

ISSN 0104-1347

Estimativa da transpiração máxima de lima ácida 'Tahiti' pelo modelo de Penman-Monteith¹

Estimating maximum transpiration of Tahiti acid lime using Penman-Monteith model

Fábio Ricardo Marin², Luiz Roberto Angelocci³ e Nilson Augusto Villa Nova³

Resumo – O modelo de Penman-Monteith tem sido adaptado para estimativa da transpiração máxima (TM) de frutíferas. Para seu bom desempenho nessa estimativa, exige boas determinações da energia radiante absorvida pela copa (Rn_{ep}), da resistência difusiva da cobertura (rc) e da resistência aerodinâmica (ra), bem como da área foliar, o que representa uma dificuldade na aplicação do modelo. Neste trabalho, foi usado na estimativa de TM em duas árvores de lima ácida 'Tahiti' em duas estações do ano (inverno e verão), em pomar irrigado em Piracicaba, SP. Rn_{ep} foi estimado a partir das medidas de dois saldo-radiômetros instalados acima e abaixo da copa, considerando-se a atenuação exponencial da radiação durante a passagem pela folhagem, com base na área foliar. Os valores de rc foram estimados a partir de um modelo previamente testado que tem como variáveis de entrada Rn_{ep} , ra e o déficit de pressão de vapor do ar. A estimativa de ra foi feita pelo uso de um modelo que considera a geometria da copa, as dimensões das folhas e a velocidade do vento na altura média das plantas. O modelo de Penman-Monteith apresentou bom desempenho na escala diária quando comparado com o fluxo de seiva determinado pelo método do balanço de calor no caule, mostrando-se promissor para a estimativa de TM em lima ácida 'Tahiti' a partir de variáveis micrometeorológicas e biométricas do pomar na forma apresentada no trabalho. São discutidos, também, os resultados obtidos nas estimativas de Rn_{ep} , ra e rc .

Palavras-chave: energia radiante absorvida, fluxo de seiva, resistência foliar, resistência aerodinâmica, transpiração.

Abstract - The Penman-Monteith model was used for estimating maximum transpiration (TM) of fruit crops. It requires the determination of the net radiation absorbed by the canopy (Rn_{ep}), the crop and the aerodynamic diffusive resistances (rc and ra , respectively), normally difficult to be performed. The model was used for estimating TM of two 'Tahiti' acid lime trees, in two seasons (summer and winter) in an irrigated orchard at Piracicaba, São Paulo, Brazil. Rn_{ep} was estimated from measurements of net radiation above and below the canopy, by considering the exponential attenuation of radiation by foliage, based on leaf area index. Values of rc were estimated by a model that requires Rn_{ep} , ra and vapour pressure deficit of air. Values of ra were estimated by a model based on the characteristic leaf dimension, canopy geometry and wind speed at the mean level of canopy. TM daily values had a good agreement with sap flow determined by the stem heat balance method, showing that TM values can be estimated for acid lime trees by using micrometeorological and biometrics variables of orchard, determined as proposed. The estimates of Rn_{ep} , rc and ra are also discussed.

Key words: absorbed radiant energy, sap flow, leaf resistance, aerodynamic resistance, transpiration.

¹ Extraído da dissertação de mestrado do primeiro autor. Trabalho premiado na categoria Jovem Cientista no XII Congresso Brasileiro de Meteorologia na área de Processos de Transferência no Sistema-Solo-Planta-Atmosfera.

² Eng. Agrônomo, Dr., Pesquisador da EMBRAPA Monitoramento por Satélite. Av. Júlio Soares de Arruda, 803, Parque São Quirino, Campinas, SP. 13080-300. fabio@cnpq.embrapa.br

³ Eng. Agrônomo, Dr., Professor do Depto. de Ciências Exatas, Setor de Agrometeorologia, ESALQ/USP. Av. Pádua Dias, 11, CP 09, Piracicaba, SP. 13418-900. Bolsista do CNPq.

Introdução

A despeito da importância da irrigação suplementar para a maioria das culturas frutíferas no Brasil, os estudos de consumo de água em citros são ainda incipientes. Para a cultura da lima ácida "Tahiti", tais estudos são escassos, mesmo sendo uma cultura com ciclo extremamente dependente do clima e da disponibilidade de água no ambiente. As informações sobre o consumo de água são fundamentais para o correto planejamento da irrigação, com vistas a um manejo correto e à economia de água.

