AA 4422
03/065
2003 065

Revista Brasileira de Agrometeorologia, Santa Maria, v. 11, n. 2, p. 221-228, 2003
Recebido para publicação em 15/01/2003. Aprovado em 12/08/2003.

ISSN 0104-1347

Estimativa da temperatura da superfície e da evapotranspiração em gramado com um método iterativo

Estimating of surface temperature and evapotranspiration in a grassland with an iterative method

Fábio Ricardo Marin[1], Evandro Zanini Righi[2], Alaílson Venceslau Santiago[2], Paulo Cesar Sentelhas[3], Selma Regina Maggiotto[4] e Gustavo Bastos Lyra[2]

Resumo *- Desenvolveu-se um método iterativo para a resolução da equação do balanço de energia, considerando como incógnita a temperatura da superfície. O método foi avaliado nas condições de um gramado, no qual foram medidos o saldo de radiação, velocidade do vento, fluxo de calor no solo e umidade relativa do ar, além da temperatura da superfície com termômetro ao infravermelho e a evapotranspiração com lisímetro de pesagem. Foram avaliadas diferentes formas para a determinação da resistência da cobertura (rc) e da resistência aerodinâmica (ra) e os melhores resultados foram obtidos determinando-se a ra com um modelo que considerava o efeito da estabilidade atmosférica e, a rc, combinando-se um modelo baseado em variáveis meteorológicas com valores fixos em algumas condições. Os dados estimados de temperatura da superfície apresentaram os maiores erros durante o período noturno, enquanto que os dados de fluxo de calor latente, convertidos em evapotranspiração diária, apresentaram uma tendência de superestimativa em relação às medidas lisimétricas de cerca 6%.*

Palavras-chave*: temperatura da folha, resistência aerodinâmica, resistência da cobertura, fluxo de calor sensível, fluxo de calor latente.*

Abstract *- An iterative method was developed to solve the energy balance equation, considering the surface temperature as incognito. The method was applied to data obtained over a grass crop, where were measured the net radiation, soil heat flux, air humidity and temperature, wind speed besides leaf temperature with infrared thermometer and evapotranspiration, with weighing lysimeter. Different approaches to estimate the surface (rc) and aerodynamic resistance (ra) were evaluated and the best results were found with ra being determined by a model that consider the effect of atmospheric stability and, rc, combining a model based on meteorological variables with constant values in some conditions. The surface temperature data showed the larger errors during night period, while latent heat flux, converted into daily evapotranspiration, overestimated the lysimetric measures in about 6%.*

Key words*: leaf temperature, surface resistance, aerodynamic resistance, sensible heat flux, latent heat flux.*

Introdução

Os modelos de transferência de massa e energia baseados na teoria do fluxo-gradiente, para estimativa dos componentes do balanço de energia, levam em conta valores da resistência aerodinâmica (ra), resistência da cobertura vegetal (rc), pressão de saturação de vapor à temperatura da folha (es_{Tf}) e a pressão parcial de vapor do ar (e_a). A equação geral

[1]Pesquisador da EMBRAPA Monitoramento por Satélite, Rua Júlio Soares de Arruda, 803, CEP 13088-300, Campinas/SP, fabio@cnpm.embrapa.br
[2]Doutorando do Curso de Física do Ambiente Agrícola, ESALQ/USP, DCE - Setor de Agrometeorologia, CP 09, CEP: 13418-900, Piracicaba, SP, Bolsista da CAPES
[3]Professor, ESALQ/USP, DCE - Setor de Agrometeorologia, CP 09, CEP: 13418-900, Piracicaba, SP.
[4]Pós-doutorando, Instituto Tecnológico SIMEPAR/LEMMA – Curitiba – PR, Bolsista CNPq.

que descreve o fluxo de calor latente (LE) entre uma cobertura vegetal e a atmosfera é dada por:

$$LE = \frac{\rho\ cp\ \left(es_{Tf} - e_a\right)}{\gamma\left(rc + ra\right)} \quad (1)$$

em que ρ é a densidade do ar ($kg.m^{-3}$); cp o calor específico do ar ($MJ.kg^{-1}.°C^{-1}$); e γ o coeficiente psicrométrico ($kPa.°C^{-1}$).

Por analogia, pode-se também determinar o fluxo de calor sensível (H) desde que se conheça a temperatura da cobertura vegetal (Tf) e a temperatura do ar (Ta), como mostra a seguinte equação:

$$H = \frac{\rho\ cp\ \left(Tf - Ta\right)}{ra} \quad (2)$$

A forma relativamente simples das equações apresentadas encobre dificuldades para que as mesmas possam ser empregadas com objetivos práticos, dentre delas, a determinação da temperatura da superfície, de ra e de rc. Diversos modelos foram propostos com a finalidade de quantificar os fluxos de calor latente e sensível, sem a utilização da temperatura da superfície como uma variável de entrada. BROWN & ROSENBERG (1973) propuseram um modelo para determinação da evapotranspiração eliminando a relação de dependência entre LE e es_{Tf}. MONTEITH (1965) procedeu da mesma forma no desenvolvimento de seu consagrado modelo, simplificando sua forma e viabilizando sua larga utilização até os dias atuais. VERMA & ROSENBERG (1977) adaptaram o modelo de BROWN & ROSENBERG (1973), eliminando a necessidade de métodos iterativos para sua resolução numérica, e utilizando funções específicas para a determinação de ra e rc, propostas por VERMA et al. (1976) e BARADAS et al. (1975) (apud VERMA & ROSENBERG, 1977).

