-1}$ no período diurno e inferior a $0,05 \text{ m s}^{-1}$ à noite. Portanto, nem mesmo a instabilidade atmosférica, oriunda da aproximação das frentes frias durante o período experimental, foi capaz de intensificar o movimento do ar no interior da casa-de-vegetação. Resultados semelhantes relacionados a baixos valores de velocidade do ar em ambientes protegidos também foram relatados por Wang et al., (1999), Boulard et al., (2004), Molina-Aiz et al., (2004) e Bartzanas et al., (2005).

4.2. Coeficiente de cultura baseado no conceito de graus-dia

Na Figura 6 verifica-se que o modelo sigmoidal com quatro parâmetros se ajustou bem aos valores observados de K_c para os três cultivares avaliados no período pós-transplântio. Nota-se que os coeficientes de determinação ajustados foram respectivamente 0,99, 0,98 e 0,98 para os cultivares Grand Rapids, Regina e Great Lakes, mostrando o excelente desempenho deste modelo para estimativa do coeficiente de cultura em sistemas hidropônicos. Informações complementares, como valor numérico dos parâmetros deste modelo, assim como os valores do erro-padrão associado, podem ser obtidas na Tabela 1.

Um modelo similar ao adotado no presente trabalho, denominado de equação sigmoidal de Boltzmann, foi empregado por Carmassi et al., (2007) para estimativa do índice de área foliar (IAF) do tomateiro cultivado em sistema hidropônico, tendo como variável independente os graus-dia acumulados (GDA) a partir de $400 \text{ }^\circ\text{C d}^{-1}$. Da mesma forma que observado no presente trabalho, os autores encontraram um alto coeficiente de determinação ($R^2 = 0,994$) entre IAF e GDA, sugerindo também a aplicabilidade deste modelo para

estimativa do coeficiente de cultura, uma vez que o K_c e o IAF estão intrinsecamente relacionados. Steidle Neto, (2007), trabalhando com tomateiro em casa de vegetação, também utilizou um modelo semelhante para a estimativa do K_c da cultura, obtendo alto coeficiente de determinação, da ordem de 0,94.

Em termos médios, foram necessário cerca de $410\text{ }^\circ\text{C d}^{-1}$ acumulados para completar o ciclo da cultura da alface hidropônica neste trabalho.

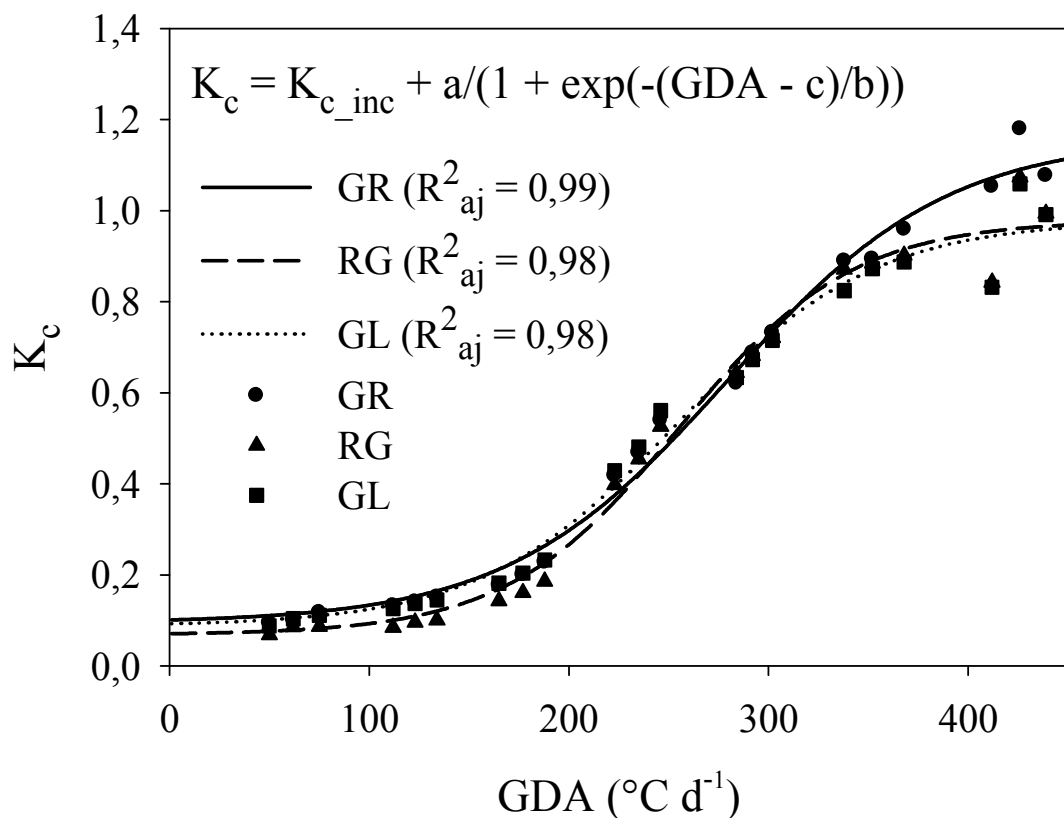


Figura 6 – Valores diários estimados (linhas) e medidos (pontos) do coeficiente da cultura (K_c) para a alface cultivada em sistema hidropônico sob ambiente protegido, tendo como variável independente os graus-dia acumulados após o transplante (GDA). Os valores apresentados referem-se aos cultivares Grand Rapids (GR), Regina (RG) e Great Lakes (GL).

Tabela 1 – Coeficiente de cultura inicial (K_{c_inc}), parâmetros do modelo sigmoidal (a, b, c) obtidos a partir de análise de regressão e coeficiente de correlação ajustado para três cultivares de alface produzidos em sistema hidropônico sob ambiente protegido. O erro padrão de estimativa dos parâmetros é apresentado entre parênteses

Cultivar	K_{c_inc}	a	b	c	r_{aj}^2
Grand Rapids	0,0994 ($\pm 0,0122$)	1,065 ($\pm 0,028$)	55,03 ($\pm 3,15$)	279,6 ($\pm 4,6$)	0,99
Regina	0,0685 ($\pm 0,0111$)	0,910 ($\pm 0,023$)	43,35 ($\pm 3,36$)	255,4 ($\pm 4,3$)	0,98
Great Lakes	0,0876 ($\pm 0,0033$)	0,891 ($\pm 0,025$)	49,24 ($\pm 3,78$)	254,6 ($\pm 5,03$)	0,98

Comparando-se os valores obtidos com dados publicados na literatura, específicos para o cultivo da alface em condições de campo, verificam-se grandes discrepâncias no início do período pós-transplântio, mas similaridades após o fechamento do dossel vegetativo. De acordo com Allen et al., (1998), os valores de K_c recomendados para a alface cultivada em condições de campo são respectivamente 0,7, 1,0 e 0,9 para os estádios de crescimento inicial, intermediário e final, considerando-se um ciclo de 75 dias, que é muito superior ao ciclo da alface produzida em cultivos hidropônicos. Tipicamente, neste sistema, as mudas são produzidas em três semanas e mantidas posteriormente em perfis hidropônicos por um período de quatro semanas, totalizando, assim, um ciclo de aproximadamente 50 dias (LYRA, 2002).

No presente estudo observou-se que o K_c da alface foi aproximadamente 0,1 no estágio de crescimento inicial (até $150\text{ }^\circ\text{C d}^{-1}$), sofreu um incremento acentuado na fase intermediária, alcançando 0,7 aos $300\text{ }^\circ\text{C d}^{-1}$, e um incremento um pouco menor a partir desta data, atingindo no final do ciclo valores em torno de 0,95 para os cultivares Regina e Great Lakes, ambos com formação de cabeça, e 1,1 para o cultivar Grand Rapids que não possui formação de cabeça. Na Tabela 2 é apresentado os valores de graus-dia acumulados e do K_c da alface hidropônica, estimados através do modelo sigmoidal de 4 parâmetros, para todo o ciclo da cultura e para cada cultivar em estudo.

As diferenças marcantes de K_c no estágio inicial de crescimento devem ser atribuídas às peculiaridades deste sistema de cultivo. Em condições de campo, o componente predominante no processo de evapotranspiração no

período inicial de crescimento da cultura é a evaporação da água presente no solo (ALLEN et al, 1998). Em contraste, em sistema hidropônico do tipo NFT, a evaporação tem importância desprezível no processo de evapotranspiração, uma vez que este ocorre apenas através dos orifícios do perfil hidropônico. Paralelamente, a transpiração da cultura é pouco expressiva neste estágio de crescimento, tendo em vista que o índice de área foliar da cultura é muito baixo.

Tabela 2 – Graus-dia acumulados e coeficiente de cultura da alface hidropônica para todo o ciclo da cultura e para as cultivares Grand Rapids, Regina e Great Lakes

Fase	Dia	Grand Rapids		Regina		Great Lakes	
		GDA	Kc	GDA	Kc	GDA	Kc
Inicial	18/05/2001	94,7	0,13	75,2	0,08	76,7	0,11
	19/05/2001	105,6	0,14	86,1	0,09	87,6	0,12
	20/05/2001	118,7	0,15	99,2	0,09	100,7	0,13
	23/05/2001	157,9	0,20	138,4	0,13	139,9	0,17
	24/05/2001	172,3	0,23	152,8	0,15	154,3	0,19
Intermediária	25/05/2001	186,9	0,26	167,4	0,17	168,9	0,22
	28/05/2001	236,0	0,43	216,5	0,33	218,0	0,37
	29/05/2001	253,6	0,50	234,1	0,41	235,6	0,45
	30/05/2001	270,5	0,58	251,0	0,50	252,5	0,52
	02/06/2001	318,4	0,81	298,9	0,73	300,4	0,73
Final	03/06/2001	334,1	0,87	314,6	0,79	316,1	0,78
	04/06/2001	351,6	0,93	332,1	0,85	333,6	0,83
	07/06/2001	395,3	1,04	375,8	0,93	377,3	0,91
	08/06/2001	408,5	1,07	389,0	0,94	390,5	0,93
	09/06/2001	420,6	1,08	401,1	0,95	402,6	0,94

4.3. Evapotranspiração da cultura em base horária

Na Tabela 3 encontram-se os valores do coeficiente de correlação (r), do índice de concordância (d), da raiz quadrada do quadrado do erro médio de estimativa (RMSE) e do erro médio de estimativa (MBE), referentes ao desempenho estatístico dos diferentes métodos utilizados para estimativa horária da evapotranspiração dos cultivares de alface Grand Rapids, Regina e Great Lakes em sistema hidropônico do tipo NFT sob ambiente protegido. Os resultados foram organizados com objetivo de mostrar a variação de

desempenho dos métodos ao longo do ciclo da cultura, que foi dividido em cinco campanhas de medição a partir do transplantio. Cada etapa compreendeu um período de medição de três dias, os quais foram intercalados por períodos de dois dias quando a ET_c da alface não foi obtida. A primeira etapa teve início no período compreendido entre o 3º e 5º dia após o transplantio quando o índice de área foliar (IAF) médio para os três cultivares alcançou 0,12. Na segunda, terceira, quarta e quinta etapas, o IAF médio foi 0,26, 0,62, 1,64 e 3,14, respectivamente.

De forma geral, verifica-se que o coeficiente de correlação (r) e o índice de concordância (d) apresentaram valores em torno de 0,9 para os métodos PMAP e PMAPS, e que seus valores diminuíram à medida que as estimativas foram realizadas pelos métodos PMF ou pelos que utilizam somente dados de radiação solar e, ou, temperatura do ar (PT, RS e RSS). Com relação aos coeficientes RMSE e MBE, observa-se que a raiz quadrada do quadrado do erro médio de estimativa de todos os métodos avaliados foi, no máximo, 11 W m^{-2} nas duas primeiras etapas de medição, com exceção do método RSS, que atingiu logo na segunda etapa o valor de 26 W m^{-2} . Com o aumento da ET_c , resultante da expansão foliar, o erro de precisão aumentou nas campanhas seguintes, ficando respectivamente entre 20 e 65 W m^{-2} para os métodos PMF, PMAP e PMAPS e entre 25 e 112 W m^{-2} para PT, RS e RSS. Com relação ao erro médio de estimativa, nota-se que, independente do cultivar, o valor foi no máximo igual a 2 W m^{-2} nas duas primeiras campanhas de medição quando foram utilizados os métodos PMAP e PMAPS. Para as etapas seguintes, o MBE foi positivo, com base nas estimativas obtidas com PMAP, PMAPS, PT e RS, indicando que esses métodos superestimaram a ET_c . Em contraste, o método PMF subestimou a ET_c para o cultivar Great Lakes em todas as campanhas de medição.

Tabela 3 – Desempenho estatístico dos métodos PMF, PMAP, PMAPS, PT, RS e RSS para estimativa da evapotranspiração horária dos cultivares de alface Grand Rapids, Regina e Great Lakes em sistema hidropônico sob ambiente protegido. O período experimental compreendeu cinco etapas de medição, cada uma com duração de três dias, que foram conduzidas após o transplântio.

Etapas	Método	Grand Rapids				Regina				Great Lakes			
		r	d	MBE (W m ⁻²)	RMSE (W m ⁻²)	r	d	MBE (W m ⁻²)	RMSE (W m ⁻²)	r	d	MBE (W m ⁻²)	RMSE (W m ⁻²)
1º	PMF	0,82	0,82	-5	8	0,79	0,79	-5	7	0,70	0,70	-7	10
2º		0,88	0,88	-5	9	0,87	0,91	-3	6	0,87	0,86	-6	9
3º		0,91	0,95	-4	21	0,92	0,97	10	20	0,90	0,94	-2	19
4º		0,86	0,92	11	36	0,86	0,94	9	34	0,87	0,93	-6	31
5º		0,88	0,93	11	43	0,87	0,98	7	40	0,89	0,94	-1	36
1º	PMAP	0,93	0,96	1	4	0,89	0,91	-2	5	0,86	0,90	-2	5
2º		0,90	0,95	0	6	0,92	0,96	1	4	0,92	0,95	-1	5
3º		0,95	0,96	14	21	0,96	0,95	23	28	0,95	0,95	14	20
4º		0,89	0,87	38	48	0,91	0,91	30	40	0,92	0,94	17	20
5º		0,92	0,92	34	47	0,92	0,99	25	41	0,94	0,95	18	34
1º	PMAPS	0,88	0,93	-1	5	0,82	0,87	-1	6	0,81	0,86	-1	6
2º		0,89	0,94	2	7	0,91	0,95	1	5	0,92	0,95	1	5
3º		0,93	0,93	20	28	0,94	0,93	28	34	0,92	0,92	19	26
4º		0,88	0,84	44	52	0,90	0,88	36	44	0,91	0,92	22	34
5º		0,90	0,86	55	65	0,91	0,98	43	55	0,92	0,92	36	47
1º	PT	0,80	0,89	0	6	0,78	0,87	-1	6	0,68	0,80	-3	7
2º		0,84	0,91	-2	8	0,87	0,92	1	6	0,86	0,91	-3	8
3º		0,91	0,91	17	30	0,92	0,91	32	40	0,89	0,90	19	29
4º		0,86	0,84	42	59	0,85	0,83	40	56	0,87	0,90	22	42
5º		0,87	0,83	59	78	0,87	0,96	49	69	0,89	0,89	38	56
1º	RS	0,57	0,75	2	9	0,54	0,67	-4	9	0,42	0,65	-1	9
2º		0,70	0,83	1	11	0,74	0,84	-1	7	0,72	0,84	-1	9
3º		0,75	0,85	4	33	0,80	0,94	7	25	0,73	0,84	4	31
4º		0,63	0,70	47	76	0,72	0,82	29	54	0,67	0,79	23	56
5º		0,71	0,82	24	66	0,75	0,97	18	55	0,73	0,83	16	58
1º	RSS	0,74	0,71	10	13	0,66	0,80	1	7	0,66	0,71	7	11
2º		0,76	0,57	24	26	0,78	0,68	13	15	0,50	0,51	20	27
3º		0,84	0,82	34	45	0,88	0,91	31	39	0,82	0,80	32	42
4º		0,71	0,60	88	102	0,72	0,65	61	78	0,76	0,71	60	74
5º		0,79	0,67	100	112	0,84	0,94	80	91	0,81	0,73	79	93

Nas Figuras 7 e 8 observa-se a variação diurna dos valores medidos e estimados de ET_c pelos métodos de Penman-Monteith (PMF, PMAP e PMAS) e pelos métodos empíricos (PT, RS e RSS), respectivamente, para o 5º dia após o transplante, quando o IAF médio para os três cultivares foi 0,12. Já as Figuras 9 e 10 apresentam a variação diurna dos valores medidos e estimados de ET_c pelos métodos de Penman-Monteith (PMF, PMAP e PMAS) e pelos métodos empíricos (PT, RS e RSS), respectivamente, para o 25º dia após o transplante, quando o IAF médio para os três cultivares foi 3,14. Para facilitar a análise de desempenho dos diferentes métodos de estimativa de ET_c , a marcha diurna do DPV_{ar} também foi plotada em cada um dos gráficos mostrados nas figuras.

No período inicial de crescimento (5 DAT), independente do cultivar, observa-se que o método PMF estimou a ET_c de forma satisfatória no período da manhã, mas não foi capaz de incorporar os efeitos do aumento do DPV_{ar} na evapotranspiração à tarde, a qual foi severamente subestimada. Entretanto, com o aumento expressivo do IAF, observado no 25 DAT, o erro de estimativa da ET_c com o método PMF foi atenuado pela diminuição do DPV_{ar} , resultando da maior liberação de vapor de água no ambiente de cultivo (Figura 9). Esse desempenho deficiente do método PMF em ambiente protegido, especialmente no período inicial de crescimento, pode ser atribuído à parametrização do modelo de Penman-Monteith, conforme sugerido por ALLEN et al., (1998). Como a velocidade do ar é muito baixa em condições de ambiente protegido, a relação $208/U_2$ superestima o parâmetro r_a , que, por sua vez, subestima a importância do termo aerodinâmico desse modelo.