A medida direta do consumo de água em pomares é difícil, principalmente quando se trata de árvores adultas de grande porte, como é o caso da lima ácida 'Tahiti'. É possível pensar-se em grandes lisímetros, mas os problemas técnicos e o porte exigido tornam impraticável sua aplicação fora da experimentação e da pesquisa. Uma alternativa é a determinação de fluxo de seiva por técnicas de fornecimento de calor ao tronco que, sob condições elevada umidade do solo, representa bem a transpiração vegetal na escala de 24 horas ou mais (VALANCOGNE & NASR, 1993), possibilitando seu uso principalmente para a irrigação localizada. Essas técnicas podem ser, no futuro, aplicadas para o manejo da água, mas atualmente seu grande uso é na pesquisa, onde se conta mais de uma centena de trabalhos publicados na última década. Ela tem sido usada, inclusive com uma referência para a modelagem da transpiração.

A modelagem da transpiração pode apresentar vantagens em relação à lisimetria e aos métodos de determinação de fluxo de seiva, caso se tenha um modelo que represente bem o fenômeno e não seja complexo em suas determinações. Nos últimos anos tem-se tentado usar o "modelo da grande folha" ("big leaf model") de Penman-Monteith adaptado à transpiração em várias espécies (GREEN & MCNAUGHTON, 1997; DAAMEN *et al.*, 1999). Nesses trabalhos, medidas de fluxo de seiva integradas em períodos de 24 horas foram consideradas como boas aproximações para a transpiração diária das plantas, sendo feita a adaptação das variáveis do modelo de Penman-Monteith para as espécies avaliadas.

Dentre as variáveis do modelo, a resistência foliar à difusão de vapor (r_c) e a resistência aerodinâmica são as que apresentam maior complexidade para sua determinação, sendo necessário, muitas vezes, que se faça algumas aproximações para que se possa determiná-las a partir de variáveis mais sim-

ples (GREEN & MCNAUGHTON, 1997, MARIN *et al.*, 2001b). Além dessas, a determinação da energia disponível por unidade de área foliar (Rn_{cp}) é um problema adicional e diversos trabalhos também foram realizados com o objetivo de estimá-la e para conhecer seus fatores determinantes (THORPE, 1978).

Neste trabalho foram utilizados sub-modelos para estimativa de r_c , Rn_{cp} e r_a , para então se estimar a transpiração de árvores de lima ácida 'Tahiti' com o modelo de Penman-Monteith, comparando-se esses valores com medidas de fluxo de seiva realizadas em duas árvores adultas do pomar, discutindo-se o efeito das variáveis micrometeorológicas e biométricas sobre as estimativas.

Material e métodos

O presente trabalho foi desenvolvido na Área Experimental de Irrigação da Fazenda Areão, Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo (USP), município de Piracicaba, SP, nas seguintes coordenadas geográficas: 22°42'30" S; 47°30'00" W; altitude de 546m.

Os estudos foram realizados em um pomar de lima ácida 'Tahiti' (*Citrus latifolia*, Tanaka), com área de 5975 m², enxertado em limoeiro 'Cravo', com idade de sete anos e espaçamento de 8m x 7m, irrigado por microaspersão, formando um bulbo molhado de 4 m de diâmetro sob as árvores, as quais tinham altura média de copa de 4,5m. As adubações, o controle de ervas daninhas e os tratamentos fitossanitários foram realizados regularmente. O solo é classificado como Terra Roxa Estruturada (Nitrosolo Vermelho), com declividade média de 8,5%.

As medidas foram realizadas em duas épocas com diferentes condições regionais de disponibilidade hídrica no solo. A primeira série de medidas ocorreu entre os dias 15 (15 de Janeiro) e 49 (18 de fevereiro) de 2000, utilizando-se 24 dias sem problemas com os equipamentos de medidas. Devido à falta de equipamentos, as medidas de fluxo de seiva durante o verão não foram feitas simultaneamente nas duas árvores, mas alternando o instrumental entre as árvores. A segunda série foi realizada entre os dias 174 (22 de junho) e 195 (13 de julho) de 2000, período esse precedido por cerca de 40 dias sem chuvas.