A resistência aerodinâmica é uma variável intensamente estudada em diversas áreas do conhecimento, sendo objeto de grande interesse na micrometeorologia. Pode ser determinada a partir da medida da velocidade do vento em determinada altura, dos valores de comprimento da rugosidade (z_o) e do deslocamento do plano zero (d) que são dependentes da altura da vegetação, cobertura do solo, área foliar e estrutura do dossel (MASSMAN, 1992; PERRIER, 1982; SHAW & PEREIRA, 1982). Em sua derivação original, a aplicação de ra para o transporte de energia vem de uma analogia com a transferência ao transporte de momento, admitindo-se a existência de um perfil logarítmico de velocidade do vento acima do dossel, válida apenas em condições de neutralidade (CAMPBELL & NORMAN, 1998).

Com relação a rc, tem-se na literatura uma intensa discussão e grande quantidade de trabalhos realizados com o intuito de estudar os fatores envolvidos na sua regulação. Entretanto, há ainda grande dificuldade para sua modelagem a partir de variáveis meteorológicas e biométricas, a despeito do grande esforço científico feito nesse sentido. Essa variável representa, a rigor, uma expressão da resistência ao transporte de calor latente que envolve os seguintes componentes (PERRIER, 1975): a resistência ao transporte de vapor a partir das superfícies evapo(transpi)rantes: plantas e seus estômatos e o solo e; a resistência ao transporte de vapor dentro do dossel, acima das superfícies evapo(transpi)rantes. Embora rc não seja um termo puramente fisiológico, representa principalmente a resposta estomatal às condições ambientais, de forma que, em condições de cobertura contínua, admite-se que rc represente todos os componentes da resistência total ao fluxo de vapor citados (ALVES et al., 1998).

Atualmente, técnicas computacionais que permitem o emprego prático de métodos iterativos são de simples aplicação. Assim, desde que se disponha de valores confiáveis de rc e ra, pode-se contar com estimativas até certo ponto precisas da temperatura da cobertura vegetal, dos componentes do balanço de energia e, por conseguinte, da evapotranspiração, fazendo uso apenas das equações básicas supra citadas. O presente trabalho tem por objetivo avaliar o desempenho de um método iterativo na determinação da temperatura da superfície e na estimativa do fluxo de calor latente de um gramado, utilizando diferentes formas de determinação de ra e rc.

Material e métodos

Os dados experimentais foram obtidos na Área Experimental de Irrigação e Drenagem da Fazenda Areão, Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo (22° 42' S; 47° 30' W; 546m), com bordadura de 35m x 90m, utilizando-se 8 dias de medida do mês de março de 1996 (Tabela 1), nos quais o lisímetro de pesagem teve funcionamento considerado normal, baseado nas considerações de PEREIRA et al. (2002a), sem a

Rev. Bras. Agrometeorologia, v. 11, n. 2, p. 221-228, 2003

Tabela 1. Valores médios diários de temperatura do ar (Tar), umidade relativa (UR), velocidade do vento (Vento), saldo de radiação (Rn) e fluxo de calor no solo (G) dos dias analisados.

Dia Juliano	Tar. °C	UR. %	Vento $m.s^{-1}$	Rn $MJ.m^{-2}.d^{-1}$	G $MJ.m^{-2}.d^{-1}$
81	23,5	84,3	2,2	9,6	-0,12
82	23,6	81,6	1,9	10,3	0,03
84	24,3	84,4	1,4	13,0	0,30
85	24,4	80,9	1,6	14,3	0,14
86	25,4	78,7	1,4	14,2	0,25
88	24,7	84,1	1,2	11,1	0,14
89	25,1	83,2	1,4	12,0	0,12
90	26,0	78,1	1,3	12,5	0,13
91	24,5	81,9	1,7	12,1	0,14

ocorrência de chuvas e precedidos por um período chuvoso, garantindo o suprimento hídrico adequado à cultura. A Figura 1 ilustra a disponibilidade de energia e as condições de nebulosidade nos dias de medida. O clima da região, de acordo com a classificação de Köppen, é do tipo Cwa .