Por outro lado, independente do cultivar e do estágio de crescimento da cultura, o método PMAP, bem como a sua versão simplificada (PMAPS), possibilitaram estimativas mais próximas dos valores observados de ET_c , tanto no período da manhã como no da tarde. Esses resultados sugerem que, quando o modelo de Penman-Monteith é adequadamente parametrizado, conforme apresentado nesse trabalho, os dados dos sensores de umidade relativa e de velocidade do ar não são cruciais para melhores estimativas horárias da ET_c da alface cultivada em sistema hidropônico sob ambiente protegido.

As condições micrometeorológicas específicas dos ambientes protegidos, como velocidade do ar abaixo de $0,5 \text{ m s}^{-1}$ (HANAN, 1998) e umidade relativa do ar próxima à saturação no início do período da manhã (BURIOL et al., 2000) permitem versões simplificadas do método de Penman-Monteith, contribuindo, desta forma, para redução dos custos de implantação de sistemas automáticos para aplicação da solução nutritiva. No entanto, deve-se observar que ambos os métodos PMAP e PMAPS ainda requerem medições ou estimativas do saldo de radiação à superfície do dossel vegetativo.

Similarmente ao PMF, os métodos baseados na equação de Priestley-Taylor (PT), na radiação solar global e temperatura do ar (RS) e na temperatura do ar exclusivamente (RSS) não tiveram bom desempenho na estimativa da ET_c após o meio-dia durante o período inicial de crescimento da alface (Figura 8). Entretanto, com a diminuição do DPV_{ar} no final do ciclo da cultura, chegando no máximo a 1.400 Pa, aproximadamente, o desempenho dos métodos PT e RS melhorou no período da tarde. Porém, esse fato não foi observado com o método RSS, que se baseia somente na temperatura e, assim, a ET_c continuou a ser subestimada nesse período. Outro fato a ser destacado tanto no início como no final do ciclo de crescimento da alface, é que os métodos baseados na radiação solar e temperatura do ar (PT, RS e RSS) tenderam a superestimar a ET_c no início do período da manhã.

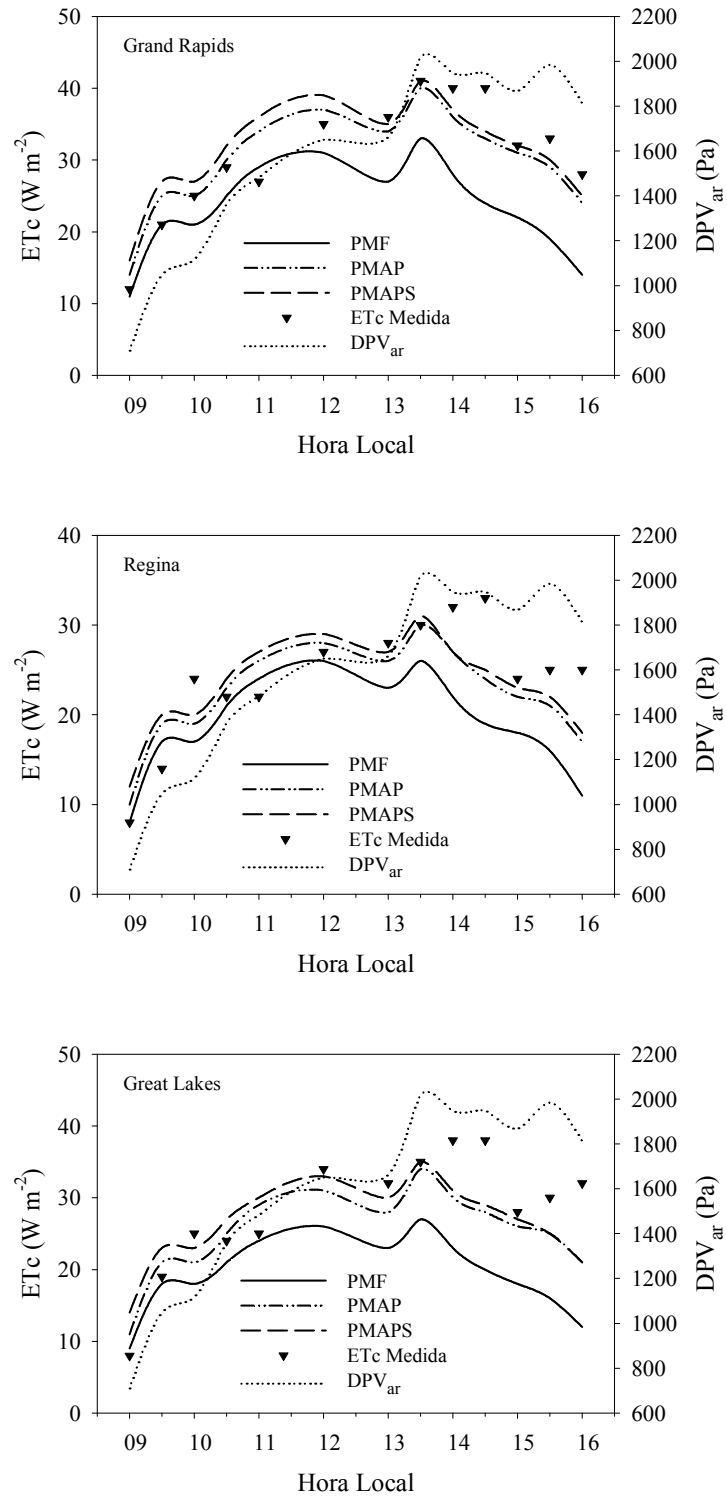


Figura 7 – Valores diurnos medidos e estimados da evapotranspiração (ET_c) de três cultivares de alface hidropônica sob ambiente protegido (eixo esquerdo) e alterações correspondentes do déficit de pressão de saturação de vapor de água no ar (eixo direito). As medições e estimativas de ET_c foram realizadas no 5º dia após o transplante, por meio dos métodos PMF, PMAP e PMAPS.

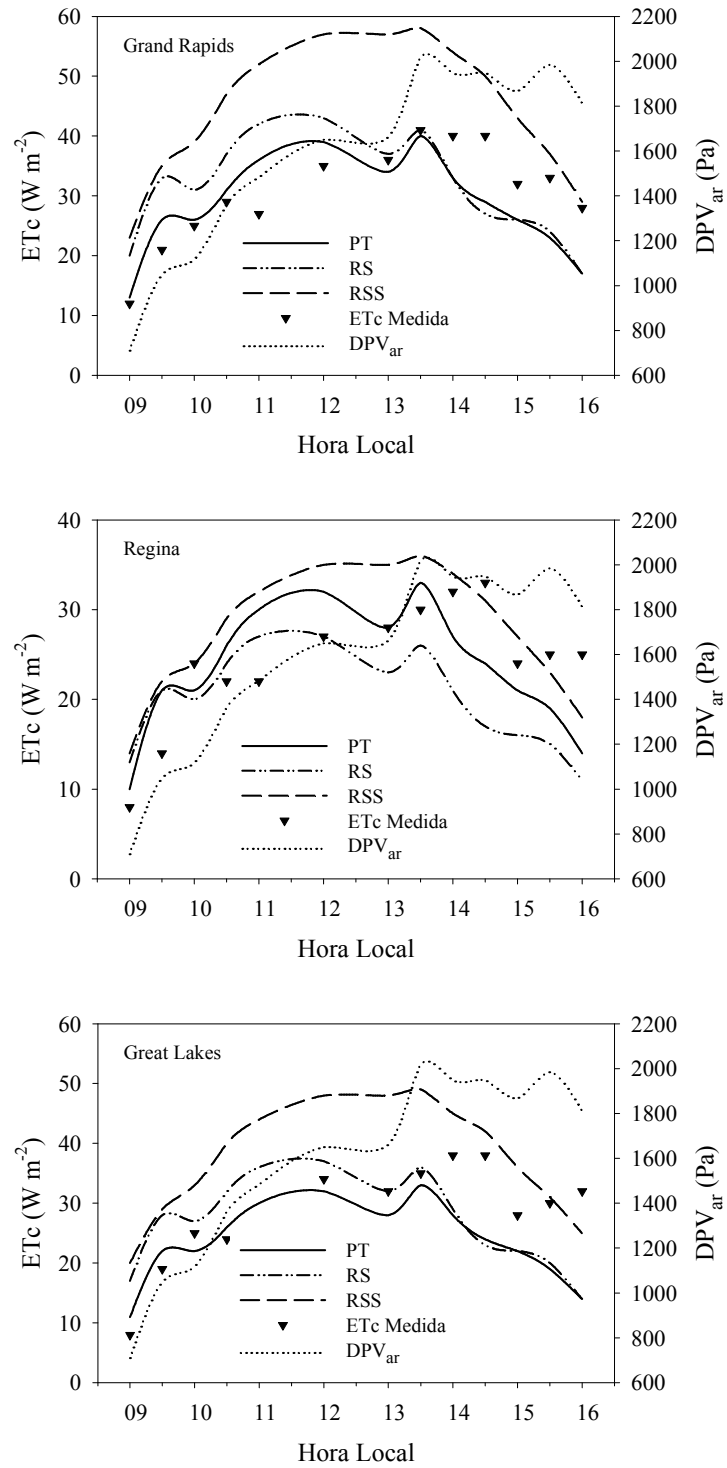


Figura 8 – Valores diurnos medidos e estimados da evapotranspiração (ET_c) de três cultivares de alface hidropônica sob ambiente protegido (eixo esquerdo) e alterações correspondentes do déficit de pressão de saturação de vapor de água no ar (eixo direito). As medições e estimativas de ET_c foram realizadas no 5º dia após o transplante, por meio dos métodos PT, RS e RSS.

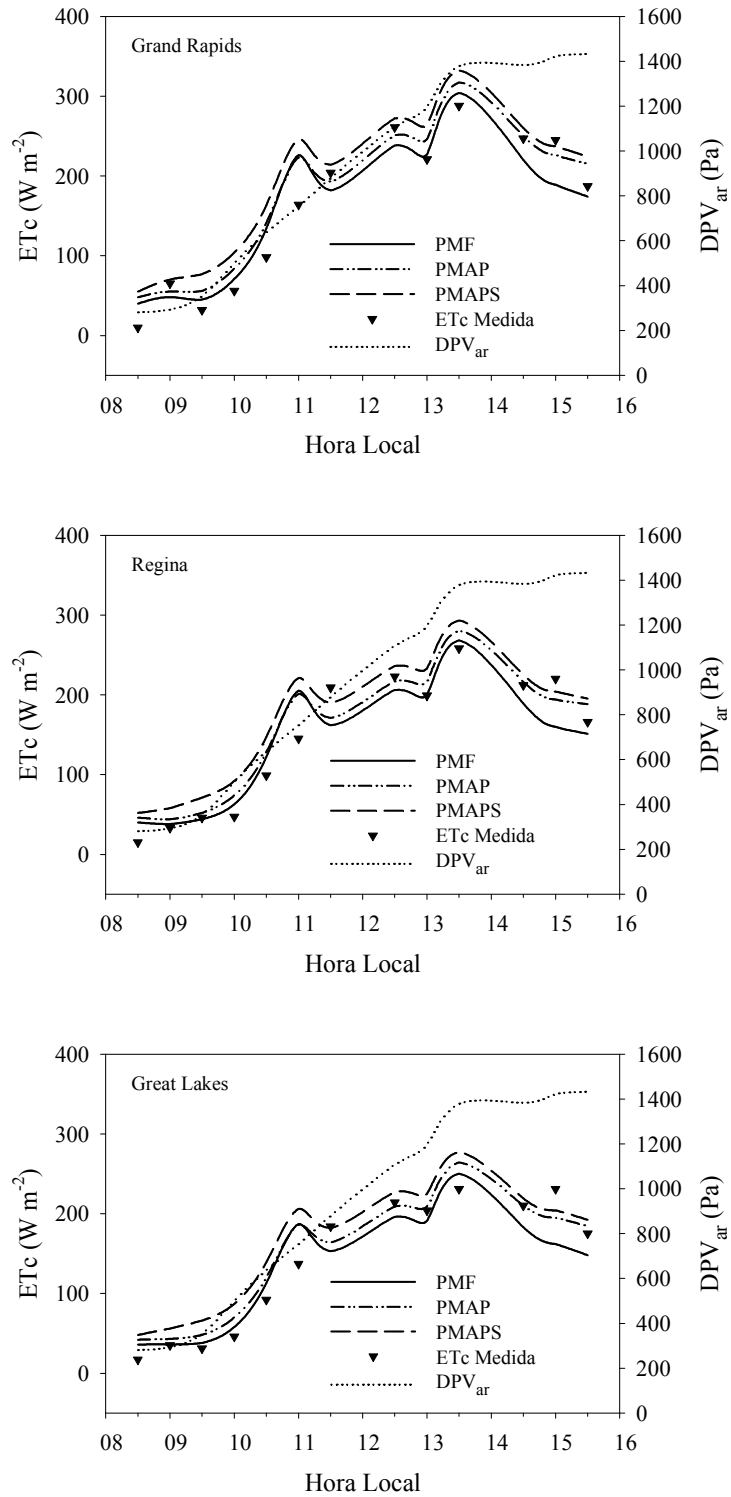


Figura 9 – Valores diurnos medidos e estimados da evapotranspiração (ET_c) de três cultivares de alface hidropônica sob ambiente protegido (eixo esquerdo) e alterações correspondentes do déficit de pressão de saturação de vapor de água no ar (eixo direito). As medições e estimativas de ET_c foram realizadas no 25º dia após o transplante, por meio dos métodos PMF, PMAP e PMAPS.

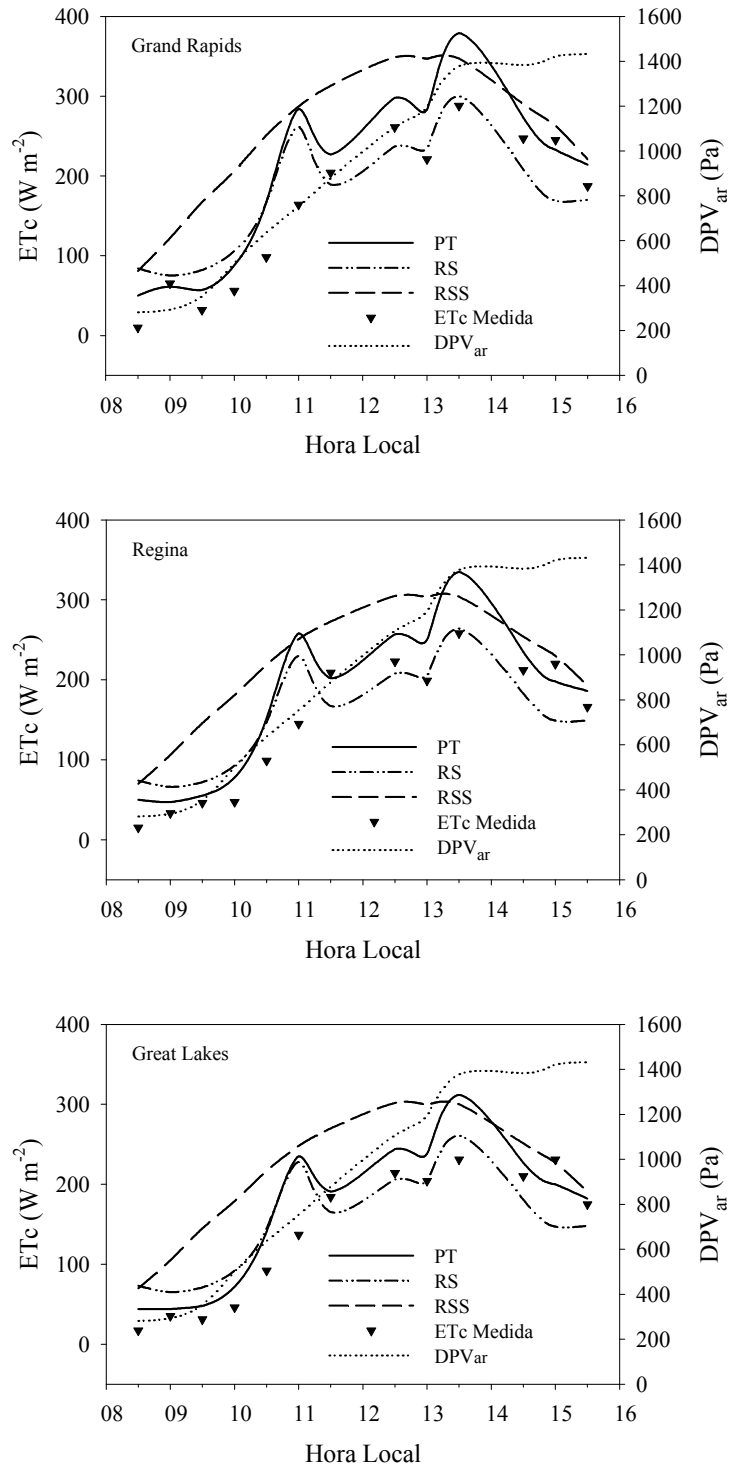


Figura 10 – Valores diurnos medidos e estimados da evapotranspiração (ET_c) de três cultivares de alface hidropônica sob ambiente protegido (eixo esquerdo) e alterações correspondentes do déficit de pressão de saturação de vapor de água no ar (eixo direito). As medições e estimativas de ET_c foram realizadas no 25º dia após o transplante, por meio dos métodos PT, RS e RSS.

4.4. Evapotranspiração da cultura em base diária

Na Tabela 4 encontram-se os valores do erro médio de estimativa (MBE) e da raiz quadrada do quadrado do erro médio de estimativa (RMSE), referentes ao desempenho estatístico dos diferentes métodos utilizados para estimativa diária de evapotranspiração dos cultivares de alface Grand Rapids, Regina e Great Lakes. Os resultados foram organizados com objetivo de mostrar a variação de desempenho dos métodos ao longo do ciclo da cultura.