Em ambas as fases experimentais, foram instalados sensores de fluxo de seiva em duas árvores

representativas quanto ao porte e posicionadas no centro do pomar. O fluxo de seiva foi determinado pelo método do balanço de calor (SAKURATANI, 1981; BAKER & VAN BAVEL, 1987) com sensores construídos pelos autores. Devido à grande dimensão e à irregularidade dos troncos, foram instalados três sensores em cada árvore sobre os três ramos principais, obtendo-se o fluxo de seiva total pela integração das medidas dos ramos.

Os sensores eram constituídos de uma jaqueta térmica dissipadora de calor, construída com fio de constantan AWG 24, fixado em forma de zig-zag em uma placa de silicone com 2 mm de espessura. A jaqueta dissipadora foi montada de forma solidária a um fluxímetro construído com uma placa de espessura homogênea (1 mm) de silicone, sobre a qual foi fixado um circuito de termopar de cobre-constantan, com 4 linhas de 4 junções cada, distribuídas simetricamente nos dois lados da placa (total de 16 junções em cada lado). Sondas de temperatura, compostas de termopares de cobre-constantan, foram inseridas aos pares na parte superior e inferior dos limites de volume amostrado no ramo, para estimativa dos fluxos axiais de condução de calor. Na altura média do volume amostrado, foi introduzida uma sonda para medida de temperatura média do volume, para determinação da variação do armazenamento de calor. O comprimento do caule envolvido com o sensor foi equivalente a 1,5 vez o seu diâmetro, constituindo um volume aproximadamente cilíndrico no qual os fluxos do balanço de calor foram considerados. Duas placas de neopreno de 1,0 cm de espessura e, sobre elas, de três a quatro lâminas de papel aluminizado foram usadas como isolante térmico e para proteger a área amostrada contra a incidência direta de radiação solar. Visando a evitar a entrada de água nos sensores, utilizou-se uma camada de cola de silicone para vedar os espaços entre as folhas aluminizadas e os ramos, minimizando os efeitos prejudiciais da umidade nas medidas e também sobre os ramos das árvores. Os sensores foram alimentados eletricamente por fontes estabilizadas de corrente contínua, que dissipavam potências entre 1 e 3 W, dependendo do diâmetro do tronco, sendo seus sinais e aqueles provenientes das medidas micrometeorológicas medidos com um sistema de aquisição de dados (CR7, Campbell Scientific). Os valores de fluxo de seiva foram calculados segundo os procedimentos propostos por VALANCOGNE & NASR (1993) e acumulados para 24 horas, somando-se os valores dos três sensores instalados para obtenção do fluxo total da árvore (FS).

Os sensores de medidas micrometeorológicas foram instalados em uma torre no centro do pomar, sendo a aquisição de dados realizadas a cada 10 segundos, com médias calculadas e armazenadas a cada 15 minutos. Para medida do saldo de radiação (R_n), utilizou-se um saldo-radiômetro (Q7, REBS), posicionado a uma altura de 7m da superfície do solo. Para a medida da temperatura do ar e da pressão parcial de vapor foram utilizados psicrômetros ventilados (MARIN et al., 2001a), posicionados a 2,5m, mesma altura de medida da velocidade do vento (OA14, MET ONE INSTRUMENTS), por ser essa a altura média das copas, seguindo recomendação de LANDSBERG & JONES (1981).

A estimativa da transpiração máxima das árvores de lima ácida 'Tahiti', com medida do fluxo de seiva, foi feita empregando-se o modelo de Penman-Monteith (MONTEITH, 1965) adaptada para a estimativa da transpiração de uma folha hipoestomática na forma da equação (1).

$$T = AF \frac{s Rn_{ef} + 900 r cp \frac{\Delta e}{ra}}{1 \left[s + g \left(2 + \frac{rc}{ra} \right) \right]} \quad (1)$$

em que T é a transpiração máxima ($\text{kg árvore}^{-1} 15\text{min}^{-1}$); AF é a área foliar da árvore (m^2); Rn_{ef} é a energia radiante absorvida por unidade de área foliar ($\text{MJ m}^{-2}\text{folha } 15\text{min}^{-1}$); ra é a resistência aerodinâmica à difusão de vapor (s m^{-1}); rc é a resistência da cobertura à difusão de vapor (s m^{-1}); ρ é a densidade de ar (kg m^{-3}); cp é o calor específico do ar seco ($\text{J kg}^{-1}\text{K}^{-1}$); λ é o calor latente de vaporização da água (MJ kg^{-1}); γ é a constante psicrométrica ($\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$); Δe é o déficit de pressão de vapor do ar (kPa).