No local das medidas, a evapotranspiração do gramado foi obtida com um lisímetro de pesagem baseado em células de carga (LCCA-2K, OMEGA ENGINEERING), montado por SILVA et al. (1999), com capacidade total de 2730kg e precisão de 0,037% de sua capacidade total. Para a medida da temperatura e da umidade do ar foi utilizado um termo-higrômetro (HMP45C, VAISALA) instalado à 2m de altura, enquanto que, para a velocidade do vento, utilizou-se um anemômetro de caneca (O14A, MET ONE INSTRUMENTS), na mesma altura. Mediu-se

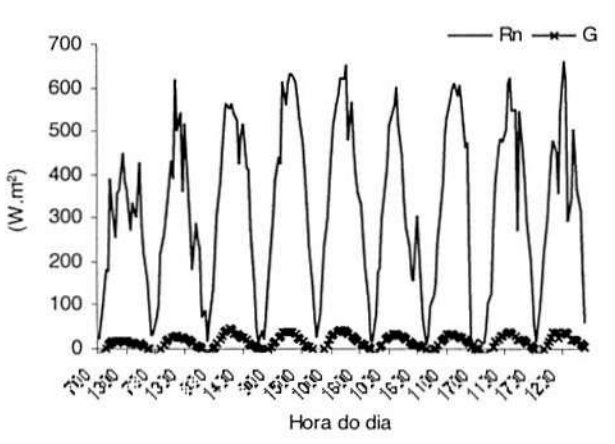

Figura 1. Variação diurna do saldo de radiação (Rn) e do fluxo de calor no solo (G) ao longo dos dias de medida.

também o saldo de radiação na altura de 1m (Q*7·1, REBS) e a temperatura da cobertura foliar com termômetro ao infravermelho (4000.4ZL, EVEREST INTERSCIENCE), com visada de 15°, posicionado a 0,25m de altura e com ângulo de 40° em relação à horizontal. O fluxo de calor no solo foi medido com uma placa de fluxo (HFT3, REBS) instalada a 3 cm de profundidade. Outros detalhes da área experimental e dos procedimentos de medida podem ser obtidos em MAGGIOTTO (1996). Os sinais elétricos desses sensores foram registrados por um sistema automático de aquisição de dados (CR10, CAMPBELL SCIENTIFIC) a cada 10 segundos e armazenando valores médios a cada 30 minutos.

O algoritmo para determinação da temperatura da cobertura foi inicialmente elaborado em linguagem Microsoft Quick Basic™, utilizando o método iterativo de Newton-Raphson, selecionando-se a temperatura da cobertura que satisfizesse a equação (3) (MARIN et al., 2001b):

$$Rn - \frac{\rho\ cp\ \left(es_{Tf} - ea\right)}{\gamma\ \left(rc + ra\right)} - \frac{\rho\ cp\ \left(Tf - Ta\right)}{ra} - G = 0 \qquad (3)$$

Posteriormente, de modo a facilitar a manipulação e o processamento dos dados, o algoritmo foi introduzido em uma planilha eletrônica (Microsoft Excel™), com a resolução da equação 3 sendo obtida pela ferramenta "*atingir metas*", com uma rotina de operação escrita na forma de um "macro". Satisfeita a condição da equação 3, o fluxo de calor latente foi calculado pela equação 1.

O método foi avaliado utilizando-se duas formas para a determinação de rc. Em uma delas, tomou-se um valor diário fixo, igual a 70 $s.m^{-1}$, que apesar de ter sido recomendado no boletim nº 56 da FAO (ALLEN et al., 1998) para períodos maiores que um dia, foi avaliado na rotina de cálculo pela sua simplicidade.

Na outra forma de estimativa de rc, utilizou-se o método proposto por MARIN et al. (2001a) (equação 4), para plantas sem deficiência hídrica e Rn > 0, obtendo-se valores de rc variáveis de acordo com as condições micrometeorológicas, para intervalos de 30 minutos.

$$rc = \frac{\rho\ cp\ \Delta e}{\gamma\ 0{,}66\ \left(Rn - G\right)} - ra \qquad (4)$$

em que Δe é o déficit de pressão de vapor do ar (kPa); 0,66 representa a razão entre a energia radiante disponível (Rn-G) e LE, segundo dados de PEREIRA et al. (2002b), obtidos na mesma área e período.

Nas estimativas de rc com a equação (4), nos períodos em que Rn<0 (períodos noturnos), fixou-se um valor de rc=2500 $s.m^{-1}$, que representa os valores médios de resistência à difusão de vapor da camada cuticular da folha (NOBEL, 1991), com o objetivo de simular o fechamento estomático noturno. Além disso, no início da manhã de alguns dias, quando a umidade relativa do ar estava próxima de 100%, verificou-se a ocorrência de valores de rc<0, indicando a presença de água livre sobre as folhas e permitindo inferir que apenas a resistência aerodinâmica controlava o processo de evapotranspiração. Dessa forma, nos momentos em que a equação 4 fornecia valores de rc<0 e R_n>0, considerou-se rc=0 $s.m^{-1}$.

O modelo também foi avaliado utilizando-se duas formas para estimativa de ra. A primeira delas seguiu a recomendação do boletim FAO-56 (ALLEN et al., 1998), apresentada na Equação 5, admitindo-se que o comprimento da rugosidade (z_o) para a transferência de momento e de calor sensível e latente são iguais. A equação 5 também foi proposta para dados obtidos em períodos de 1 dia e as razões para a avaliação desse método de estimativa de ra são as mesmas descritas na estimativa de rc com a equação 4. A segunda forma para a determinação de ra foi proposta por THOM & OLIVER (1977), que consideraram em sua proposição o efeito da estabilidade no transporte das propriedades atmosféricas (equação 6).

$$ra = \frac{\left[ln\left(\frac{z-d}{z_o}\right)\right]^2}{k^2 u} \quad (5)$$

$$ra = \frac{4,72}{1+0,54.u}\left[ln\left(\frac{z}{z_o}\right)\right]^2 \quad (6)$$

em que z é a altura de medida do vento (2m); d, o deslocamento do plano zero, e z_o, o comprimento da rugosidade (m), sendo considerados iguais a 10% e 67% da altura média do gramado (0,12m), respectivamente; u a velocidade do vento ($m.s^{-1}$) e k é a constante de Von Karman (0,41).