Com exceção do método RSS, que apresentou erros bem acima dos demais métodos, observa-se que o valor da raiz quadrada do quadrado do erro médio de estimativa (RMSE) foi inferior a $0,10 \text{ kg m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ nas duas primeiras etapas de medição. No entanto, com o crescimento da cultura, o RMSE aumentou a partir desta etapa acompanhando a expansão foliar e, conseqüentemente, a evapotranspiração. No final do período experimental, o RMSE alcançou $0,68 \text{ kg m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ para estimativas realizadas para o cultivar Grand Rapids por meio do método PMAPS. No entanto, o índice RMSE foi bem maior quando o método RSS foi utilizado, chegando até $1,88 \text{ kg d}^{-1} \text{ m}^{-2}$ para o cultivar Grand Rapids. Comportamento semelhante foi constatado para a avaliação do índice MBE que, em termos absolutos, foi inferior a $0,10 \text{ kg m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ no início do ciclo da cultura e alcançou $1,86 \text{ kg d}^{-1} \text{ m}^{-2}$ para o mesmo cultivar na última campanha de medição.

A partir da análise do sinal do índice MBE, constata-se também que, de maneira geral, os métodos PMF, PMAP e RS apresentaram melhor desempenho estatístico em relação aos métodos PMAPS, PT e RSS, independentemente do cultivar avaliado. No entanto, o método PMF, padronizado como sugerido por Allen et al., (1998), subestimou sistematicamente a ET_c dos três cultivares de alface nas duas primeiras campanhas de medição.

Tabela 4 – Desempenho estatístico dos métodos PMF, PMAP, PMAPS, PT, RS e RSS para estimativa da evapotranspiração diária dos cultivares de alface Grand Rapids, Regina e Great Lakes em sistema hidropônico sob ambiente protegido. O período experimental compreendeu 5 etapas de medição, cada uma com duração de três dias, que foram conduzidas após o transplântio

Etapas	Método	Grand Rapids		Regina		Great Lakes	
		RMSE (kg m ⁻² d ⁻¹)	MBE (kg m ⁻² d ⁻¹)	RMSE (kg m ⁻² d ⁻¹)	MBE (kg m ⁻² d ⁻¹)	RMSE (kg m ⁻² d ⁻¹)	MBE (kg m ⁻² d ⁻¹)
1º	PMF	0,07	-0,07	0,08	-0,07	0,09	-0,09
	PMAP	0,02	0,01	0,04	-0,03	0,03	-0,02
	PMAPS	0,05	0,03	0,05	-0,02	0,04	-0,01
	PT	0,02	-0,01	0,03	-0,02	0,05	-0,04
	RS	0,05	0,04	0,07	-0,06	0,02	0,01
	RSS	0,26	0,24	0,11	0,07	0,19	0,18
	2º	PMF	0,07	-0,07	0,05	-0,04	0,09
PMAP		0,02	0,01	0,01	0,01	0,03	-0,01
PMAPS		0,05	0,04	0,02	0,02	0,01	0,01
PT		0,04	-0,03	0,01	-0,01	0,05	-0,05
RS		0,04	0,02	0,04	-0,01	0,04	-0,01
RSS		0,46	0,45	0,27	0,27	0,37	0,36
3º		PMF	0,11	-0,10	0,09	0,07	0,09
	PMAP	0,15	0,13	0,27	0,24	0,14	0,12
	PMAPS	0,25	0,21	0,35	0,32	0,23	0,20
	PT	0,19	0,17	0,36	0,33	0,17	0,16
	RS	0,01	-0,01	0,04	0,03	0,02	0,01
	RSS	0,79	0,77	0,70	0,67	0,71	0,69
	4º	PMF	0,22	0,08	0,11	0,05	0,18
PMAP		0,51	0,44	0,38	0,35	0,20	0,16
PMAPS		0,59	0,54	0,44	0,44	0,27	0,25
PT		0,50	0,46	0,46	0,43	0,23	0,20
RS		0,50	0,38	0,18	0,17	0,15	0,07
RSS		1,75	1,69	1,40	1,37	1,30	1,25
5º		PMF	0,15	0,05	0,14	-0,02	0,14
	PMAP	0,37	0,33	0,27	0,23	0,19	0,16
	PMAPS	0,68	0,65	0,54	0,51	0,46	0,44
	PT	0,67	0,64	0,54	0,50	0,41	0,39
	RS	0,23	0,14	0,19	0,06	0,14	0,08
	RSS	1,88	1,86	1,58	1,57	1,58	1,57

Resultado semelhante foi obtido por FERNANDES et al., (2006), que comparou vários métodos de estimativa da evapotranspiração da cultura do crisântemo cultivado em estufa plástica, em Arthur Nogueira – SP, obtendo melhores estimativas com os métodos da Radiação Solar e de Jensen-Haise, com subestimativas inferiores a 1%, e com r^2 de 0,71 e 0,75 e índice de concordância de Willmott de 0,89 e 0,88, respectivamente. No mesmo trabalho, as estimativas de ET_c pelo método de Penman-Monteith, apesar de apresentarem um coeficiente de determinação de 0,71 e um índice de ajuste de 0,75, foram caracterizadas por subestimativas de até 52%. EVANGELISTA, (1999), comparou 6 métodos de estimativas de evapotranspiração potencial para o interior de casa-de-vegetação e obtendo boas estimativas com o método da Radiação Solar, com valores de coeficiente de correlação de 0,97 e índice de concordância de Willmott de 0,84.

A padronização proposta por McNaughton e Jarvis (1983) possibilitou estimativas diárias mais exatas da evapotranspiração, subestimando ou superestimando a ET_c dentro da faixa de $-0,03$ a $+0,04 \text{ kg d}^{-1} \text{ m}^{-2}$. Entretanto, a simplificação do método PMAP, que assume que a pressão média diária de vapor de água no ar é igual a pressão de saturação ao nascer do sol, tendeu a superestimar discretamente a ET_c a partir da terceira etapa de medição (IAF médio de 1,64). Por outro lado, deve-se ressaltar que esse método não necessita de medições de umidade relativa do ar no ambiente de cultivo e pode ser uma alternativa para implementação de sistemas automáticos de baixo custo para manejo de irrigação em ambientes protegidos.

Os métodos empíricos PT, RS e RSS apresentaram resultados similares ou discrepantes, dependendo da etapa de medição da ET_c . Na fase inicial de crescimento da cultura, o método PT também subestimou ligeiramente a ET_c e a partir desse período tendeu a superestimá-la. Por outro lado, os métodos baseados na radiação solar, de forma geral, tenderam a superestimá-la, especialmente no final do ciclo da cultura. O método RSS, que requer apenas dados de temperatura do ar e adota a simplificação proposta por Hargreaves & Samani (1982) para estimativa da radiação solar global, superestimou a ET_c sistematicamente ao longo do ciclo da cultura. Neste trabalho, os valores dos parâmetros empíricos α , r e k_r , pertinentes aos métodos PT, RS e RSS, foram $1,26 (\pm 0,03)$, $0,73 (\pm 0,03)$ e $0,18 (\pm 0,01)$, respectivamente.

Com o objetivo de complementar os dados apresentados na Tabela 4, as Figuras 11 e 12 foram elaboradas para ilustrar a variação dos valores medidos e estimados da evapotranspiração (ET_c) dos três cultivares de alface no período pós-transplântio, para os métodos de Penman-Monteith (PMF, PMAP e PMAPS) e para os métodos empíricos (PT, RS e RSS), respectivamente. Nas duas figuras observa-se que todos os métodos acompanharam as variações das condições meteorológicas no ambiente de cultivo. No início do ciclo de crescimento, a ET_c da alface foi de aproximadamente $0,2 \text{ kg d}^{-1} \text{ m}^{-2}$ e aumentou aproximadamente 10 vezes até alcançar $2,0 \text{ kg d}^{-1} \text{ m}^{-2}$ no final do ciclo da cultura. As oscilações da ET_c são decorrentes das variações de nebulosidade e presença de duas frentes frias, conforme descrito anteriormente (Figura 4 - D). Nota-se, como ressaltado anteriormente, o afastamento sistemático da linha de ET_c estimada pelo método RSS em relação aos valores medidos de evapotranspiração dos três cultivares de alface avaliados.

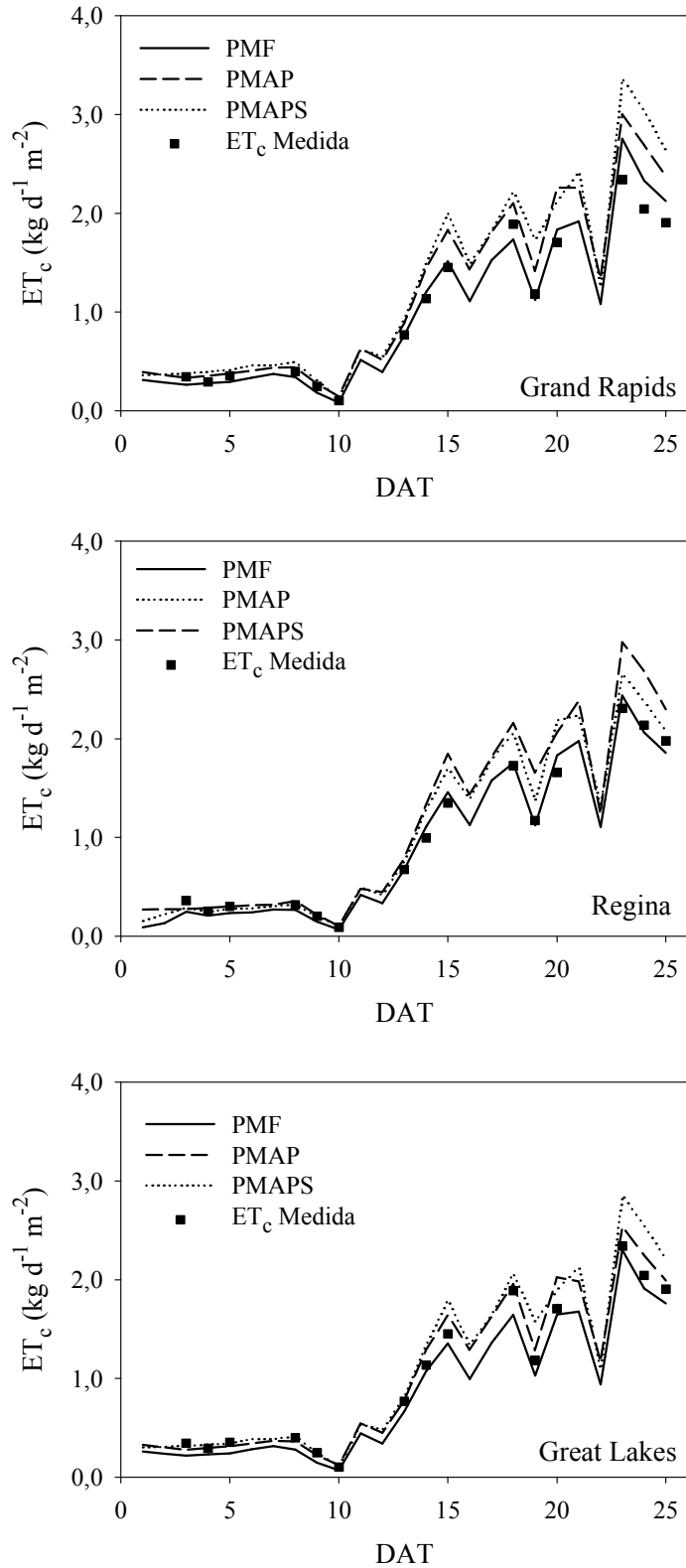


Figura 11 – Valores medidos e estimados da evapotranspiração (ET_c) de três cultivares de alface ao longo do ciclo de crescimento em sistema hidropônico sob ambiente protegido. As estimativas de ET_c foram realizadas por meio dos métodos PMF, PMAP e PMAPS.

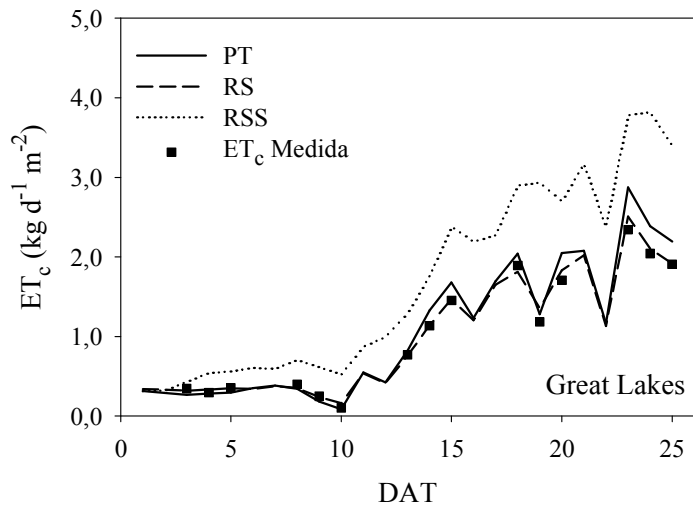
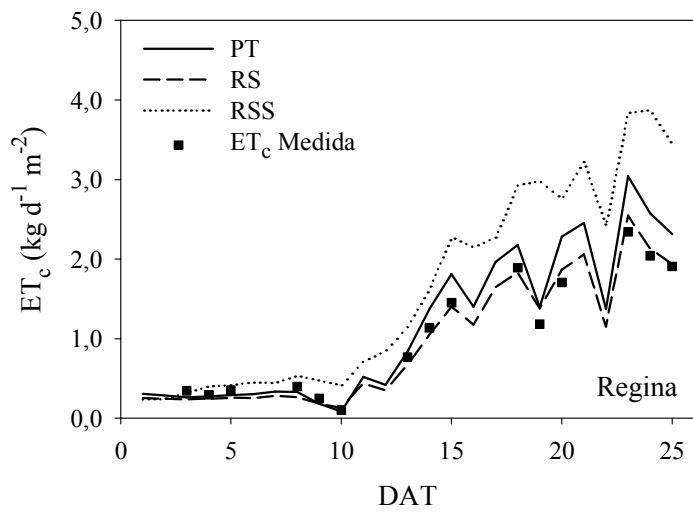
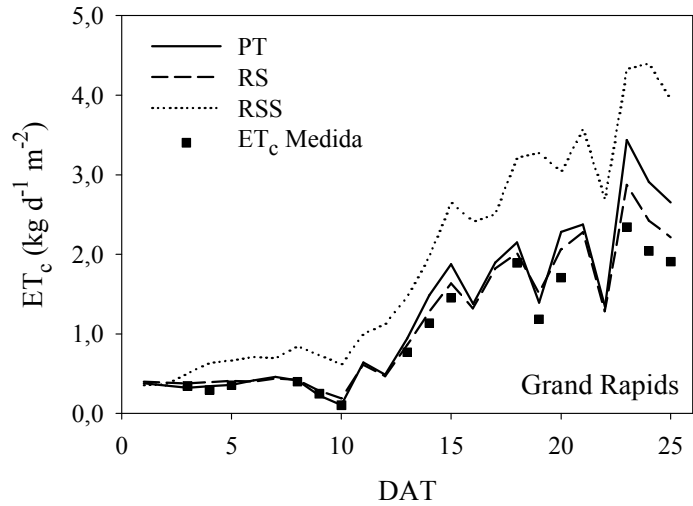


Figura 12 – Valores medidos e estimados da evapotranspiração (ET_c) de três cultivares de alface ao longo do ciclo de crescimento em sistema hidropônico sob ambiente protegido. As estimativas de ET_c foram realizadas por meio dos métodos PT, RS e RSS.

5. CONCLUSÕES

De acordo com os resultados obtidos neste trabalho, pode-se chegar às seguintes conclusões:

- a) O modelo sigmoidal com quatro parâmetros apresentou excelentes ajustes dos valores observados do coeficiente de cultura (K_c) para os cultivares de alface Grand Rapids, Regina e Great Lakes, em cultivos hidropônicos sob ambiente protegido
- b) Em base horária, a utilização do método de Penman-Monteith Ambiente Protegido (PMAP), e Penman-Monteith Ambiente Protegido Simplificado (PMAPS), possibilitam melhores estimativas dos valores de ET_c da alface hidropônica em ambiente protegido, além de dispensar medições de velocidade do ar (PMAP), e velocidade do ar e umidade relativa do ar (PMAPS).
- c) A utilização do método de Penman-Monteith FAO (PMF) é inapropriado para a estimativa dos valores horários de ET_c da alface hidropônica em ambiente protegido.

- d) Os métodos baseados na radiação solar ou temperatura do ar (PT, RS e RSS) não se mostraram adequados para a estimativa dos valores horários de ET_c , principalmente no período da tarde.
- e) Já na base diária, os métodos PMF, PMAP e RS apresentaram melhor desempenho estatístico em relação aos métodos PMAPS, PT e RSS, independentemente do cultivar avaliado.
- f) Embora o método PMAPS tenha superestimado sutilmente a ET_c após o fechamento do dossel vegetativo, este método não necessita de medições de velocidade do ar e de umidade relativa no ambiente de cultivo, constituindo-se em uma alternativa para implementação de sistemas automáticos de baixo custo para manejo de irrigação em ambientes protegidos.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; SMITH, M. **Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements**. Rome: FAO, 1998. 300 p. (FAO – Irrigation and Drainage Paper, 56).

AMAYREH J. & AL-ABED N. Developing crop coefficients for field-grown tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill.) under drip irrigation with black plastic mulch. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v.73, p.247-254, 2005.

ATARASSI, R. T. **Modelagem do microclima em casa-de-vegetação**. 2000. 96f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba, SP, 2000.

BACKES, F. A. A. L.; SANTOS, O. S.; PILAU, F. G.; BONNECARRÈRE. R. A. G.; MEDEIROS, S. L. P.; FAGAN, E. B. Reposição de nutrientes em solução nutritiva para o cultivo hidropônico de alface. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.34, n.5, p. 1407-1414, set./out. 2004.

BARTZANAS T., TCHAMITCHIAN M. & KITTAS C. Influence of the heating method on greenhouse microclimate and energy consumption. **Biosystems Engineering**, v.91, n.4, p.487-499, 2005.

BOULARD T, FATNASSI H, ROY JC, LAGIER J, FARGUES J, SMITS N, ROUGIER M & JEANNEQUIN B Effect of greenhouse ventilation on humidity of inside air and in leaf boundary-layer. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v.125, p.225-239, 2004.

BENINNI, E. R. Y.; TAKAHASHI, H. W.; NEVES, C. S. V. J. Concentração e acúmulo de macronutrientes em alface cultivada em sistemas hidropônico e convencional. **Semina. Ciências Agrárias**, Londrina, v. 26, n. 3, p. 273-282, 2005.