Os valores de Rn_{ef} foram determinados a partir da proposta RITCHIE (1972) para estimativa do saldo de radiação disponível ao processo de evaporação de água no solo sob uma cobertura vegetal. Nela, considera-se que a extinção de radiação de qualquer comprimento de onda pela copa pode ser descrita pela lei de Beer (equação 2), que prevê que a taxa de extinção de radiação é função exponencial do índice de área foliar (IAF) e do coeficiente de extinção (k) característico da vegetação.

$$Rn_{ab} = Rn_{ac} e^{(-k IAF)} \quad (2)$$

em que Rn_{ab} é o saldo de radiação abaixo da copa; Rn_{ac} é o saldo de radiação acima da copa; k é o coeficiente de extinção por unidade de índice de área foliar (adimensional) e IAF é o índice de área foliar (adimensional).

Visando a minimizar erros nessa estimativa, determinou-se o coeficiente de extinção (k) de uma das árvores de pomar com IAF conhecido, procedendo-se medidas de Rn acima (Rn_{ac}) e abaixo da copa com dois sensores durante quatro dias. O saldo radiômetro superior foi instalado sobre o centro geométrico da copa da árvore à altura de 7m da superfície do solo e, na altura de 1m foi instalado o saldo radiômetro inferior, na mesma direção. A partir dessas medidas, obteve-se o valor médio de k , igual a 0,67, utilizado na determinação de Rn_{ef} com a seguinte equação:

$$Rn_{ef} = \frac{Rn_{ac} \left(1 - e^{-k IAF} \right)}{IAF} \quad (3)$$

A resistência aerodinâmica (ra) das árvores ($s \cdot m^{-1}$) foi estimada com o modelo LANDSBERG & POWELL (1973), adaptado para estudos em plantas isoladas e que considera a proteção mútua das folhas, expresso na equação (4). A velocidade do vento foi medida a 2,5m do solo, equivalente a altura média das copas das plantas, seguindo recomendação de LANDSBERG & JONES (1981).

$$ra = 58 \cdot p^{0,56} \left(\frac{d}{u} \right)^{0,5} \quad (4)$$

em que p é a razão entre a área foliar e a área frontal (silhueta) de cada árvore; u é a velocidade do vento ($m \cdot s^{-1}$) e d é uma dimensão característica (m) das folhas.

Para as árvores estudadas, o fator p variou entre as épocas de medida, principalmente devido à variação na área foliar das árvores (Tabela 1). A área frontal ou silhueta (S) das árvores foi calculada a partir de medidas de sua altura (H), da distância entre o solo e a parte inferior das copas (D) e de seu maior diâmetro (ϕ), considerando-se que as copas tinham forma de elipse, obtendo-se S (m^2) pela seguinte equação:

$$S = \frac{[(H - D) + \Phi]^2 \cdot p}{16} \quad (5)$$

A dimensão característica das folhas foi considerada como sendo igual a raiz quadrada da área média das folhas da árvore. A área média de cada folha (Af) foi determinada fazendo-se a contagem de todas as folhas de ambas as árvores estudadas, e medindo-se o maior comprimento (C) e a maior largura (L) de aproximadamente 15% delas, obtendo-se valor médio de 23 cm^2 a partir da seguinte relação:

$$\overline{Af} = C \cdot L \cdot 0,71 \quad (6)$$

sendo que o valor 0,71 é um fator de ponderação para a forma das folhas. Multiplicando-se o número de folhas de cada árvore pela área média das folhas, foi possível obter a área foliar total de cada árvore (Tabela 1).