Para avaliação do desempenho do algoritmo, os valores estimados da temperatura da cobertura foram comparados com valores medidos, para intervalos de 30 minutos, utilizando-se análise de regressão. Os dados de fluxo de calor latente foram convertidos em evapotranspiração, integrados para períodos de 24horas e comparados com os dados do lisímetro, utilizando-se também da análise de regressão linear.

Resultados e discussão

Na Figura 2 são apresentados os resultados das estimativas da temperatura da superfície (Tf) e da evapotranspiração diária (ET) utilizando-se rc=70 $s.m^{-1}$ e a equação (5) para a estimativa de ra. A análise de regressão envolvendo os valores estimados e medidos de ET apresentou um coeficiente angular (b) próximo da unidade e coeficiente de determinação (R^2) de 0,81 (Figura 2B). No entanto, na avaliação dos valores de Tf, observou-se que dispersão dos valores estimados em relação aos medidos foi relativamente maior, sobretudo no início e final do período diurno dos dias 86 e 91 (Figura 2A e 2C), que tiveram as maiores valores medidos de temperatura do ar (Tabela 1). Na Figura 2 pode-se observar também uma defasagem entre os valores medidos e estimados de Tf, o que está relacionado com a altura de medida da temperatura do ar, variável de entrada no método iterativo.

A adoção de um valor constante de rc pode ser apontada como a causa da maior parte das discrepâncias verificadas entre Tf estimada e medida, já que essa proposição foi feita para estimativas de ET na escala diária com dados meteorológicos médios. Para determinações em escalas de tempo menores, como neste caso, espera-se que os valores de rc variem ao longo do dia, de acordo com os elementos meteorológicos, admitindo-se que haja suprimento adequado de água no solo.

Utilizando-se a equação 4 como sub-modelo de rc e a equação 5 para a estimativa de ra, as estimativas de ET passaram a subestimar os valores medidos em aproximadamente 5%, elevando o valor de R^2 para 0,79 (Figura 3B). As estimativas de Tf tiveram um desempenho comparativamente superior, com b=1,03 e R^2=0,83 (Figura 3C). Na Figura 3A pode-se notar que os maiores erros ocorreram no início do período diurno, especialmente entre 6 e 8 horas, quando se observou uma tendência de superestimativa dos valores de Tf, com um erro médio absoluto

