

ISSN 0104-1347

Estimativa da transpiração máxima de macieiras, em pomares irrigados, pelo método de Penman adaptado

Estimation of maximum transpiration of apple trees in irrigated orchards by an adaptation of the Penman's method

Nilson Augusto Villa Nova¹, Luiz Roberto Angelocci¹, Charles Valancogne², Paulo César Sentelhas³, Antonio Roberto Pereira¹ e Fábio Ricardo Marin⁴

Resumo - É proposta uma adaptação do modelo de Penman (1963) para a estimativa diária da transpiração de árvores, utilizando a área foliar como variável relativa à planta. Os valores obtidos pelo modelo adaptado foram comparados com valores diários de transpiração (fluxo de seiva) determinados através do método do balanço de calor, na região de Bordeaux, França, nos anos de 1988 e 1989 em macieiras cuja área foliar variou aproximadamente de 4 a 20 m². A partir dos resultados obtidos verificou-se que o método proposto apresentou excelente concordância com os valores de fluxo de seiva nos dois anos avaliados.

Palavras-chave: área foliar, fluxo de seiva, método de balanço de calor.

Abstract - The paper suggests an adaptation of the Penman's method (1963) to estimate maximum daily transpiration of trees, by using the leaf area as the plant variable. The values obtained from the model were compared with values of daily transpiration (sap flow), determined by means of the trunk heat balance method, in 1988 and 1989, in apple trees with leaf area ranging from 4 to 20 m² in two irrigated orchards in the Bordeaux region, France. The values of maximum transpiration estimated by the proposed procedure had a very good agreement with sap flow data when considered both years evaluated.

Key words: leaf area, sap flow and heat balance method.

Introdução

A transpiração de plantas é uma variável dependente das condições meteorológicas, do solo e da planta, sendo portanto de difícil medida no campo, principalmente em plantas de grande porte, tais como árvores frutíferas. Nesse caso, entre os métodos de estimativa desse processo biofísico destacam-se os que utilizam a medida do fluxo de seiva por fornecimento de calor ao tronco ou ramo. Dentre eles, o método de balanço de calor (SAKURATANI, 1981), vem sendo bastante utilizado em estudos de relações

hídricas em lenhosas frutíferas como, por exemplo, macieira (VALANCOGNE & NASR, 1993; WEIBEL & DE VOS, 1994), pessegueiro (SHACKEL et al., 1992), noqueira pecã (STEINBERG et al., 1990) e videira (BRAUN & SCHMID, 1999). VALANCOGNE & NASR (1993) demonstraram que para macieiras de pequeno porte (com diâmetro do tronco entre 4 e 8 cm) e sem deficiência hídrica, o fluxo de seiva determinado por esse método pode representar bem a transpiração da árvore na escala diária.

¹Professor Associado. Departamento de Ciências Exatas, ESALQ/USP. Caixa Postal 9, 13418-900. Piracicaba, SP. Bolsista do CNPq.

²Pesquisador, Unité de Bioclimatologie, INRA, Bourdeaux, França.

³Professor Doutor. Departamento de Ciências Exatas. ESALQ/USP.

⁴Doutorando do PPG em Física do Ambiente Agrícola. Departamento de Ciências Exatas. ESALQ/USP. Bolsista da FAPESP.

Apesar da grande aplicação dos métodos baseados em fornecimento de calor, eles apresentam fontes de erro e certas restrições que dificultam seu uso rotineiro em árvores nas condições de campo, sendo mais indicados para uso em pesquisa. Desse modo, para aplicações práticas, é altamente desejável a utilização de modelos de estimativa, que levem em consideração os elementos meteorológicos, além de outras variáveis/parâmetros da planta.

A equação de Penman-Monteith tem sido adaptada para o cálculo da transpiração em folhas e utilizada na estimativa da transpiração de macieiras. Tem-se encontrado boa concordância entre as estimativas assim feitas e a transpiração medida em uma árvore do pomar (THORPE, 1978) e com a transpiração estimada pelo fluxo de seiva no caule (GREEN *et al.*, 1995; ANGELOCCI, 1996). A aplicação da equação de Penman-Monteith nessa forma, além do conhecimento dos dados meteorológicos nas condições do ambiente de crescimento da planta (saldo de radiação da copa, temperatura e déficit de saturação de vapor do ar, velocidade do vento), exige a avaliação de variáveis/parâmetros da planta, tais como a condutância à difusão de vapor da folha e a condutância aerodinâmica, as quais apresentam grandes dificuldades, juntamente com o saldo de radiação da copa, para sua determinação.

O presente trabalho propõe um procedimento de estimativa da transpiração de árvores isoladas, baseado numa adaptação do modelo de PENMAN (1963), o qual dispensa a utilização das condutâncias à difusão de vapor e aerodinâmica e do saldo de radiação da copa, bem como sua avaliação a partir de dados de fluxo de seiva no caule.