O sub-modelo para rc utilizado neste estudo seguiu a proposição de MARIN *et al.* (2001b), que utilizaram as equações (7) e (8) para a estimativa dessa resistência em árvores de lima ácida 'Tahiti' horários entre as 10 e 15 horas.

$$rc = \frac{r \cdot cp \cdot \Delta e}{g \cdot 0,78 \cdot Rn_{ef}} - 2ra \quad \text{primavera/verão} \quad (7)$$

$$rc = \frac{r \cdot cp \cdot \Delta e}{g \cdot 0,67 \cdot Rn_{ef}} - 2ra \quad \text{outono/inverno} \quad (8)$$

Nos demais horários do dia e em todas as estações do ano, utilizou-se a equação (9) para a estimativa de rc .

$$rc = \frac{r \cdot cp \cdot \Delta e}{g \cdot Rn_{ef}} - 2ra \quad (9)$$

Tabela 1. Valores do fator p e de área foliar AF (m^2) das árvores utilizadas para medidas de fluxo de seiva durante os dois períodos do experimento.

Árvore	Janeiro		Julho	
	p	AF	p	AF
1	6,5	48	6,3	64
2	7,4	99	7,9	87

As estimativas de transpiração foram comparadas com as medidas de fluxo de seiva, ambas integradas para períodos de 24 horas, utilizando-se a análise de regressão para a verificação da exatidão pelo coeficiente de determinação das equações de regressão (R^2) e da precisão pelo coeficiente angular das equações (b).

Resultados e discussão

Antes de avaliar o desempenho do modelo de Penman-Monteith, é necessário discutir os resultados e as formas de estimativa das variáveis r_c , $R_{n_{ef}}$ e r_a , para as quais foram usados sub-modelos. Evidentemente, o desempenho do modelo é afetado pela forma de estimativa dessas variáveis.

De acordo com MARIN et al. (2001b), as maiores discrepâncias entre os dados de r_c medidos com porômetros e estimados com as equações (7) a (9) são verificadas no início e no final do período diurno, seja por um déficit de pressão de vapor muito próximo de zero no início da manhã, seja por valores de $R_{n_{ef}}$ tendendo para zero no final da tarde. Interessante notar que nesses horários a transpiração é normalmente reduzida, o que diminui a importância desses possíveis erros de estimativa da r_c na determinação da transpiração diária. Além disso, os valores estimados com o sub-modelo foram próximos daqueles usualmente medidos em plantas cítricas em diversas condições de cultivo e de clima.

A variação do coeficiente de extinção é apresentada na Figura 1, calculado a partir das medidas de saldo de radiação acima e abaixo da copa de uma árvore com IAF de 3,5. Para os quatro dias de medida, mesmo sob condições de nebulosidade variável, houve uma pequena variação do coeficiente de extinção ao longo dos dias, o que seria esperado pois as condições de nebulosidade afetam o balanço de radiação, tornando o componente de ondas longas relativamente mais importante no balanço global. Essa relativa estabilidade do valor de k ao longo desses dias permite inferir que o valor médio obtido pode ser aplicado para uma ampla faixa do espectro de radiação. A variabilidade de k em diferentes faixas do espectro é destacada por CAMPBELL & NORMAN (1998) como uma possível fonte de erro em estudos envolvendo a extinção do saldo de radiação em coberturas vegetais, o que neste trabalho parece não ter sido de grande importância.

Deve-se ressaltar, também, que essa teoria pode apresentar alguma limitação ao ser aplicada em estudos de coberturas vegetais, por ter sido desenvolvida para um meio homogêneo e isotrópico atravessado por radiação monocromática. WAGONNER (1975), estudando a extinção do saldo de radiação em uma laranjeira adulta, não encontrou erros expressivos na aplicação prática da Lei de Beer, indicando que a adaptação proposta neste trabalho é passível de ser empregada em estudo envolvendo espécies de citros.