Rev. Bras. Agrometeorologia, v. 11, n. 2, p. 221-228, 2003

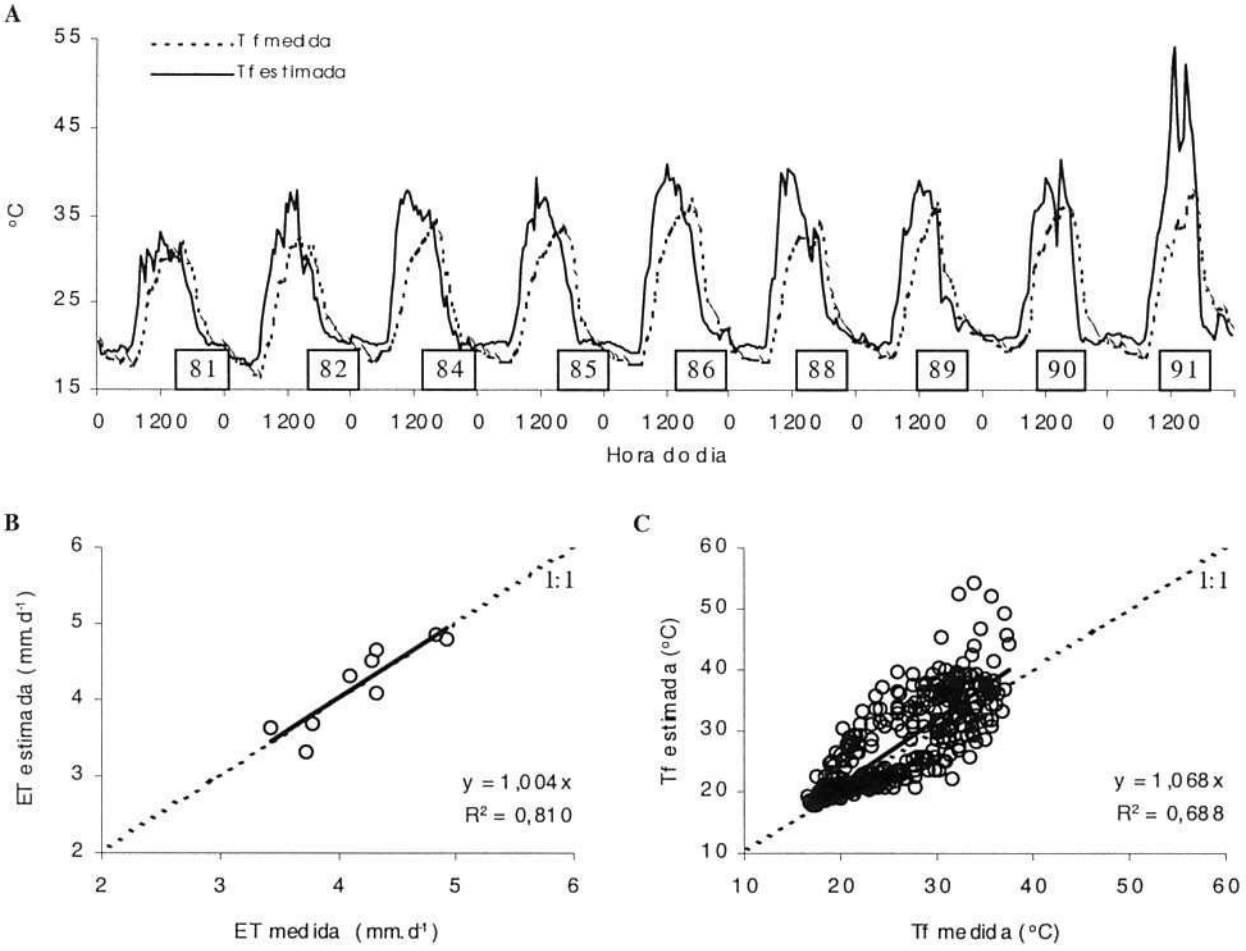

Figura 2. Variação da temperatura da superfície (Tf) estimada e medida (A); correlação entre os valores da evapotranspiração (ET) estimados e medidos (B) e; correlação entre os valores de Tf estimados e medidos (C), considerando-se rc=70 s.m^{-1} e $ra = [\ln(z-d/z_o)]^2/k^2u$, para um gramado sem deficiência hídrica.

chegando a 3,27 °C. Nos demais períodos do dia, as estimativas mostraram-se menos discrepantes, com um erro médio absoluto de 1,8 °C e com desvios aleatórios.

Os valores de rc estimados pela equação 4 tiveram um valor médio diurno de 92,3 s.m^{-1}, valor próximo daquele proposto por ALLEN et al. (1998) igual a 70 s.m^{-1}, por JARVIS (1981) igual a 100 s.m^{-1} e por MONTEITH (1965), entre 30 e 70 s.m^{-1}, indicando que o método apresenta coerência sob o ponto de vista biofísico, já que além de concordar em termos médios com dados de literatura, a variação diurna de rc nos dias estudados deu-se conforme o esperado para uma cultura bem suprida hidricamente.

No período noturno, Tf estimada foi invariavelmente maior que Tf medida, sobretudo nos horários em que a temperatura do ar se aproximava de seu valor mínimo, o que, em parte, pode ser explicado pelo processo da condensação de água. Como a rotina de cálculo não levou em conta esse processo, o montante de energia envolvido na condensação foi erroneamente direcionado para o aquecimento da superfície, elevando os valores estimados. Essa inferência foi baseada na comparação entre os valores de temperatura do ponto de orvalho (To) e Tf medida (dados não apresentados), a partir da qual identificou-se que o início da discrepância entre Tf medida e estimada coincidiu com o momento em que To passou a ser menor que Tf medida, quando poderia ter ocorrido a inversão do sentido de LE e, por conseguinte, o início da formação do orvalho.

Analisando-se a curva diária das variáveis, foi possível identificar uma relação entre os erros de estimativa de Tf no início da manhã com valores de