BLISKA JÚNIOR, A.; HONÓRIO, S.L. **Cartilha tecnológica: hidroponia**. Campinas, UNICAMP, 51p,1996.

BRANCO, R. B. F. **Avaliação de cultivares e épocas de cultivo de alface nas condições de solo e hidroponia, em ambiente protegido**. 2001. 80f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista, Jaboticabal, 2001.

BURIOL, G. A.; RIGHI, E. Z.; SCHNEIDER, F. M.; STRECK, N. A.; HELDWEIN, A. B.; ESTEFANEL, V. Modificação da umidade relativa do ar pelo uso e manejo da estufa plástica. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 8, n. 1, p. 11-18, 2000

BURIOL, G. A.; LUZZA, J.; HELDWEIN, A. B.; STRECK, N. A. Evaporação de água em estufas plásticas e sua relação com o ambiente externo: 1 – avaliação com o uso do tanque Classe A e do evaporímetro de Piche. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 9, n. 1, p. 35-41, 2001.

CAMACHO, M. J.; ASSIS, F. N.; MARTINS, S. R.; MENDEZ, M. E. G. Avaliação de elementos meteorológicos em estufa plástica em Pelotas, RS. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 3, p. 19-24, 1995.

CARMASSI G.; INCROSSI L.; MAGGINI R.; MALORGIO F.; TOGNONI F. & PARDOSSI A. An aggregated model for water requirements of greenhouse tomato grown in closed rockwool culture with saline water. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v.88, p.73-82, 2007.

CARON, B. O.; MEDEIROS, S. L. P.; MANFRON, P. A.; SCHIMIDT, D.; POMMER, F.; BIANCHI, C. Influência da temperatura do ar e radiação solar no acúmulo de fitomassa da alface. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 11, n. 2, p. 275-283, 2003

COSTA, C. P. Olericultura brasileira: passado, presente e futuro. **Horticultura Brasileira**, Brasília, v. 18, p. 7-11, jul., 2000.

COSTA, C.P.; SALA, F.C. A evolução da alfacicultura brasileira. **Horticultura Brasileira**, Brasília, DF, v.23, n.1, 2005 (Artigo de capa).

DOORENBOS, J.; PRUITT, W. O. **Guidelines for predicting crop water requirements**. Roma: FAO, 1977. 144 p. Irrigation and Drainage Paper, 24.

EVANGELISTA, A. W. P. **Avaliação de métodos de determinação da evapotranspiração, no interior de casa de vegetação, em Lavras-MG.** 1999, 79f. Dissertação (Mestrado em Irrigação e Drenagem) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG, 1999.

FACCIOLI, G. G. **Determinação da evapotranspiração de referência e da cultura da alface em condições d casa de vegetação, em Viçosa, MG.** 1998. 85f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 1998.

FARIAS, J. R. B.; BERGAMAMASCHI, H.; MARTINS, S. R.; BERLATO, M. A. **Evapotranspiração no interior de estufas plásticas.** Revista Brasileira de Agrometeorologia, Santa Maria, v. 2, p. 17-22, 1994.

FARIAS, J. R. B.; BERGAMAMASCHI, H.; MARTINS, S. R.; BERLATO, M. A.; OLIVEIRA, A. C. B. Alterações na temperatura e umidade relativa do ar provocadas pelo uso de estufa plástica. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 1, n. 1, p. 51-62, 1992.

FELTRIN, A. L.; CECÍLIO FILHO, A. B.; BRANCO, R. B. F.; BARBOSA, J. C.; SALATIEL, L. T. Produção de alface americana em solo e em hidroponia, no inverno e verão, em Jaboticabal, SP. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.9, n.4, p.505-509, 2005

FERNANDES, A. L. T. **Monitoramento da cultura do crisântemo em estufa através do uso de lisímetro e estação agrometeorológica automatizados.** 1996. 96f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba, SP, 2000.

FILGUEIRA, F. A. R. **Novo manual de olericultura: agrotecnologia moderna na produção e comercialização de hortaliças.** Viçosa, MG: UFV, 2000. 402 p.

FOLEGATTI, M. V.; SCATOLINI, M. E.; PAZ, V. P. S.; PEREIRA, A. R.; FRIZZONE, J. A. Efeitos da cobertura plástica sobre elementos meteorológicos e evapotranspiração da cultura de crisântemo em estufa. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, RS, v. 5, n. 2, p. 155-163, 1997.

FRIZZONE, J. A. Otimização do uso da água na agricultura irrigada: perspectivas e desafios. **Engenharia Rural**, Piracicaba, v.5, p.37-56, 2004.

GARCIA M.; RAES D.; ALLEN R.; HERBAS C. Dynamics of reference evapotranspiration in the Bolivian highlands (Altiplano). **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v.125, p.67-82, 2004.

GRANDE, L.; LUZ, J. M. Q.; MELO, B.; LANA, R. M. Q.; CARVALHO, J. O. M. O cultivo protegido de hortaliças em Uberlândia-MG. **Horticultura Brasileira**, Brasília, DF, v. 21, n. 2, p. 241-244, abril/junho, 2003.

GRANGEIRO, L. C.; COSTA, K. R.; MEDEIROS, M. A.; SALVIANO, A. M.; NEGREIROS, M. Z.; BEZERRA NETO, F.; OLIVEIRA, S.L. Acúmulo de nutrientes por três cultivares de alface cultivadas em condições do Semi-Árido. **Horticultura Brasileira**, Brasília, DF, v. 24, n. 2, p. 190-194, 2006.

GUISELINI, C.; SENTELHAS, P. C.; OLIVEIRA, R. C. Uso de malhas de sombreamento em ambiente protegido II: efeito sobre a radiação solar global e a fotossinteticamente ativa. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 12, n. 1, p. 19-26, 2004

HARGREAVES, G. H.; SAMANI, Z. A. Estimating Potential evapotranspiration. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v. 108, p. 225-230, 1982.

HANAN J. J. **Greenhouses – Advanced technology for protected horticulture**. Boca Raton, CRC Press LLC. p.684, 1998.

JAYANTHI H.; NAELE C. M. U. & WRIGHT J. L. Development and validation of canopy reflectance-based crop coefficient for potato. **Agricultural Water Management**, v.88, p.235-246, 2007.

JENSEN, M. E. Consumptive use of water and irrigation water requirements. **Amer. Soc. Civil Eng.**, New York, p. 215, 1973.

JESUS, E. S.; ASSIS, S. V. distribuição espacial da evapotranspiração potencial no Rio Grande do Sul usando o modelo complementar de Morton. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 13, n. 2, p 308-315, 2005.

JONES, J. B., Jr. **Hydroponics – A Practical Guide for the Soilless Grower**. Boca Raton: St. Lucie Press,. 230 p, 1997.

KATERJI N. & RANA G. **Modelling evapotranspiration of six irrigated crops under Mediterranean climate conditions**. *Agricultural and Forest Meteorology* 138:142-155, 2006.

KOPP, L. M.; SHUNEMANN, A. P. P.; BRACCINI NETO, J.; LEMOS, C. A. S.; SIMONETTI, R. B.; SILVA, E. S. B. Avaliação de seis cultivares de alface sob duas soluções nutritivas em sistema de cultivo hidropônico. **Revista da Faculdade de Zootecnia, Veterinária e Agronomia**. Uruguaiana, v.7/8, n.1, p. 19-25, 2001

LÓPEZ-GALVEZ, J.; PEIL, R.M.N. La modernidad del sistema de producción hortícola en el sudeste español. **Plasticulture**, Almeria. v.119, n.44-8, 2000.

LUZ, J. M. Q.; GUIMARÃES, S. T. M. R.; KORNDÖRFER, G. H. Produção hidropônica de alface em solução nutritiva com e sem silício. **Horticultura Brasileira**, Brasília, v. 24, n. 3, p. 295-300, 2006.

LYRA, G. B. **Estimativa da evapotranspiração e análise de crescimento para alface (*Lactuca sativa* L.) cultivada em sistema hidropônico em condições de casa-de-vegetação**. 2002. 91f. Dissertação (Mestrado em Meteorologia Agrícola). Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2001

LYRA, G. B.; ZONIER, S.; SEDIYAMA, G. C.; COSTA, L. C.; SEDIYAMA, M. A. N. Resistência de superfície ao transporte de vapor d'água e estimativa de evapotranspiração para alface (*Lactuca sativa* L.) cultivada em sistema hidropônico sob condições de casa-de-vegetação. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 23, n. 2, p. 201-210, 2003.

MAGGI, M. F., KLAR, A. E., JADOSKI, C. J., ANDRADE, A. R. S. Produção de variedades de alface sob diferentes potenciais de água no solo em ambiente protegido. **Irriga**, Botucatu, v. 11, n. 3, p. 415-427, 2006.

MARTINEZ, H. E. P. **Manual Prático de Hidroponia**. 1. Ed. Viçosa, MG: Aprenda Fácil, 2006, 271 p.

MARTINS, S. R.; GONZALES, J. F. Evapotranspiração e respostas fisiológicas do feijão-vagem cultivado em substrato em estufa com sistema de ventilação/calefação. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 3, p. 31-37, 1995.

MATTOS, K. M. C. **Efeito da temperatura do ar das canaletas e da estufa sobre o crescimento de alface (*Lactuca sativa* L.) em sistema hidropônico em função do material de cobertura da bancada**. 2000. 66f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba, SP, 2000.

McNAUGHTON, K. G.; & JARVIS, P. G. **Predicting effects of vegetation changes on transpiration and evaporation**. In: Kozlowski TT (ed.), Water deficits and plant growth, vol. VII. New York, Academic Press, p.1-47, 1983.

MEDEIROS, G. A.; ARRUDA, F. B.; SAKAI, E.; FUJIWARA, M.; BONI, N. R. Crescimento vegetativo e coeficiente de cultura do feijoeiro relacionados a graus-da acumulados. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**. v.35, n.9, p.1733-1742, 2000.

MOLINA-AIZ, F. D.; VALERA, D. L. & ÁLVAREZ, A. J. Measurement and simulation of climate inside Almería-type greenhouses using computational fluid dynamics. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v.125, p.33-51, 2004.

MONTEITH, J.L. Evaporation and environment. **Symposium of the Society for Experimental Biology**, London, v. 19, p. 205-234, 1965.

MONTEZANO, E.M.; PEIL, R.M.; FERREIRA, A.A.F.; FERNANDES, H.S. Concentração salina da solução nutritiva para a cultura da alface em hidroponia NFT. Parte I : consumo hídrico e eficiência no uso da água. **Horticultura Brasileira**, Brasília, v.20, n.2, supl. 2, 2002.

MOREIRA, H. M. **Desempenho de métodos de manejo de irrigação para a cultura de tomateiro cultivado em campo e em casa de vegetação**. 2002. 97f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2002.

NELSON, P. V. **Greenhouse operation and management**. 4^a ed. New Jersey: Prentice Hall, 1991. 612 p.

OHSE, S.; DOURADO-NETO, D.; MANFRON, P.A.; SANTOS, O. S. Qualidade de cultivares de alface produzidos em hidroponia. **Scientia Agrícola**, Piracicaba, v.58, n.1, p.181-185, 2001.

OLIVEIRA, A.C.B.; SEDIYAMA, M.A.N.; PEDROSA, M.W.; GARCIA, N.C.P.; GARCIA, S.L.R. Divergência genética e descarte de variáveis em alface cultivada sob sistema hidropônico. **Acta Scientiarum**, Maringá, v.26, n.2, p.211-217, 2004.

OLIVEIRA, A. S. de, MARTIN, E. C.; SLACK, D. C.; PEGELOW, E. J. & FOLTA A. D. Water use and crop coefficient of subsurface drip-irrigated lettuce in Central Arizona. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.9, n.1, p.37-44, 2005.

OLIVEIRA, M. R. V. O emprego de casas de vegetação no Brasil: Vantagens e desvantagens. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 30, n. 8, p. 1049-1060, 1995.

ORGAZ, F.; FERNÁNDEZ, M. D.; BONACHELA, S.; GALLARDO, M. & FERERES, E. Evapotranspiration of horticultural crops in an unheated plastic greenhouse. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v.72, p.81-96, 2005.

PEIL, R.M.N.; LÓPEZ-GALVEZ, J.; MARTÍN, A. Cultivo de pepino com técnica de solución nutritiva recirculante. In : CONGRESSO IBÉRICO SOBRE GESTIÓN Y PLANIFICACIÓN DE ÁGUAS, 208, 1998, Zaragoza. **Actas...** p.9. CD-ROM.

PEIL, R. M. N.; LÓPEZ-GALVEZ, J.; QUESADA, G. V. Nuevas técnicas de producción em invernadero: cultivo de la judia verde em sistema NFT. In: FITECH, JORNADAS SOBRE PLASTICULTURA / CEPLA / IBERFLORA, 5., 1999, Valencia. **Anales...** p. 1999, 1-13.

PENMAN, H. L. Natural evaporation from open water, bare soil and grass. **Proceeding the Royal Society of London**, Serie A, v. 193, p. 120-146, 1948.

PEREIRA, A. R.; GREEN, S. e VILLA NOVA, N. A. Penman-Monteith reference evapotranspiration adapted to estimate irrigated tree transpiration. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v.83, p.153-161, 2006.

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

PEZZOPANE, J. E. M.; PEDRO JR, M. J.; ORTOLANI, A. A. Modificações microclimáticas provocadas por estufas com cobertura plástica. **Bragantia**, Campinas, v. 54, p. 419-425, 1995.

PILAU, F. G.; MEDEIROS, S. L. P.; MANFRON, P. A.; BIANCHI, C.; CARON, B. O.; BONNECARRÈRE, R. Influência do intervalo entre irrigações na produção e nas variáveis fisiológicas da alface hidropônica. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 10, n. 2, p. 237-244, 2002

RADIN, B.; REISSER JÚNIOR, C.; MATZENAUER, R.; BERGAMASCHI, H. Crescimento de cultivares de alface conduzidas em estufa e a campo. **Horticultura Brasileira**, Brasília, v.22, n.2, p.178-181, abril-junho 2004.

SANCHEZ, S. V. **Avaliação de cultivares de alface crespa produzidas em hidroponia do tipo NFT em dois ambientes protegidos em Ribeirão Preto (SP)**. 2007. 63f. Dissertação (Mestrado Agronomia) – Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Jaboticabal, SP, 2007.

SCAIFE, A.; COX, E. F.; MORRIS, G. E. L. The relationship between shoot weight, plant density and time during the propagation of four vegetable species. **Annals of Botany**. V. 59, p. 325-334, 1987.

SGANZERLA, E. **Nova Agricultura: a fascinante arte de cultivar com plásticos**. 5. ed. Ver. E atual. Guaíba: Agropecuária, 1995. 342 p.

SILVA, J. O., SOUZA, P. A., JÚNIOR, J. G., PEREIRA, P. R. G., ROCHA, F. A. Crescimento e composição mineral da alface no sistema hidropônico por capilaridade. **Irriga**, Botucatu, v. 10, n. 2, p. 146-154, 2005.

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

SOUSA, C. S.; BONETTI, A. M.; FILHO, L. R. G.; MACHADO, J. R. A.; LONDE, L. N.; BAFFI, M. A.; RAMOS, R. G.; VIEIRA, C. U.; KERR, W. E. Divergência genética entre genótipos de alface por meio de marcadores AFLP. **Bragantia**, Campinas, v.66, n.1, p.11-16, 2007

STEIDLE NETO, A. J. **Sistema computadorizado para o preparo e aplicação de soluções nutritivas com base na estimativa da transpiração do tomateiro cultivado em casa de vegetação**. 2007.159f. Tese (Doutorado

em Meteorologia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2007.

STRECK, L.; SCHNEIDER, F. M.; BURIOL, G. A.; LUZZA, J.; SANDRI, M. A. Sistema de produção de alface em ambiente parcialmente modificado por túneis baixos. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 37, n. 3, p. 667-675, 2007.

TEIXEIRA, L. D. D.; ZOTTARELLI, C.L.A.P.; KIMATI, H. Efeito da temperatura no crescimento micelial e patogenicidade de *Phyton* spp. Que ocorrem em alface hidropônica. **Summa Phytopathologica**, Botucatu, v. 32, n.3, p.221-226, 2006.

VILLELA JUNIOR, L. V. E.; ARAÚJO, J. A. C.; FACTOR, T. L. Estudo da utilização do efluente biodigestor no cultivo hidropônico do meloeiro. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 7, n. 1, p.72-79, 2003.

WANG, S.; BOULARD, T. & HAXAIRE, R. Air speed profiles in a naturally ventilated greenhouse with a tomato crop. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v.96, p.181-188, 1999.

WILLMOTT, C. J.; ACKLESON, S. G.; DAVIS, R. E.; FEDDEMA, J. J.; KLINK, K. M.; LEGATES, D. R.; O'DONNELL, J.; ROWE, C. M. Statistics for the evaluation and comparison of models. **Journal of Geophysical Research-Oceans**, Ottawa, v. 90, p. 8995-9005, 1985.

ZOLNIER, S.; LYRA, G. B.; GATES, R. S. Evapotranspiration estimates for greenhouse lettuce using an intermittent nutrient film technique. **Transactions of the ASAE**, v. 47, n. 1, p. 271-282, 2004.