As estimativas da resistência aerodinâmica pelo modelo de LANDSBERG & POWELL (1973) resultaram em valores médios diários por volta de 50 s m^{-1} para ambas as árvores. A Figura 2 mostra a variação diurna de r_a para as duas árvores estudadas, da velocidade do vento e da variação da relação r_c/r_a ao longo do dia 175. A variação de r_a ao longo desse dia ficou entre 55 s m^{-1} e 30 s m^{-1} para ambas as árvores, o que se deve, principalmente, ao fato do regime de ventos a 2,5m de altura ser bastante afetado pela vegetação, com velocidade sempre inferior a $2,5 \text{ m s}^{-1}$ durante esse dia. Tomando-se todo o conjunto de da-

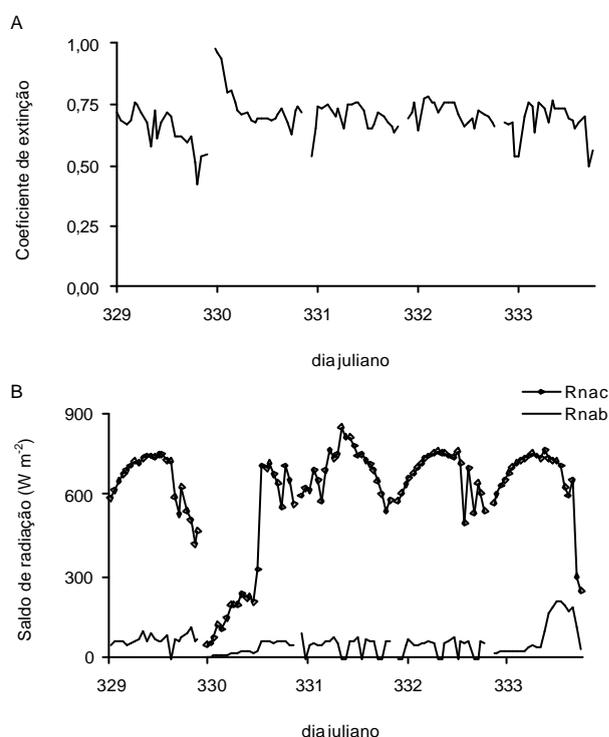


Figura 1. Variação diurna do coeficiente de extinção (A) e do saldo de radiação medido acima (R_{nac}) e abaixo (R_{nab}) da copa de uma árvore de lima ácida do pomar com índice de área foliar de 3,5, ao longo de quatro dias.

dos de ra, obteve-se um valor médio para a árvore 1 igual a $40,8 \text{ s m}^{-1}$, com desvio padrão de $8,8 \text{ s m}^{-1}$ e, para a árvore 2, média igual a $45,3 \text{ s m}^{-1}$ com desvio padrão de $9,9 \text{ s m}^{-1}$.

Esses valores são próximos dos encontrados por Kalma (1970) (apud KALMA & FUCHS, 1976), em pomar de laranjeiras recobrando mais de 80% da área de solo e indicam que os valores de ra estimados pelo modelo de LANDSBERG & POWELL (1973) tendem a manter-se relativamente estáveis entre 40 s m^{-1} e 50 s m^{-1} para pomares com diferentes frações de cobertura do solo. Segundo esses autores, os valores de ra, normalmente, são uma ordem de magnitude menor que os valores de rc, o que também foi verificado neste trabalho e é exemplificado na Figura 2. No dia apresentado, a razão entre rc/ra, passou de 1,2 por volta das 8h da manhã, para 84, no final do dia, com valor médio diurno de 18,9.

A transpiração máxima é a que ocorre em uma planta sem restrição hídrica, sendo considerada igual aos valores medidos de fluxo de seiva quando integrados para períodos de 24 horas (VALANCOGNE & NASR, 1993). A Figura 3 mostra a relação entre a transpiração máxima estimada com o modelo de Penman-Monteith e os dados de fluxo de seiva obtidos nas duas árvores. Tomando-se por base os coeficientes de determinação (R^2) e angular (b), verifica-se que a melhor concordância ocorreu com os dados provenientes da árvore 2, com elevada exatidão ($b=1,02$) e precisão ($R^2=0,81$) das estimativas em re-