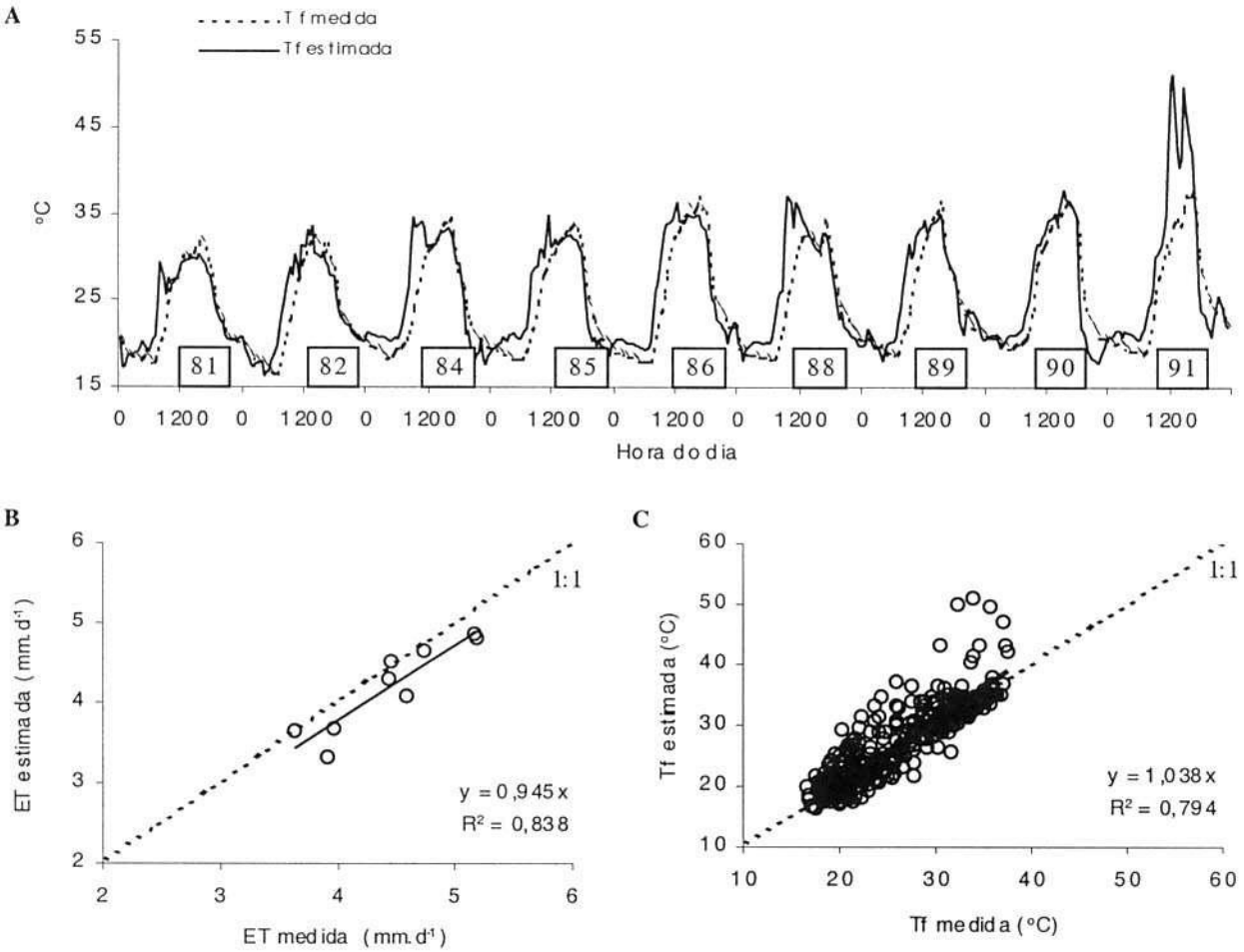

Figura 3. Variação da temperatura da superfície (Tf) estimada e medida (A); correlação entre os valores da evapotranspiração (ET) estimados e medidos (B) e; correlação entre os valores de Tf estimados e medidos (C), com $ra = [ln(z-d/z_o)]^2 / k^2 u$ e $rc = \lfloor \rho\ cp\ \Delta e/\gamma\ 0{,}66\ (Rn-G) \rfloor - ra$ para Rn>0; rc=0 para rc<0; e rc=2500 s.m^{-1} para Rn<0, em um gramado sem deficiência hídrica.

velocidade do vento menores que 1 m.s^{-1} (Figura 4). Levando-se em conta que ra é inversamente proporcional a velocidade do vento e ambas estão relacionadas por uma função hiperbólica, quando as velocidades foram inferiores a 1,0m.s^{-1}, as estimativas de ra com a equação (5) resultaram em valores maiores que 200 s.m^{-1}, os quais, segundo MONTEITH (1965), são exagerados para ambientes naturais.

Sob o ponto de vista físico, os erros de Tf no início da manhã podem ser explicados pelo fato de que, ao se limitar o transporte de H entre a superfície e a atmosfera devido ao aumento de ra, para que fosse atendida a condição imposta na equação 3 houve elevação nos valores de Tf. Além disso, nos momentos em que esses erros ocorreram, a umidade do ar esteve sempre muito próxima da saturação, fazendo com que o termo referente ao fluxo de calor latente da equação 3 tivesse sua importância relativa reduzida.

Além disso, a partir da análise das variáveis meteorológicas nesses momentos, foi possível inferir que a atmosfera encontrava-se em condições de estabilidade, incompatíveis com as condições de contorno da equação 5. Diante disso, empregou-se a equação 6 na estimativa de ra, observando-se, na Figura 5C, que houve uma melhora no ajuste entre os valores medidos e estimados de Tf, com b=1,01 e R^2=0,93, o que, provavelmente, deveu-se à eliminação dos erros de estimativa de Tf no início do período diurno (Figura 5A). Ainda sobre a ra, os erros de estimativas de ET e Tf verificados neste trabalho podem ser, em parte, atribuídos à adoção de valores constantes para z_o e d. Conforme MONTEITH (1963) e MONTEITH & UNSWORTH (1990) z_o e d podem