Material e métodos

O procedimento utilizado baseia-se na equação de PENMAN (1963) para estimativa da evapotranspiração potencial (ETP) na escala diária:

$$ETP = \frac{W}{I} Rn + \frac{6,43}{I} (1 - W)(1 + 0,526U)\Delta e \quad (1)$$

sendo ETP expressa em $L\ m^{-2}\ d^{-1}$, W um fator de ponderação dependente da temperatura do ar e do coeficiente psicrométrico, Rn o saldo de radiação ($MJ\ m^{-2}\ d^{-1}$), U a velocidade do vento a 2m de altura ($m\ s^{-1}$), Δe o déficit de saturação de vapor do ar (kPa), e λ o calor latente da água ($2,45\ MJ\ kg^{-1}$ a $20^\circ C$).

A equação (1) utiliza variáveis que definem a evapotranspiração potencial de uma cobertura vegetal hipotética, sob condições específicas definidas pela FAO (ALLEN *et al.*, 1998), nas quais se admite área coberta com $2,88\ m^2$ de superfície foliar desse tipo de vegetação por metro quadrado de terreno. A hipótese adotada no presente estudo é de que o volume de água evapotranspirada nessas condições, por unidade de área de superfície foliar, é representativa da transpiração máxima (T) da espécie arbórea estudada, de modo que na estimativa da transpiração da árvore basta multiplicar o valor de $(ETP/2,88)$ pela área foliar da árvore.

O cálculo de T por unidade de área foliar (AF) da cobertura e considerando-se $\lambda = 2,45\ MJ\ m^{-2}\ d^{-1}$, transforma a equação (1) na equação (2):

$$T / AF = \frac{W Rn}{2,88 * 2,45} + \frac{6,43}{2,88 * 2,45} (1 - W)(1 + 0,526U)\Delta e \quad (2)$$

ou simplificando, em:

$$T / AF = 0,142W.Rn + 0,911(1 - W)(1 + 0,526U)\Delta e \quad (3)$$

resultando em:

$$T = [0,142W.Rn + 0,911(1 - W)(1 + 0,526U)\Delta e]AF \quad (4)$$

O modelo foi aplicado para estimar a transpiração de macieiras em período de crescimento, cultivadas em dois pomares irrigados por gotejamento na região de Bordeaux, sudoeste da França, conduzidos em sistema de renque e os valores obtidos foram comparados com os fluxos de seiva diários obtidos com o método do balanço de calor descritos em ANGELOCCI (1996), considerados como representativos da transpiração na escala diária. Da série de dados publicados de fluxo de seiva, foram selecionadas as medidas no mês de julho de 1988 e 1989, com 12 e 13 dias respectivamente. Esse mês foi escolhido porque os sensores de fluxo de seiva tinham sido recém instalados, o que evitou o uso de dados de períodos posteriores, que poderiam apresentar problemas devido ao tempo no qual os sensores ficaram instalados no caule. No primeiro ano, o estudo foi realizado em pomar de 3,5 ha com a variedade Granny Smith, em local próximo a Bergerac (lat.: $44^\circ 51' N$, long. $0^\circ 30' E$, alt. 27 m), com árvores de 6 anos de idade (espaçamento 4,0 x 1,0 m); no segun-

do, numa área de 2,2 ha com a variedade Oregon, na região de Langon (lat.: 44°50'N, long. 0°50'W, alt. 10 m), com plantas de 3 a 5 anos alternadas na linha de plantio (espaçamento 4,7 x 1,6 m). Foram utilizadas 5 árvores em 1988 e 8 em 1989, com áreas foliares variando, aproximadamente, de 4 a 20 m² (Tabela 1).

Foram utilizados dados meteorológicos, com valores médios diários, medidos no próprio pomar. Em 1988 foram medidos: a) saldo de radiação a 9 m acima da superfície do solo, posicionado sobre uma linha de plantio; b) a temperatura e a umidade relativa do ar com psicrômetros aspirados de termopar construídos no Laboratório de Bioclimatologia, INRA, em Bordeaux, instalados a várias alturas desde 1,0 até 13,55 m acima da superfície do solo (como os psicrômetros foram instalados no mês de agosto, cerca de um mês após o início das medidas de fluxo de seiva, fez-se uma análise de regressão entre os valores diários de déficit de pressão de vapor do ar (Δe) obtidos em uma estação meteorológica padrão e no pomar a 5,12 m da superfície do solo, altura essa em que mais se aproximaram os valores de temperatura do ar dos dois locais); c) velocidade do vento, medida a vários níveis acima da superfície do solo, tendo-se utilizado no trabalho as medidas feitas a 4,09 m (próximo ao topo das copas) e a 5,28 m.

Em 1989, os mesmos elementos foram medidos, sendo o saldo de radiação determinado pelo uso de um saldo radiômetro a 4,73 m acima da superfície do solo, sobre a linha de plantio, dois psicrômetros aspirados (a 2,0 m e 5,12 m acima da superfície do solo), e dois anemômetros, a 3,20 m e 5,12 m de altura. Os dados meteorológicos obtidos são apresentados na Tabela 2. Mais detalhes das medidas meteorológicas e de fluxo de seiva podem ser obtidos em ANGELOCCI (1996). Para o caso da velocidade do vento foram utilizados tanto valores médios de medidas feitas a duas alturas, como o valor obtido no nível superior.