APÊNDICE

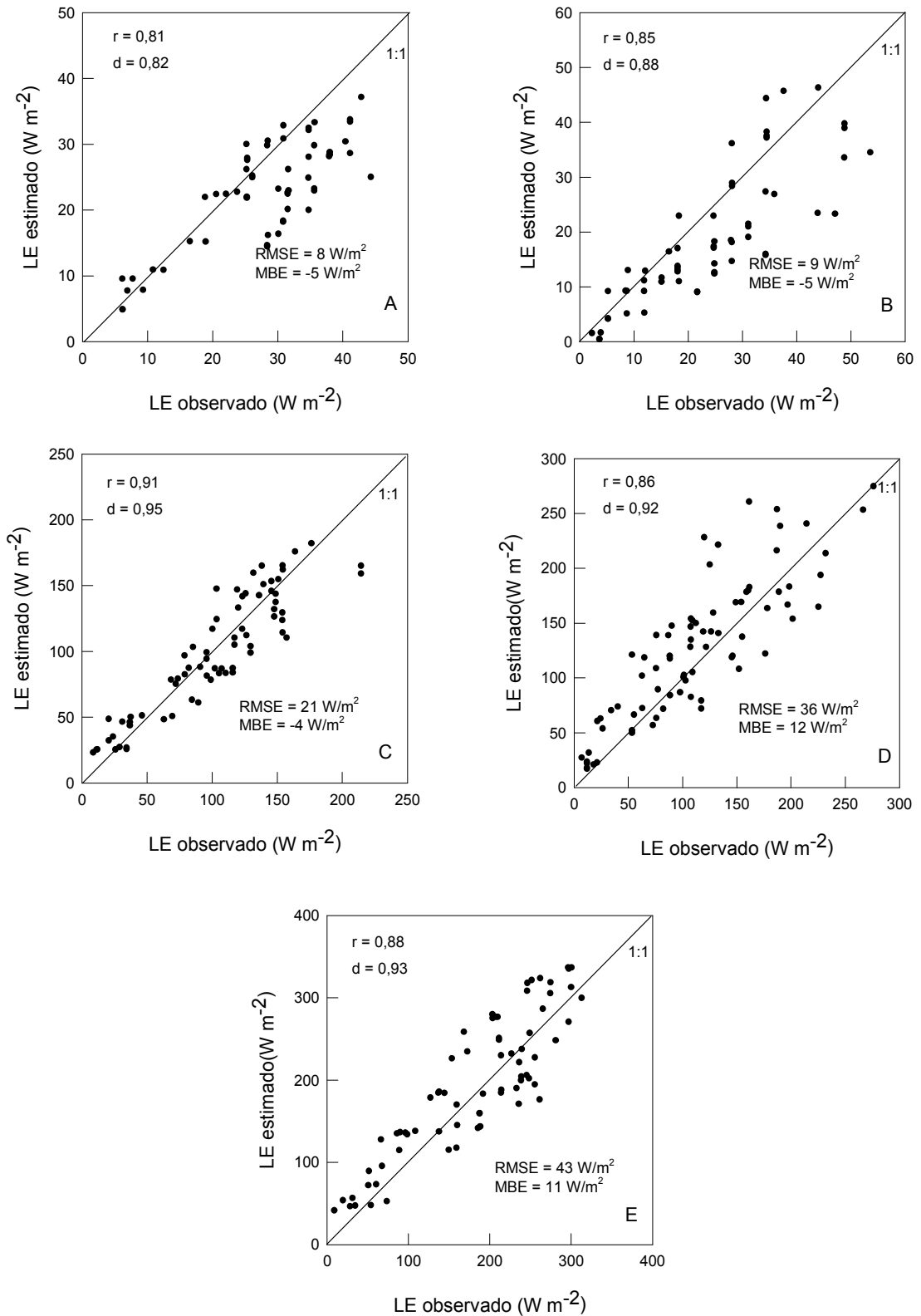


FIGURA 1A – Fluxo de calor latente observado e estimado pelo modelo de Penman-Monteith FAO (PMF) no interior da casa de vegetação para o cultivar Grand Rapids. As Figuras A, B, C, D e E correspondem à 1ª, 2ª, 3ª, 4ª e 5ª etapa, respectivamente.

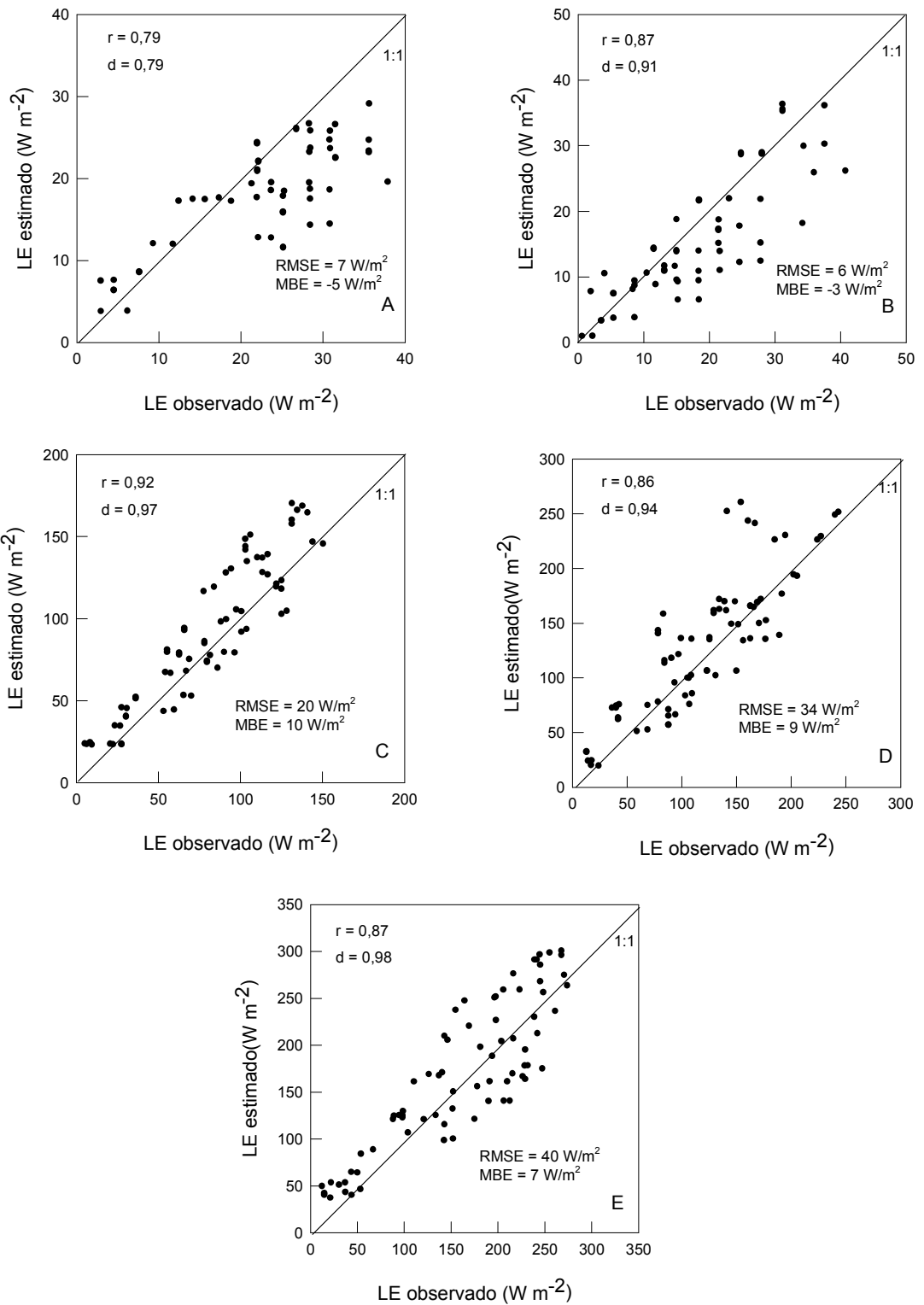


FIGURA 2A – Fluxo de calor latente observado e estimado pelo modelo de Penman-Monteith FAO (PMF) no interior da casa de vegetação para o cultivar Regina. As Figuras A, B, C, D e E correspondem à 1ª, 2ª, 3ª, 4ª e 5ª etapa, respectivamente.

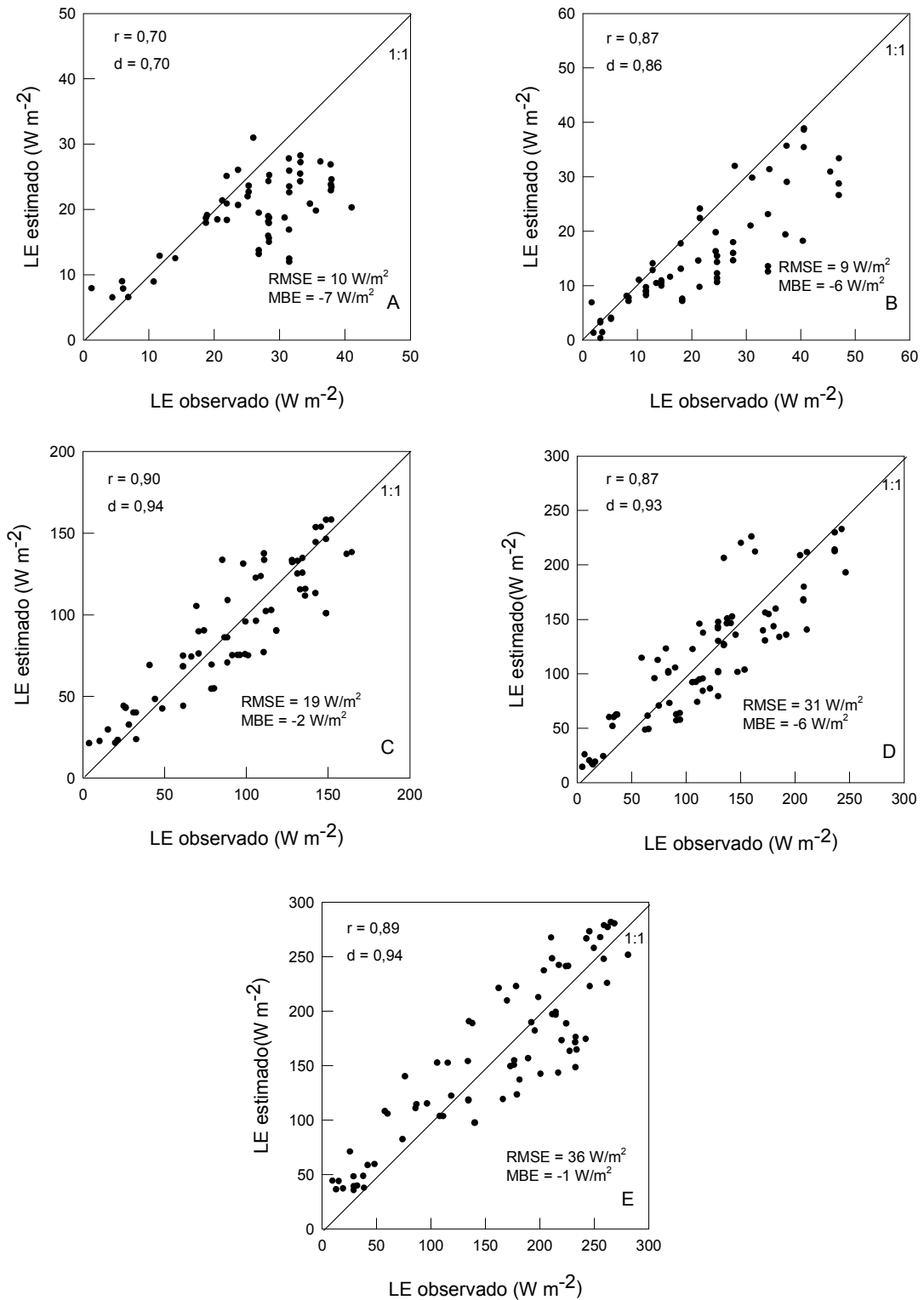


FIGURA 3A – Fluxo de calor latente observado e estimado pelo modelo de Penman-Monteith FAO (PMF) no interior da casa de vegetação para o cultivar Great Lakes. As Figuras A, B, C, D e E correspondem à 1ª, 2ª, 3ª, 4ª e 5ª etapa, respectivamente.

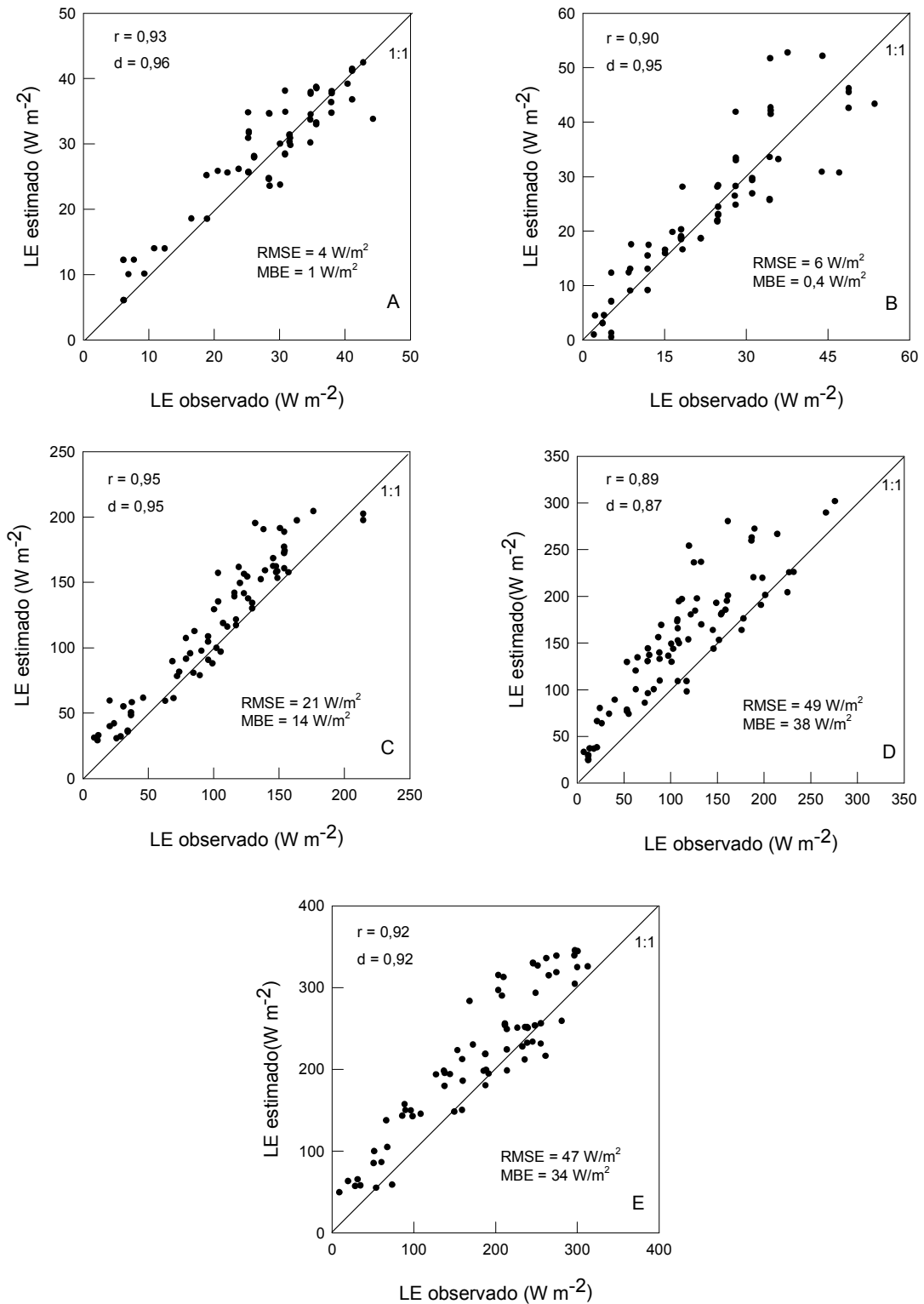


FIGURA 4A – Fluxo de calor latente observado e estimado pelo modelo de Penman-Monteith modificado para ambiente protegido (PMAP) no interior da casa de vegetação para o cultivar Grand Rapids. As Figuras A, B, C, D e E correspondem à 1ª, 2ª, 3ª, 4ª e 5ª etapa, respectivamente.

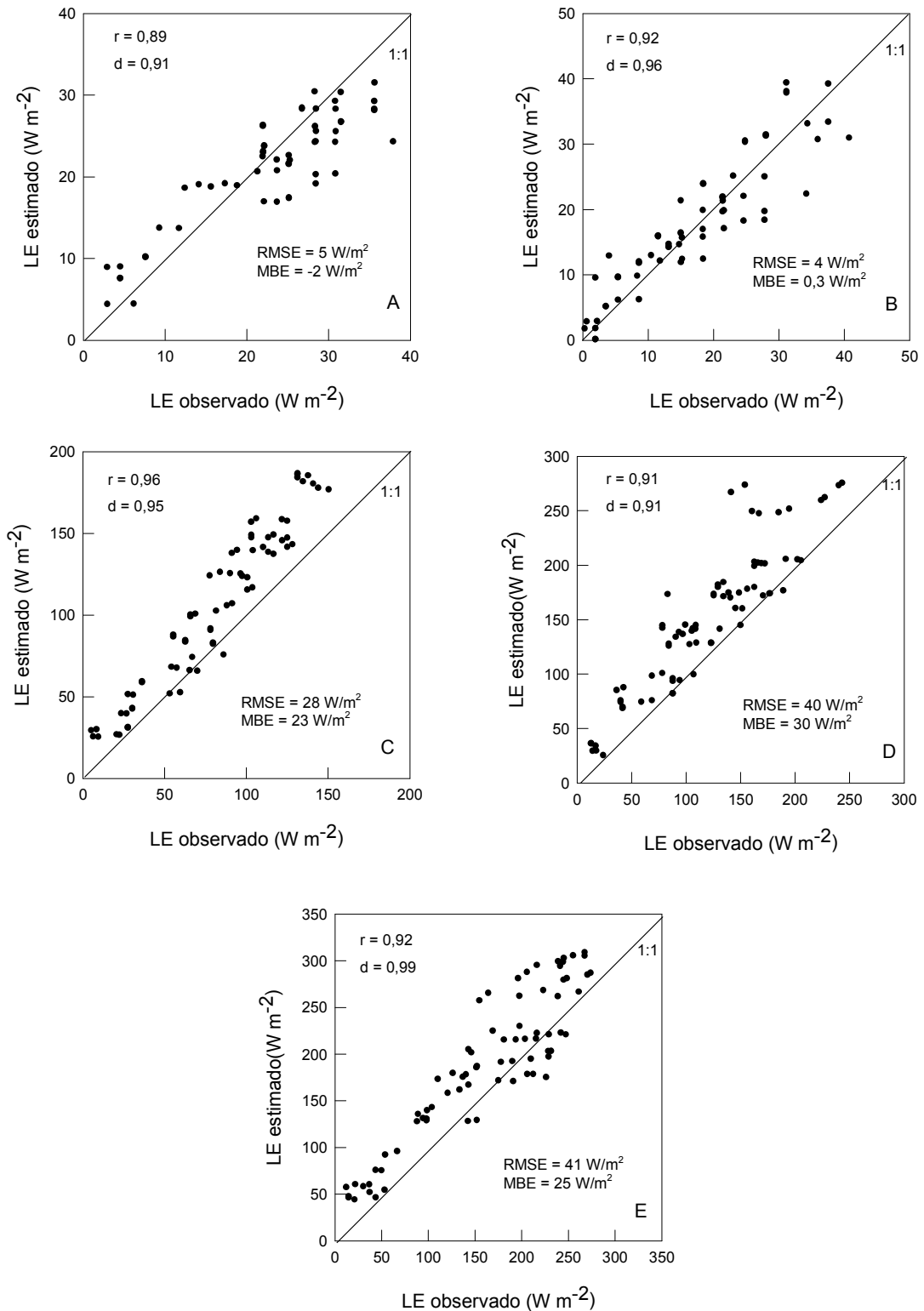


FIGURA 5A – Fluxo de calor latente observado e estimado pelo modelo de Penman-Monteith modificado para ambiente protegido (PMAP) no interior da casa de vegetação para o cultivar Regina. As Figuras A, B, C, D e E correspondem à 1^a, 2^a, 3^a, 4^a e 5^a etapa, respectivamente.