Rev. Bras. Agrometeorologia, v. 11, n. 2, p. 221-228, 2003

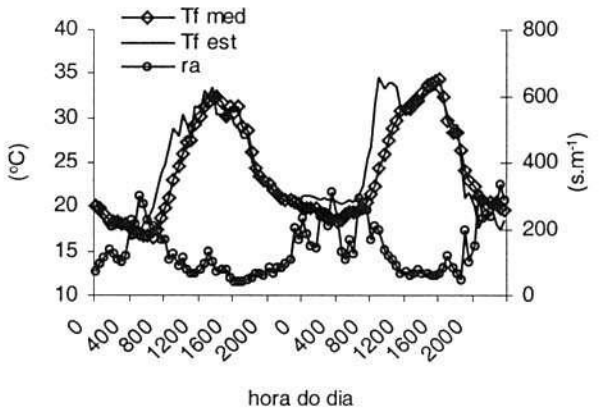

Figura 4. Variação da resistência aerodinâmica, temperatura da superfície estimada e medida, para os dias 82 e 84, com $ra = [ln(z - d/z_o)]^2 / k^2 u$ e $rc = [\rho\ cp\ \Delta e/\gamma\ 0{,}66\ (Rn - G)] - ra$ para Rn>0; rc=0 para rc<0; e rc=2500 s.m^{-1} para Rn<0, em um gramado sem deficiência hídrica.

variar com a velocidade do vento, seja pela diminuição da rugosidade de vegetação, seja pelo direcionamento das folhas no sentido do fluxo de ar, mesmo para coberturas vegetais de baixo porte como o gramado estudado.

Conclusões

O método computacional iterativo forneceu estimativas coerentes da evapotranspiração e da temperatura da superfície, quando se estimou a resistência aerodinâmica considerando-se a estabilidade atmosférica, e a resistência a cobertura em função das variáveis meteorológicas.

Referências bibliográficas

ALLEN, R.G. et al. **Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements.** Rome: FAO, 1998. 300 p. (Irrigation and Drainage Paper, 56).

ALVES, I.; PERRIER, A.; PEREIRA, L.S. Aerodynamic and surface resistances of complete cover crops: How good is the "big leaf"? **Transactions of the ASAE**, Saint Joseph, v. 41, n. 2, p. 345-351. 1998.

BROWN, K.W.; ROSENBERG, N.J. A resistance model to predict evapotranspiration and its application to a sugar beet field. **Agronomy Journal**, Madison, v. 65, n. 3, p. 341-347, 1973.

CAMPBELL, G.S.; NORMAN, J.M. **An Introduction to Environmental Biophysics**. New York: Springler Verlag, 1998. 286 p.

JARVIS, P.G. Stomatal conductance, gaseous exchange and transpiration. In: GRACE, J.; FORD, E.D., JARVIS, P.G. **Plants and their atmospheric environment**. Boston: Blackwell Scientific Publications, 1981, p. 175-204.

MAGGIOTTO, S.R. **Estimativa da evapotranspiração de referência pelo uso da termometria ao infravermelho**. Piracicaba: ESALQ/USP, 1996. 71 p. Dissertação (Mestrado) – Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo.

MARIN, F.R.; ANGELOCCI, L.R.; RIGHI, E.Z. Modelo simplificado para estimativa da resistência à difusão de vapor de árvores de lima ácida "Tahiti". **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v. 9, n. 2, p. 227-233, 2001a.

MARIN, F.R. et al. Algoritmo computacional para estimativa da evapotranspiração potencial. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, 12., Fortaleza, 2001b. **Anais**..., Fortaleza: SBA, 2001b. p. 593-594.

MASSMAN, W.J. A surface energy balance for partitioning evapotranspiration data into plant and soil components for a surface with partial canopy cover. **Water Resources Research**, Washington, v. 28, n. 6, p. 1723-1732, 1992.

MONTEITH, J.L. Gas exchanges in plant communities. In: EVANS, L.T. **Environmental Control of Plant Growth**, Camberra: Academic Press, 1963. p. 95-111.

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

MONTEITH, J.L.; UNSWORTH, M.H. **Principles of Environmental Physics**, New York: Edward Arnold. 1990. 290 p.

NOBEL, P.S. **Physicochemical and Environmental Plant Physiology**. San Diego: Academic Press, 1991. 635 p.

PEREIRA, A.R. et al. Problemas operacionais com lisímetro de pesagem durante a estação chuvosa e em dias secos com rajadas de vento. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 10, n. 1, p. 51-56, 2002a.

PEREIRA, A.R.; et al. Substantiation of the daily FAO-56 reference evapotranspiration with data from automatic and conventional weather stations. **Revista**