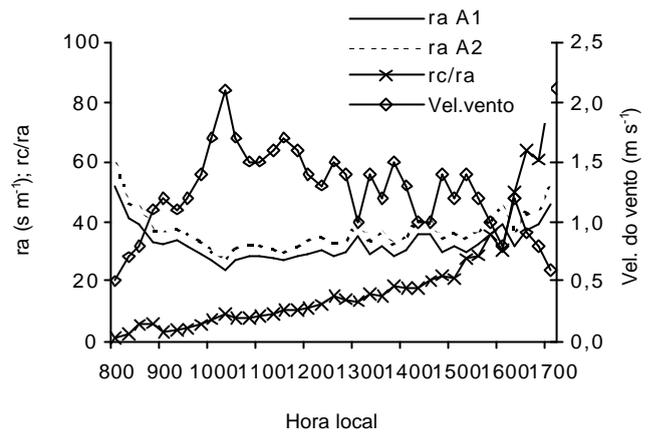


Figura 2. Variação diurna da resistência aerodinâmica (ra) das árvores 1 (A1) e 2 (A2), da velocidade do vento e da relação entre a resistência de cobertura e a resistência aerodinâmica (rc/ra) em pomar de lima ácida "Tahiti" em Piracicaba, SP.

lação ao fluxo de seiva. Já para a árvore 1, houve elevada exatidão nas estimativas ($b=0,99$), mas a precisão foi reduzida devido à elevada dispersão dos dados de inverno, principalmente.

Apesar da boa concordância entre a estimativa da transpiração e a medida do fluxo de seiva, deve ser observada uma certa ressalva, pela ausência de um segundo método independente de medida da transpiração das plantas, que avalize as medidas obtidas com o método do balanço de calor no caule.

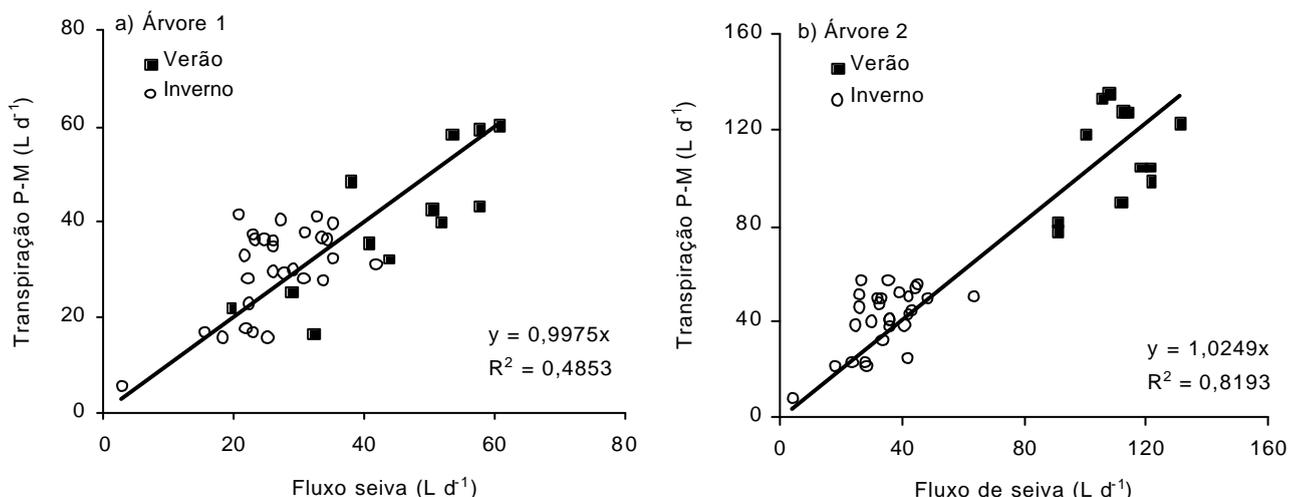


Figura 3. Relação entre a transpiração estimada com o método de Penman-Monteith (P-M) e as medidas de fluxo de seiva integradas para períodos de 24 horas para as duas árvores.

Procurou-se observar e controlar as fontes de erros nesse método, apontadas nos trabalhos de VALANCOGNE & NASR (1993), SHACHEL et al. (1992) e GUTIÉRREZ et al. (1994), mas as influências ambientais e aspectos inerentes à construção e instalação dos sensores podem causar erros nas medidas de fluxo de seiva, o que não permite tomá-lo como uma referência totalmente segura. Fica difícil determinar, portanto, quanto da dispersão entre os dois métodos observada, principalmente no período de inverno, é decorrente de problemas com o método de balanço de calor ou do modelo e sub-modelos adotados. Apesar dessas ressalvas, os resultados indicam a potencialidade de uso da metodologia aqui proposta, permitindo a estimativa de transpiração a partir de medidas micrometeorológicas e de variáveis biométricas da árvore.