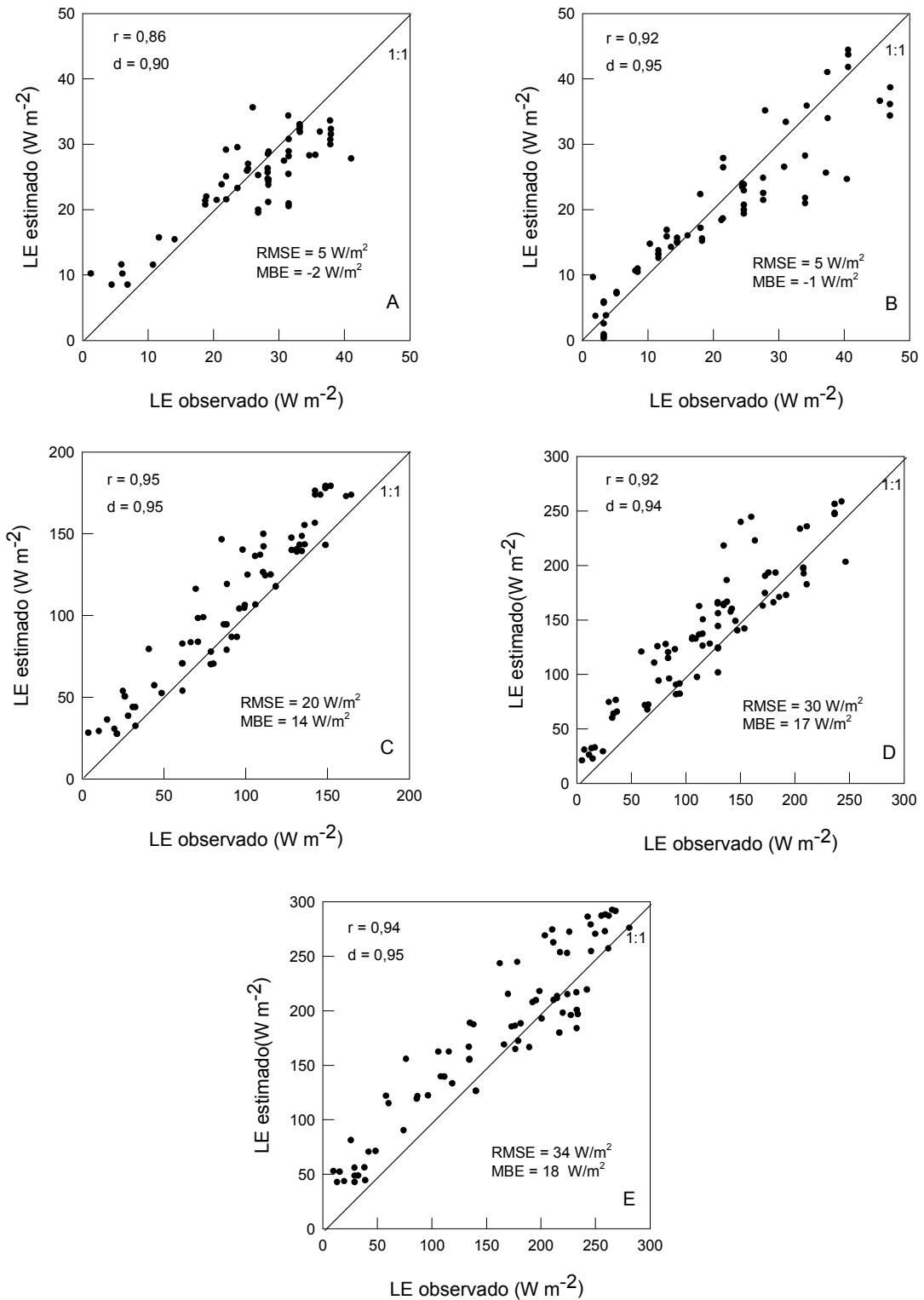


FIGURA 6A – Fluxo de calor latente observado e estimado pelo modelo de Penman-Monteith modificado para ambiente protegido (PMAP) no interior da casa de vegetação para o cultivar Great Lakes. As Figuras A, B, C, D e E correspondem à 1^a, 2^a, 3^a, 4^a e 5^a etapa, respectivamente.

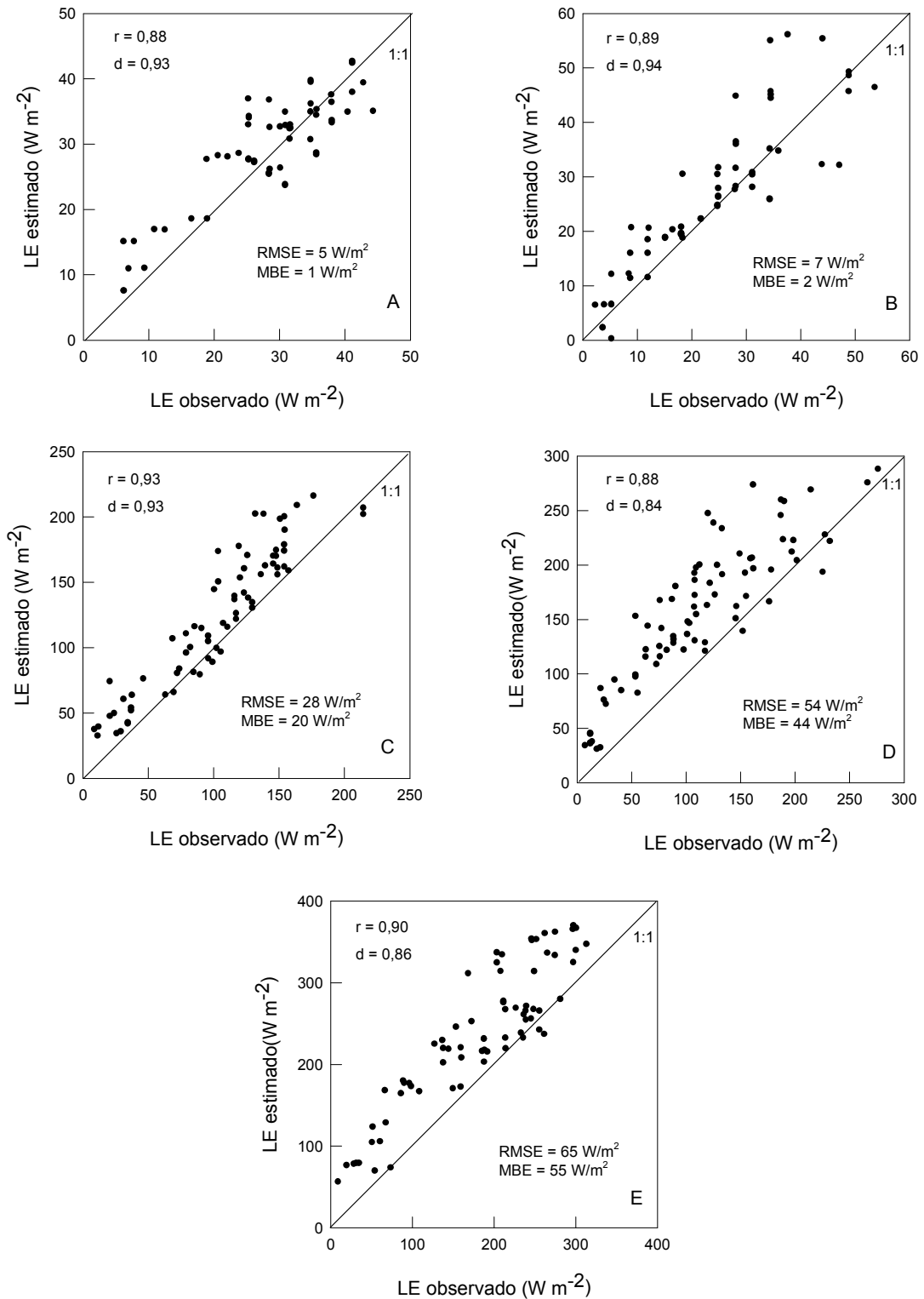


FIGURA 7A – Fluxo de calor latente observado e estimado pelo modelo de Penman-Monteith modificado para ambiente protegido simplificado (PMAPS) no interior da casa de vegetação para o cultivar Grand Rapids. As Figuras A, B, C, D e E correspondem à 1ª, 2ª, 3ª, 4ª e 5ª etapa, respectivamente.

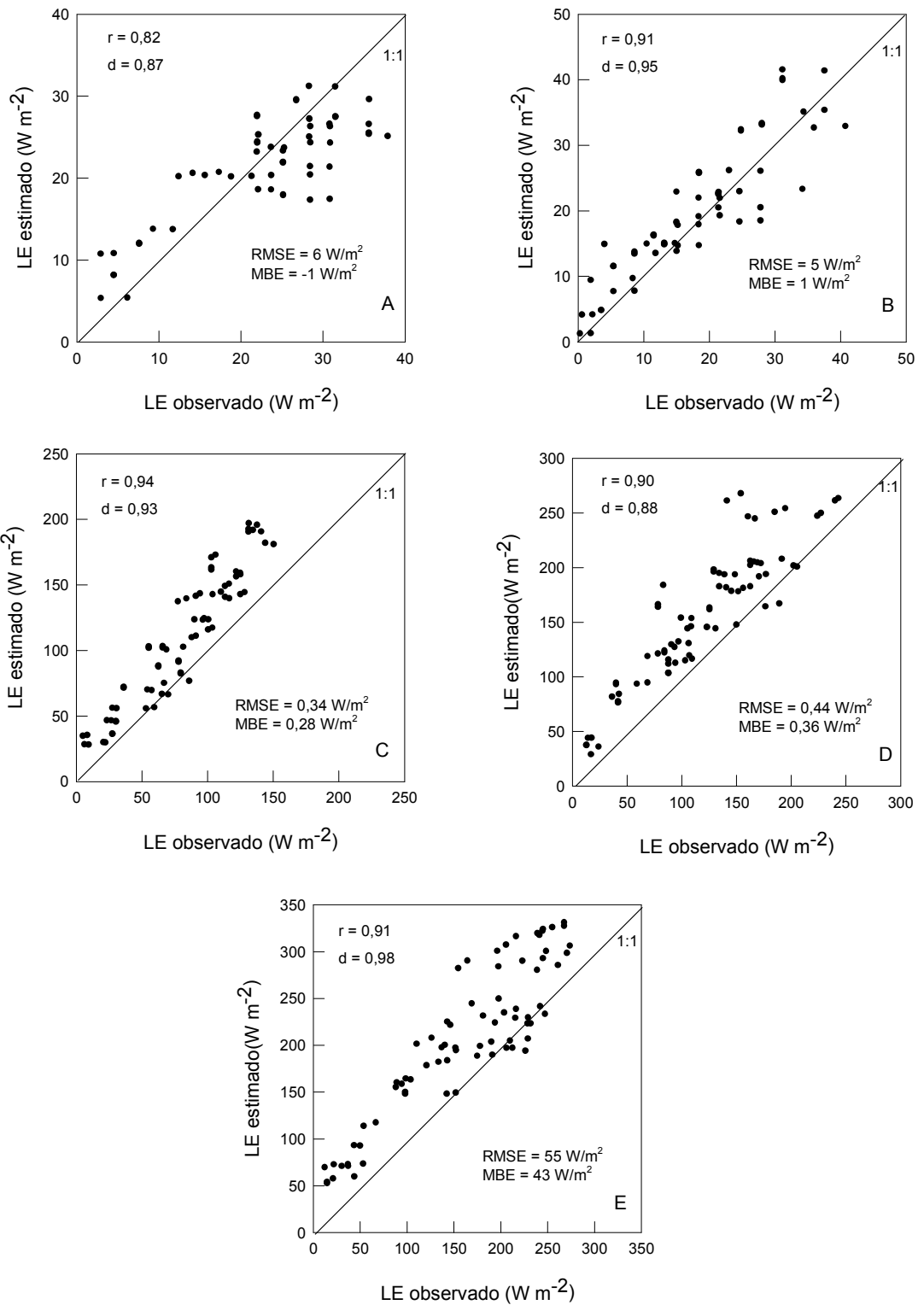


FIGURA 8A – Fluxo de calor latente observado e estimado pelo modelo de Penman-Monteith modificado para ambiente protegido simplificado (PMAPS) no interior da casa de vegetação para o cultivar Regina. As Figuras A, B, C, D e E correspondem à 1^a, 2^a, 3^a, 4^a e 5^a etapa, respectivamente.

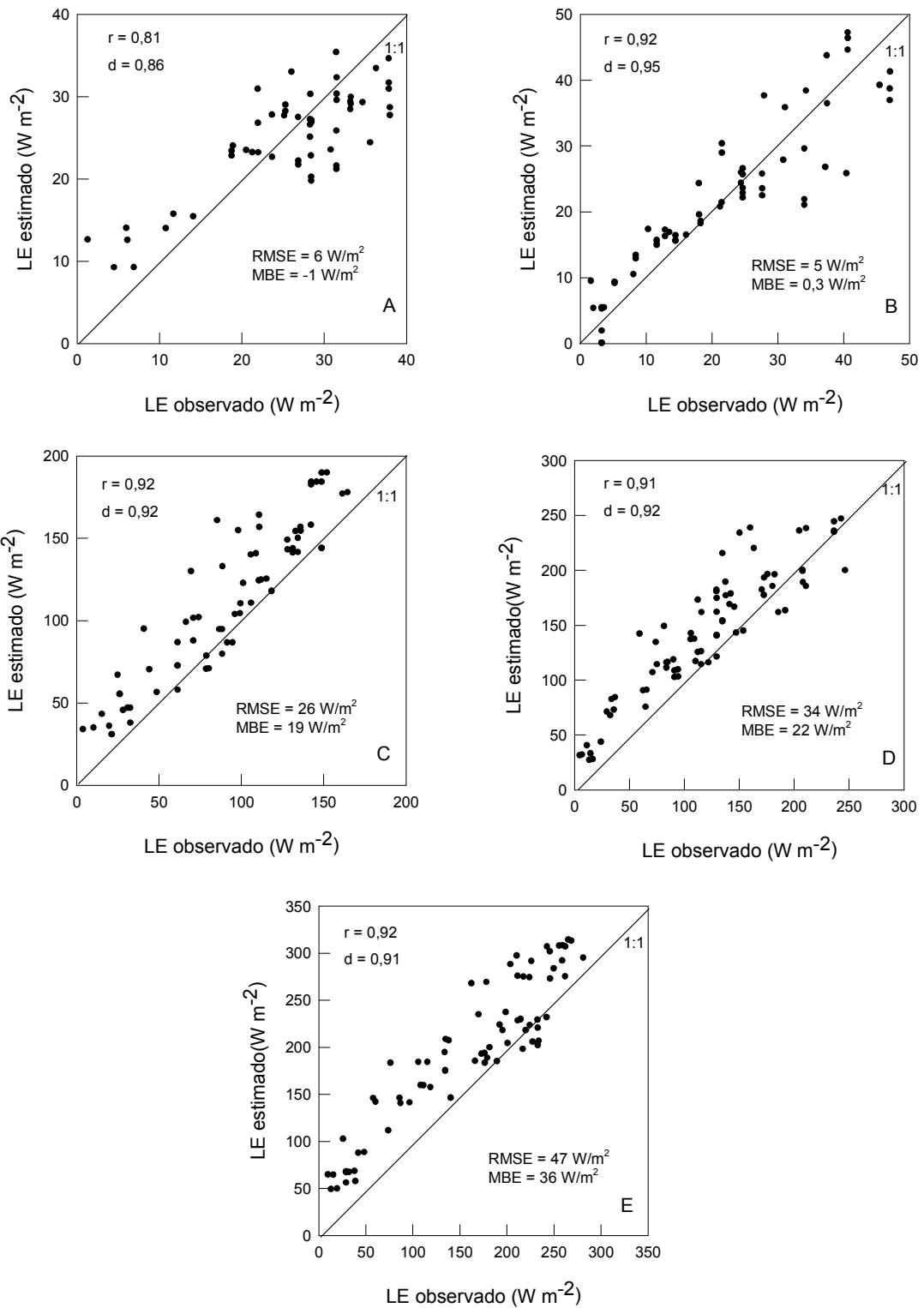


FIGURA 9A – Fluxo de calor latente observado e estimado pelo modelo de Penman-Monteith modificado para ambiente protegido simplificado (PMAPS) no interior da casa de vegetação para o cultivar Great Lakes. As Figuras A, B, C, D e E correspondem à 1ª, 2ª, 3ª, 4ª e 5ª etapa, respectivamente.