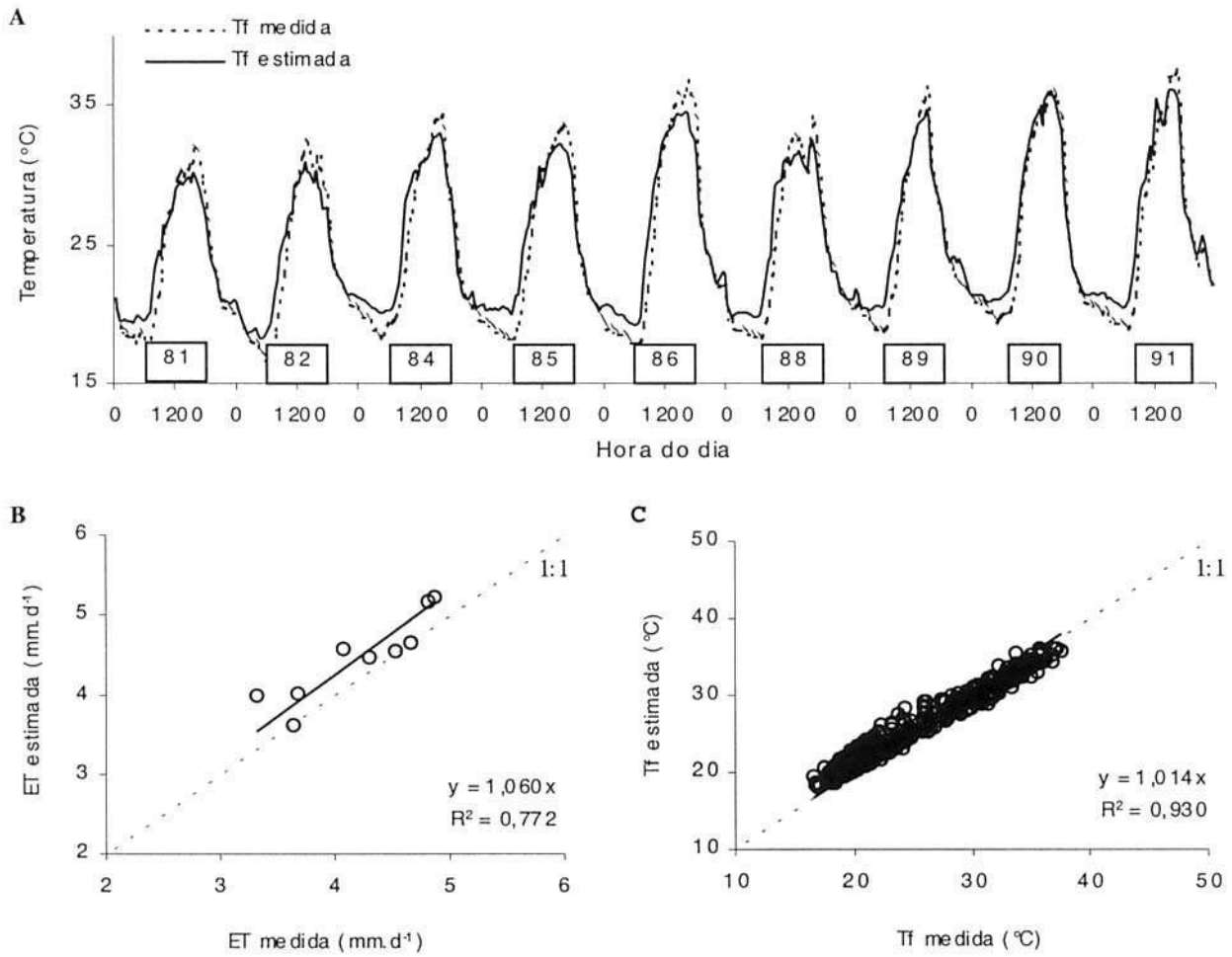

Figura 5. Variação da temperatura da superfície estimada e medida (A); correlação entre os valores da evapotranspiração (ET) estimados e medidos (B) e correlação entre os valores de Tf estimados e medidos (C), com $ra = 4{,}72/(1+0{,}54.u)[\ln z/z_o]^2$ e $rc = \lfloor \rho\ cp\ \Delta e/\gamma\ 0{,}66\ (Rn-G)\rfloor - ra$ para Rn>0; rc=0 para rc<0; e rc=2500 s.m-^{1} para Rn<0, em um gramado sem deficiência hídrica.

Brasileira de Agrometeorologia. Santa Maria, v. 10, n. 2, p. 1-7, 2002b.

PERRIER, A. Etude physique de l'évapotranspiration réele et potentielle des couverts végétaux. **Annales Agronomiques**, Paris, v. 26, n. 2, p. 229-243, 1975.

PERRIER, A. Land surface processes: vegetation. In: EAGLESON, P.S. (Ed.) **Land Surface Processes in Atmospheric General Circulation Models**, New York: Cambridge University Press. 1982. p. 395-448.

SHAW, R.H.; PEREIRA, A.R. Aerodynamic roughness of a plant canopy: a numerical experiment. **Agricultural Meteorology**, Amsterdan, v. 26, n. 1, p. 51-65, 1982.

SILVA, F.C.; FOLEGATTI, M.V.; MAGGIOTTO, S.R. Análise do funcionamento de um lisímetro de pesagem com célula de carga. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 7, n. 1, p. 53-58, 1999.

THOM, A.S.; OLIVER, H.R. On Penman's equation for estimating regional evaporation. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, London, v. 103, n. 436, p. 345-357, 1977.

VERMA, S.B. et al. Resistance-energy balance method for predicting evapotranspiration: determination of boundary layer resistance and evaluation or error effects. **Agronomy Journal**, Madison, v. 68, n. 4, p. 776-782, 1976.

VERMA, S.B.; ROSENBERG, N. J. The Brown-Rosenberg resistance model of crop evapotranspiration modified testes in an irrigated sorghum field. **Agronomy Journal**, Madison, v. 69, n. 3, p. 332-335, 1977.