Conclusões

Os sub-modelos de estimativa da r_c , $R_{n_{ef}}$ e r_a forneceram estimativas condizentes com o que seria hipoteticamente esperado, concordaram com valores obtidos em outros estudos e sua utilização no modelo de Penman-Monteith resultou em estimativas de transpiração máxima coerentes com dados de fluxo de seiva na escala diária, especialmente para a árvore de maior porte.

Referências bibliográficas

- BAKER, J.M.; VAN BAVEL, C.H.M. Measurements of mass flow of water in stems of herbaceous plants. **Plant, Cell and Environment**, Oxford, v. 10, p. 777-782, 1987.
- CAMPBELL, G.S.; NORMAN, J.M. **An introduction to environmental biophysics**. New York: Springer Verlag, 1998. 286 p.
- DAAMEN, C.C. et al. Energy flux measurements in a sheltered lemon orchard. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 93, p. 171-183, 1999.
- GREEN S.R.; MCNAUGHTON K.G. Modelling effective stomatal resistance for calculating transpiration from an apple tree. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 83, n. 1-2, p. 1-26, 1997.
- GUTIÉRREZ, M.V. et al. The effect of environmentally induced stem temperature gradients on transpiration estimates from the heat balance method in two tropical woody species. **Tree Physiology**, Victoria, v. 14, p. 179-190, 1994.
- KALMA, J.D.; FUCHS, M. Citrus orchards. In: **Vegetation and the atmosphere**, v. 1, New York: Academic Press, 1976. p. 309-328.
- LANDSBERG, J.J.; JONES, H.G. Apple orchards. In: KOSLOWSKI, T.T. (Ed.). **Water deficits and plant growth: wood plants community**. New York: Academic Press, 1981. v. 4, p. 419-469.
- LANDSBERG, J.J.; POWELL, D.B.B. Surface exchange characteristics of leaves subject to mutual interference. **Agricultural meteorology**, Amsterdam, v. 12, p. 169-184, 1973.
- MARIN, F.R. et al. Construção e avaliação de psicrômetro aspirado de termopar. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 58, n. 4, p. 839-844, 2001a.
- 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**, Santa Maria, v. 9, n. 2, p. 227-233, 2001b.
- MONTEITH, J.L. Evaporation and environment. **Symposium of Society of Experimental Biology**. Cambridge, v. 19, p.205-234. 1965
- RITCHIE, J.E. Model for predicting evaporation from a row crop with incomplete cover. **Water Resources Research**, Washington, v. 8, n. 5, p. 1204-1213, 1972.
- SAKURATANI, T. A heat balance method for measuring water sap flow in the stem of intact plant. **Journal of Agricultural Meteorology**, Tokyo, v. 39, n. 1, p. 9-17, 1981.
- SHACKEL, K.A.; JOHNSON, R.S.; MEDAWAR, C.K. Substantial errors in estimates of sap flow using the heat balance technique on woody stems under field conditions. **Journal of the American Society for Horticultural Science**, London, v. 117, n. 2, p. 351-356, 1992.
- THORPE, M.R. Net radiation and transpiration of apple trees in rows. **Agricultural Meteorology**, Amsterdam, v. 19, p. 41-57, 1978.
- VALANCOGNE, C. et al. Influence of orchard and vineyard characteristics on maximal plant transpiration. **Acta Horticulturae**, Hague, n. 537, p. 61-68, 2000.
- VALANCOGNE, C.; NASR, Z. A heat balance method for measuring sap flow in small trees. In: BORGHETTI, M.; GRACE, J.; RASCHI, A. (eds.). **Water transport in plants under climatic stress**, Cambridge: Cambridge University Press, 1993. p. 66-173.
- WAGONNER, P.E. Micrometeorological models. In: MONTEITH, J.L. (ed.) **Vegetation and atmosphere**, vol. 1, New York: Academic Press, 1975. p. 205-228.