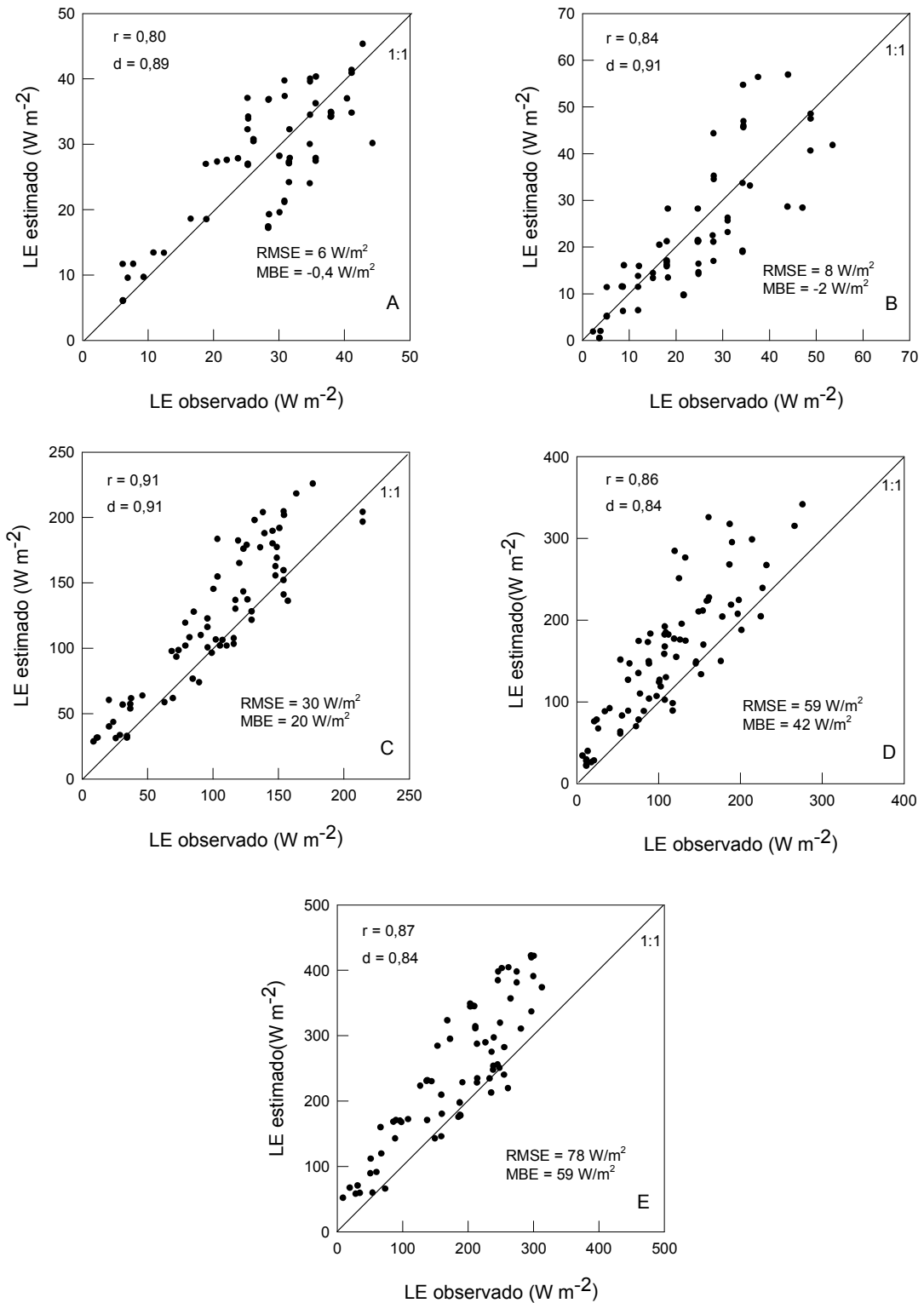


FIGURA 10A – Fluxo de calor latente observado e estimado pelo modelo de Priestley-Taylor (PT) no interior da casa de vegetação para o cultivar Grand Rapids. As Figuras A, B, C, D e E correspondem à 1ª, 2ª, 3ª, 4ª e 5ª etapa, respectivamente.

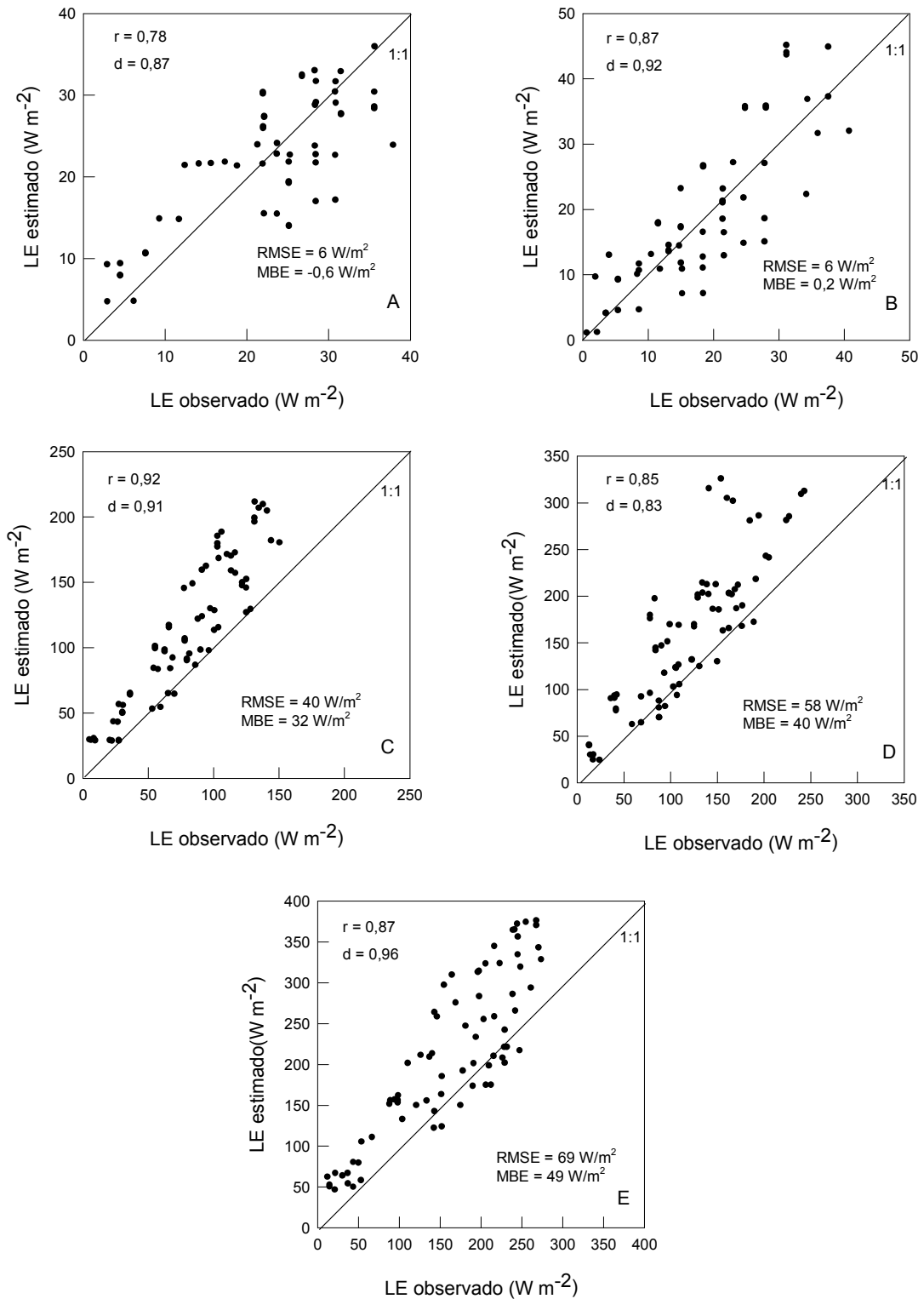


FIGURA 11A – Fluxo de calor latente observado e estimado pelo modelo de Priestley-Taylor (PT) no interior da casa de vegetação para o cultivar Regina. As Figuras A, B, C, D e E correspondem à 1ª, 2ª, 3ª, 4ª e 5ª etapa, respectivamente.

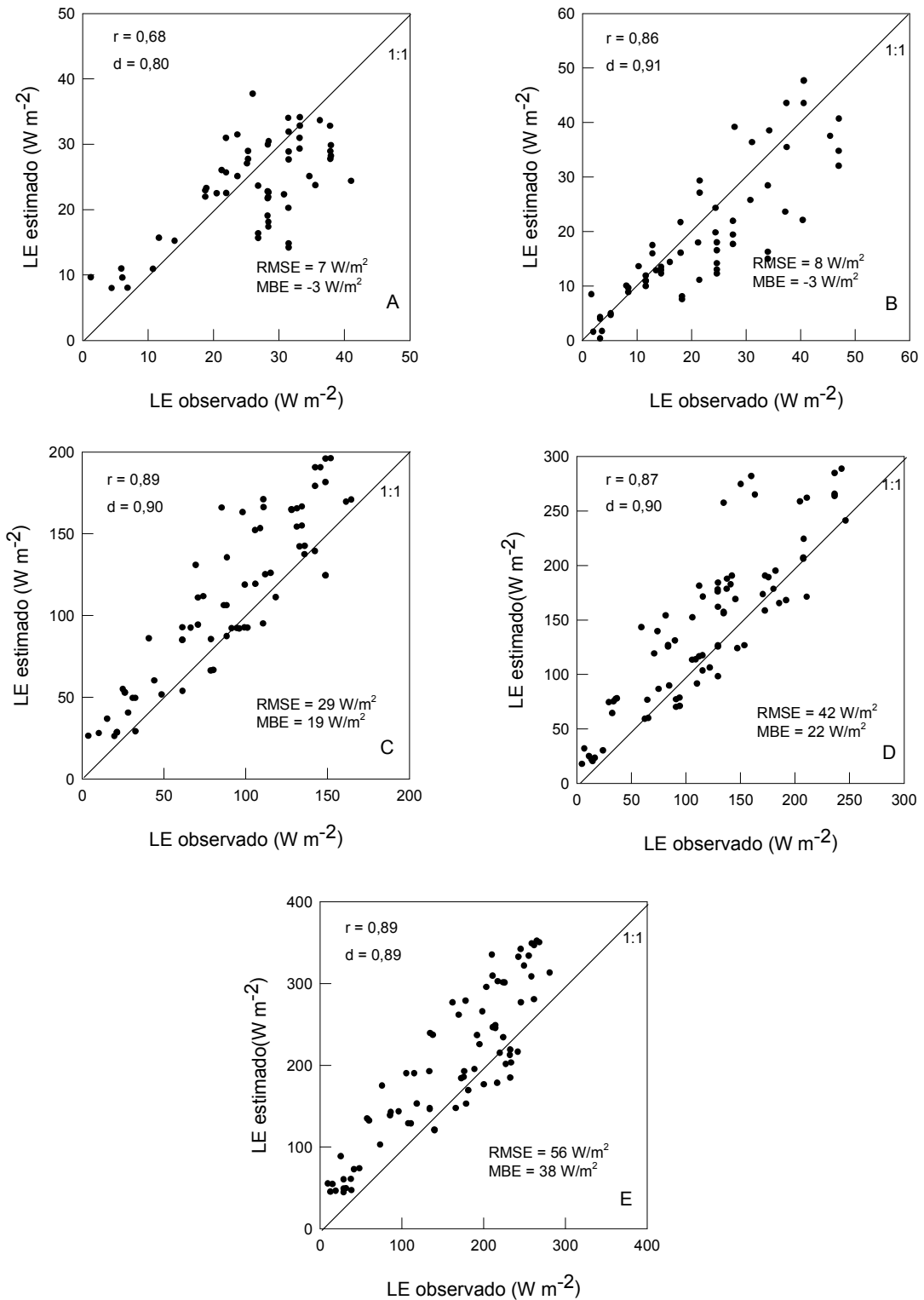


FIGURA 12A – Fluxo de calor latente observado e estimado pelo modelo de Priestley-Taylor (PT) no interior da casa de vegetação para o cultivar Great Lakes. As Figuras A, B, C, D e E correspondem à 1^a, 2^a, 3^a, 4^a e 5^a etapa, respectivamente.

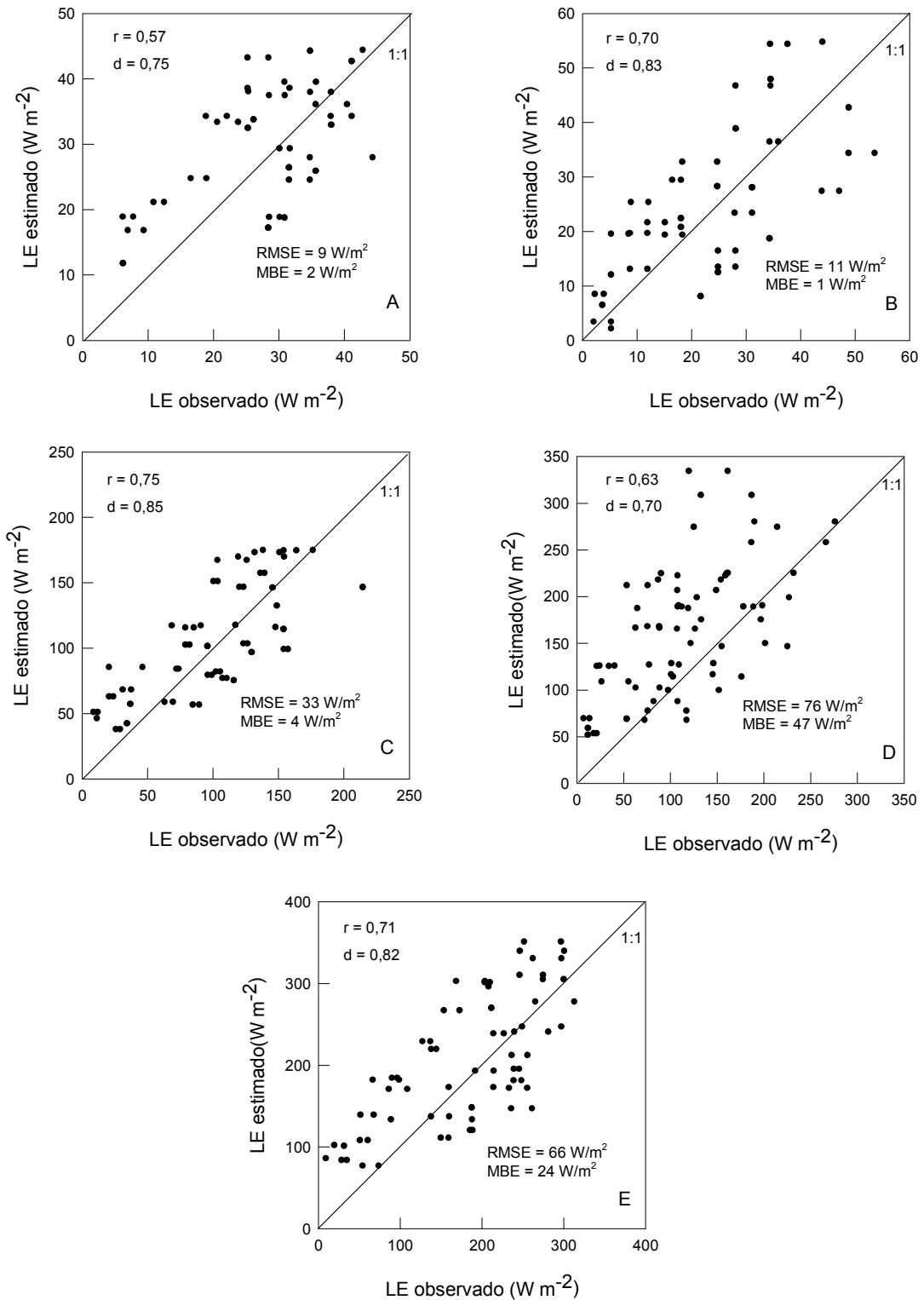


FIGURA 13A – Fluxo de calor latente observado e estimado pelo modelo da Radiação Solar (RS) no interior da casa de vegetação para o cultivar Grand Rapids. As Figuras A, B, C, D e E correspondem à 1ª, 2ª, 3ª, 4ª e 5ª etapa, respectivamente.

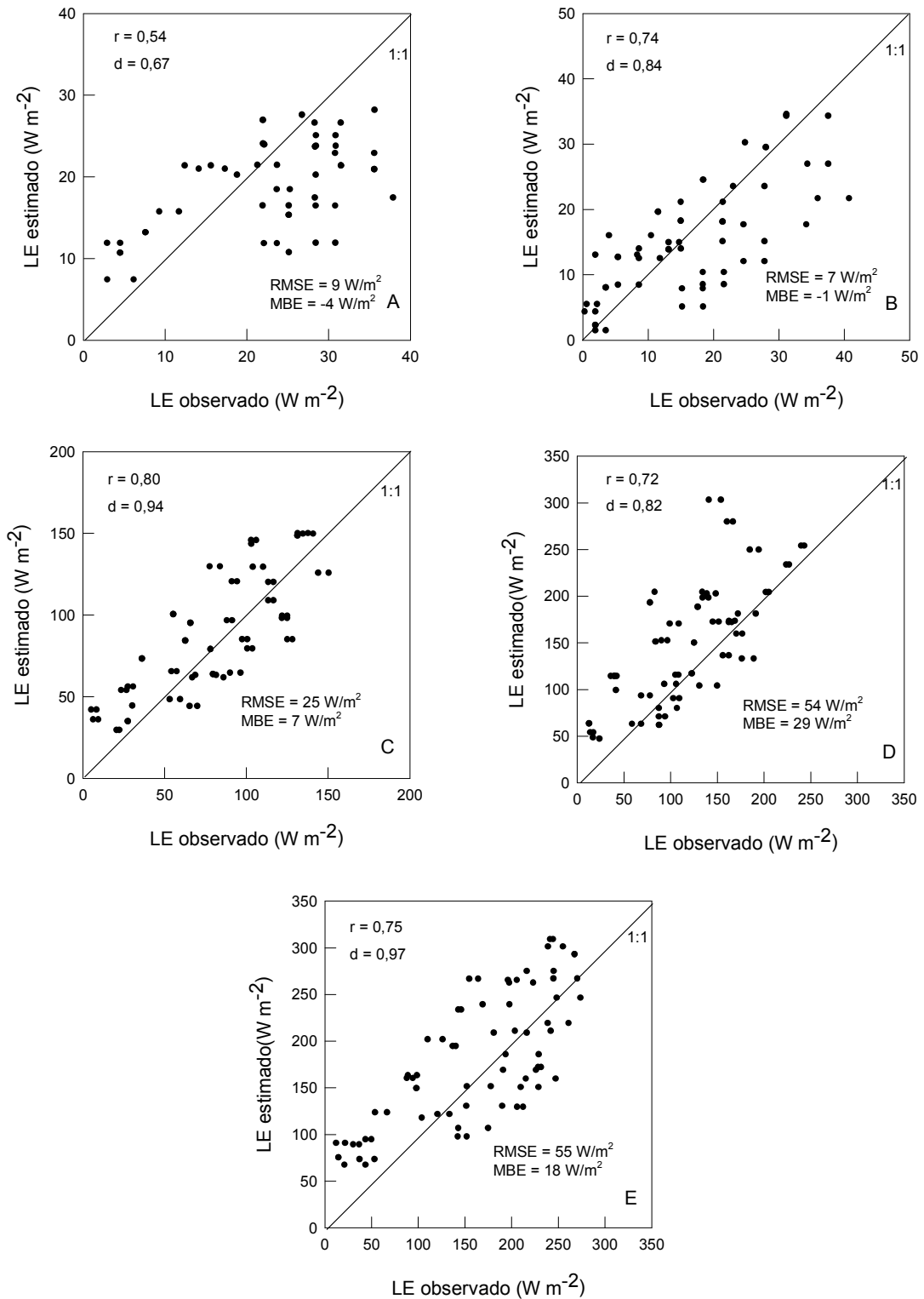


FIGURA 14A – Fluxo de calor latente observado e estimado pelo modelo da Radiação Solar (RS) no interior da casa de vegetação para o cultivar Regina. As Figuras A, B, C, D e E correspondem à 1ª, 2ª, 3ª, 4ª e 5ª etapa, respectivamente.

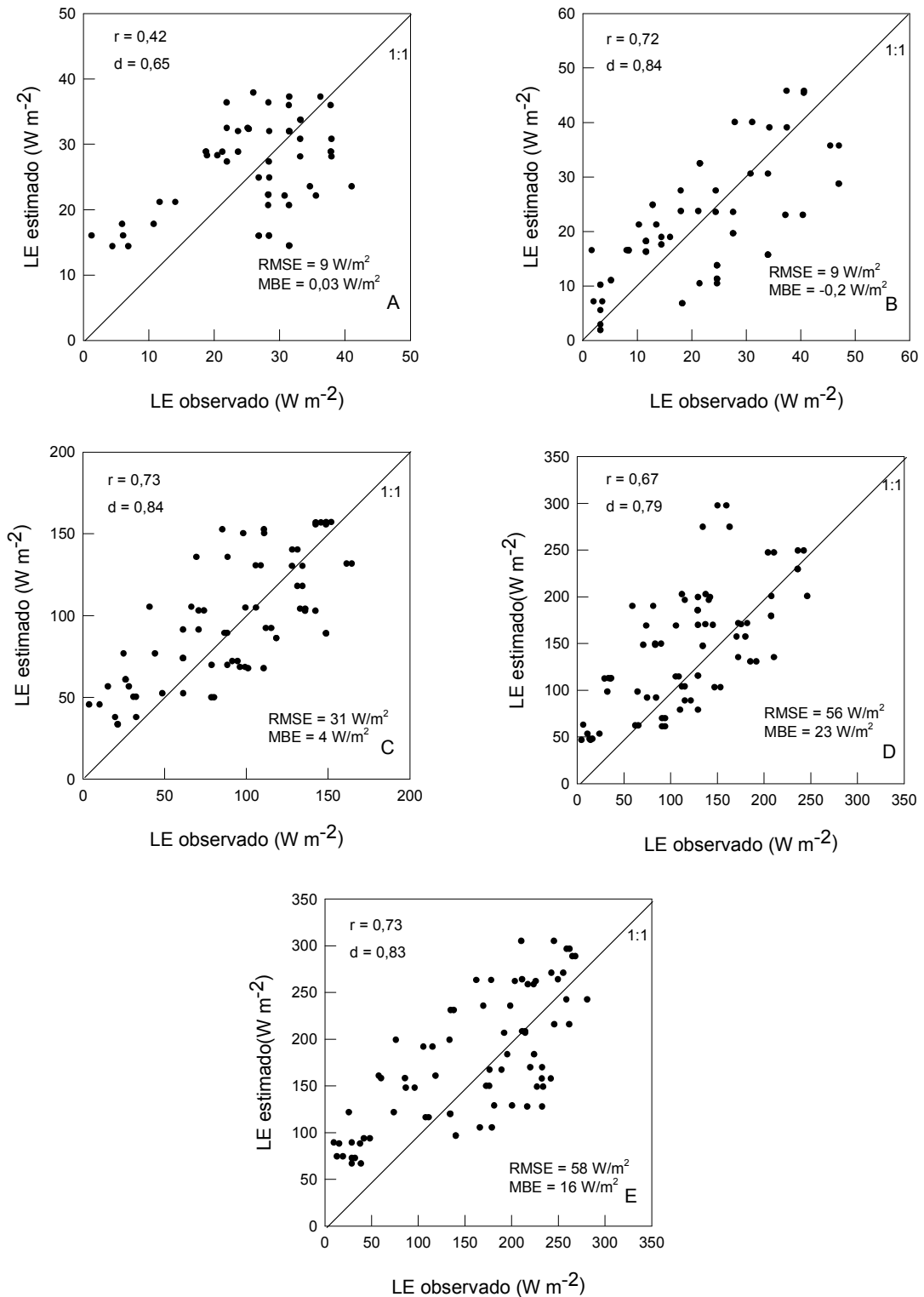


FIGURA 15A – Fluxo de calor latente observado e estimado pelo modelo da Radiação Solar (RS) no interior da casa de vegetação para o cultivar Great Lakes. As Figuras A, B, C, D e E correspondem à 1ª, 2ª, 3ª, 4ª e 5ª etapa, respectivamente.

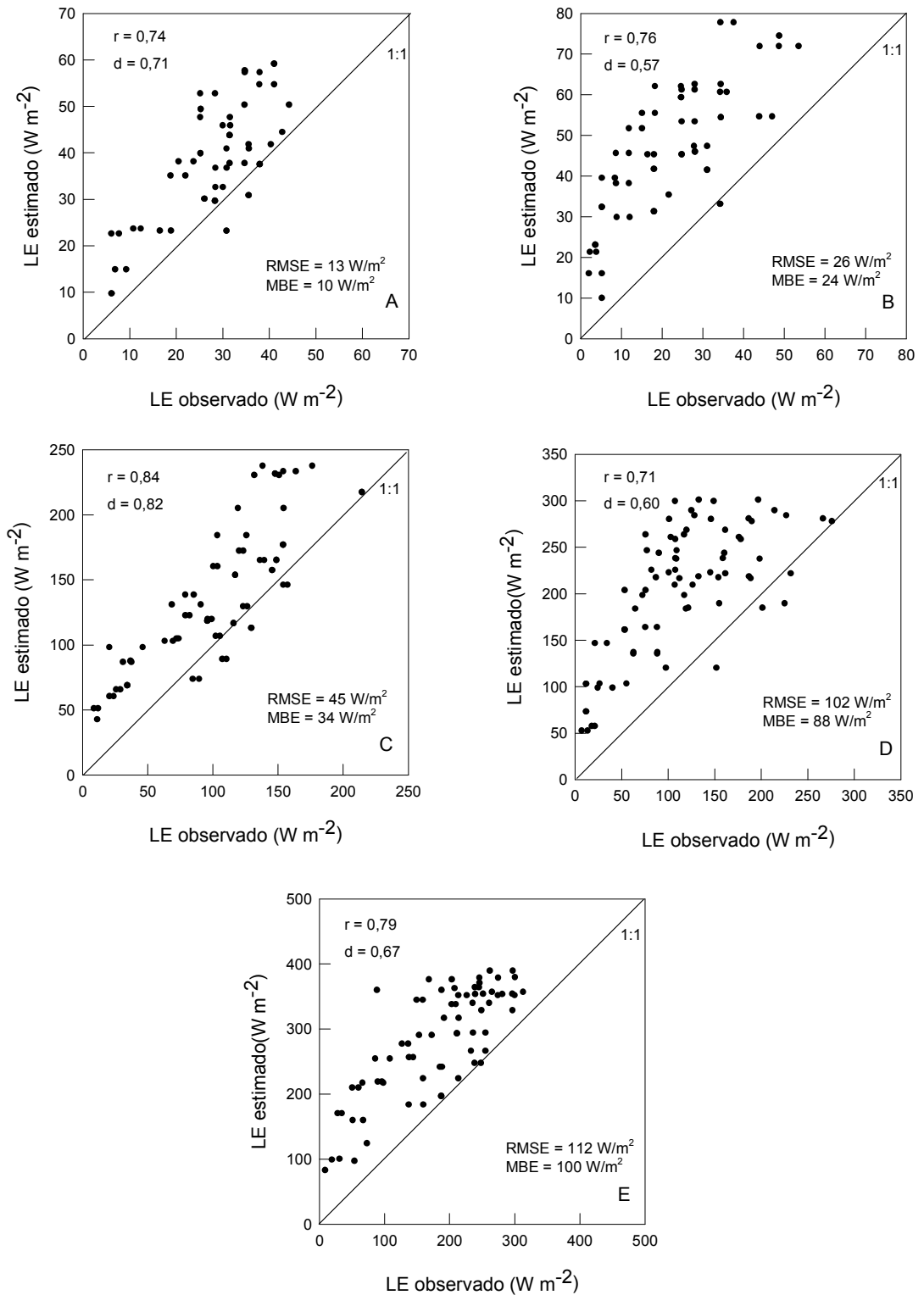


FIGURA 16A – Fluxo de calor latente observado e estimado pelo modelo da Radiação Solar Simplificado (RSS) no interior da casa de vegetação para o cultivar Grand Rapids. As Figuras A, B, C, D e E correspondem à 1ª, 2ª, 3ª, 4ª e 5ª etapa, respectivamente.

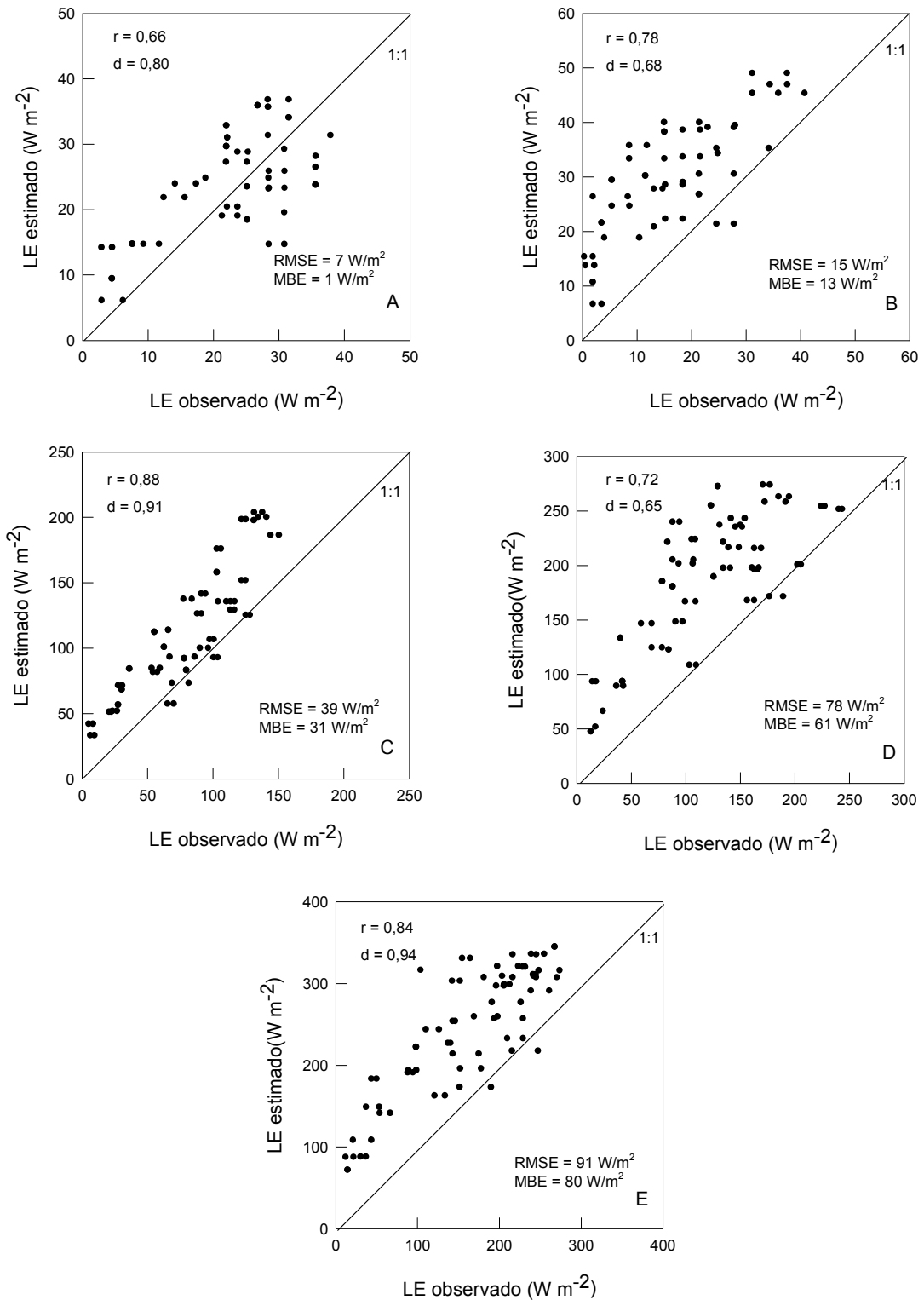


FIGURA 17A – Fluxo de calor latente observado e estimado pelo modelo da Radiação Solar Simplificado (RSS) no interior da casa de vegetação para o cultivar Regina. As Figuras A, B, C, D e E correspondem à 1ª, 2ª, 3ª, 4ª e 5ª etapa, respectivamente.

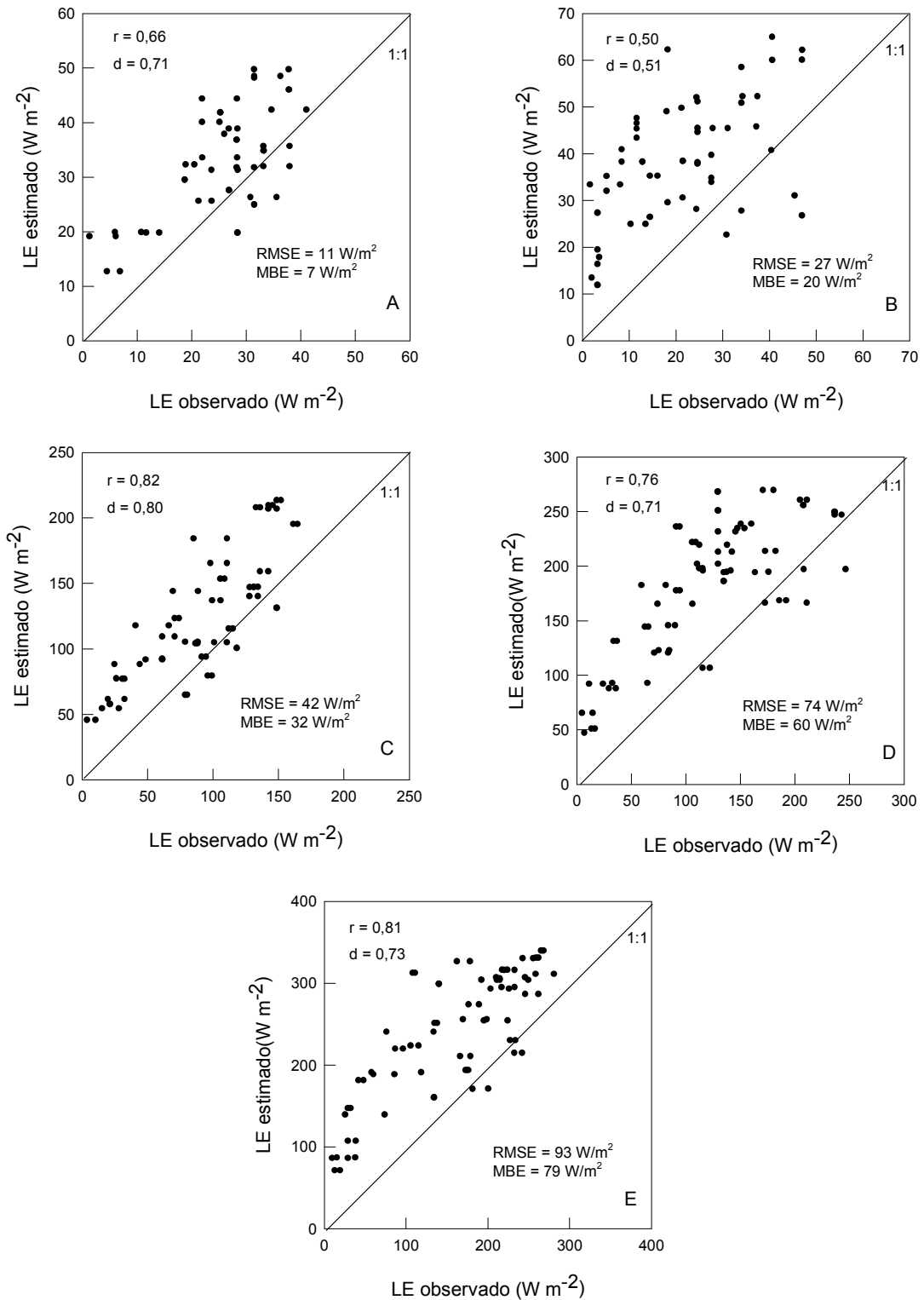


FIGURA 18A – Fluxo de calor latente observado e estimado pelo modelo da Radiação Solar Simplificado (RSS) no interior da casa de vegetação para o cultivar Great Lakes. As Figuras A, B, C, D e E correspondem à 1^a, 2^a, 3^a, 4^a e 5^a etapa, respectivamente.