Os procedimentos para determinação da área foliar, bem como a demonstração da existência de relação linear entre o fluxo de seiva diário e a área

Tabela 1. Valores estimados de área foliar (m²) de cada árvore utilizada nos dois anos.

Ano	Árvore							
	1	2	3	4	5	6	7	8
1988	9,3	11,3	4,7	7,5	8,1	-	-	-
1989	20,6	15,7	7,8	4,8	16,7	20,1	4,3	3,9

foliar nas condições experimentais encontram-se em ANGELOCCI & VALANCOGNE (1993).

Os dados medidos e estimados de T foram comparados através da análise de regressão, forçando-se a origem em zero ($a = 0$), sendo que o valor do coeficiente angular (b) foi empregado como um indicador da exatidão, enquanto o coeficiente de determinação (r^2) um indicador da precisão das estimati-

Tabela 2. Dados meteorológicos utilizados nos anos de 1988 e 1989. (Rn = saldo de radiação, T = temperatura média do ar, Δe = déficit de pressão de vapor, $U_{x,m}$ = velocidade média do vento a x m de altura, sendo x igual a 4,5 e 5,28m em 1988 e igual a 4,0 e 5,12m em 1989).

Dados Meteorológicos - 1988						
DJ*	Rn MJm ⁻² d ⁻¹	T °C	W	Δe kPa	$U_{4,5,m}$ m.s ⁻¹	$U_{5,28,m}$ m.s ⁻¹
184	8,1	16,8	0,66	0,13	1,31	1,57
186	11,1	18,5	0,67	0,34	0,75	0,90
188	18,2	19,3	0,68	0,39	0,41	0,50
191	15,9	19,5	0,68	0,46	0,45	0,54
192	19,1	21,3	0,70	0,50	0,49	0,59
198	16,4	17,6	0,66	0,39	0,60	0,72
199	18,7	19,1	0,68	0,48	0,45	0,54
200	18,7	20,5	0,69	0,46	0,30	0,36
201	11,7	21,9	0,71	0,53	0,60	0,72
203	16,2	22,2	0,70	0,34	0,45	0,54
205	9,3	23,4	0,72	0,31	0,87	1,04
206	15,4	19,1	0,67	0,42	0,83	0,99

Dados Meteorológicos - 1989						
DJ*	Rn MJm ⁻² d ⁻¹	T °C	W	Δe kPa	$U_{4,0,m}$ m.s ⁻¹	$U_{5,1,m}$ m.s ⁻¹
182	12,7	20,7	0,69	1,65	1,68	1,98
184	18,5	19,7	0,67	1,69	1,73	2,14
185	17,7	22,5	0,72	2,08	1,62	1,80
186	10,2	22,0	0,71	1,90	1,10	1,36
187	11,3	21,8	0,73	1,54	1,40	1,71
190	5,42	19,4	0,68	1,41	1,42	1,71
191	11,1	20,6	0,69	1,60	1,03	1,23
192	13,7	20,5	0,69	1,62	1,18	1,43
193	15,9	21,6	0,70	1,76	1,25	1,49
194	18,1	21,9	0,69	1,71	1,26	1,52
195	12,2	20,8	0,73	1,60	1,51	1,81
197	17,8	23,9	0,74	2,24	1,25	1,51
198	17,9	24,9	0,74	2,37	1,14	1,39

*DJ: Dia juliano.

**Valor médio entre as alturas de medida de 4,1 e 5,3m;

*** Valor médio entre as alturas de medida de 3,2 e 5,1m.

vas, assumindo-se a medida de fluxo de seiva como referência.

Resultados e discussão

As Figuras 1a, 1b e 1c mostram as relações encontradas entre a transpiração estimada pelo modelo adaptado, com o vento a cerca de 5m, e o fluxo de seiva diário, para cada ano estudado, assim como para os dois anos agrupados.

Apesar de terem sido feitas estimativas simulando-se duas formas de cálculo de velocidade média do vento, a primeira com a média das velocidades entre o ponto mais próximo da copa da

árvore e a segunda referente ao nível de 5,3 m (1988) e 5,1 m (1989), o uso dos dois critérios não causou efeito significativo sobre as relações encontradas (Tabela 3), indicando que tanto o critério da média entre as duas alturas como o do uso da velocidade do vento a uma altura de cerca de 2 m acima da copa pode ser usado.

Apesar do grande número de aproximações contidas na estimativa da transpiração, incluindo-se aquelas referentes às medidas meteorológicas no pomar, a concordância entre a estimativa da transpiração e a medida do fluxo de seiva foi excelente em todos os casos. É evidente que a conclusão do desempenho do modelo usado é prejudicada pelo fato de que a medida do fluxo de seiva apresenta problemas, devi-

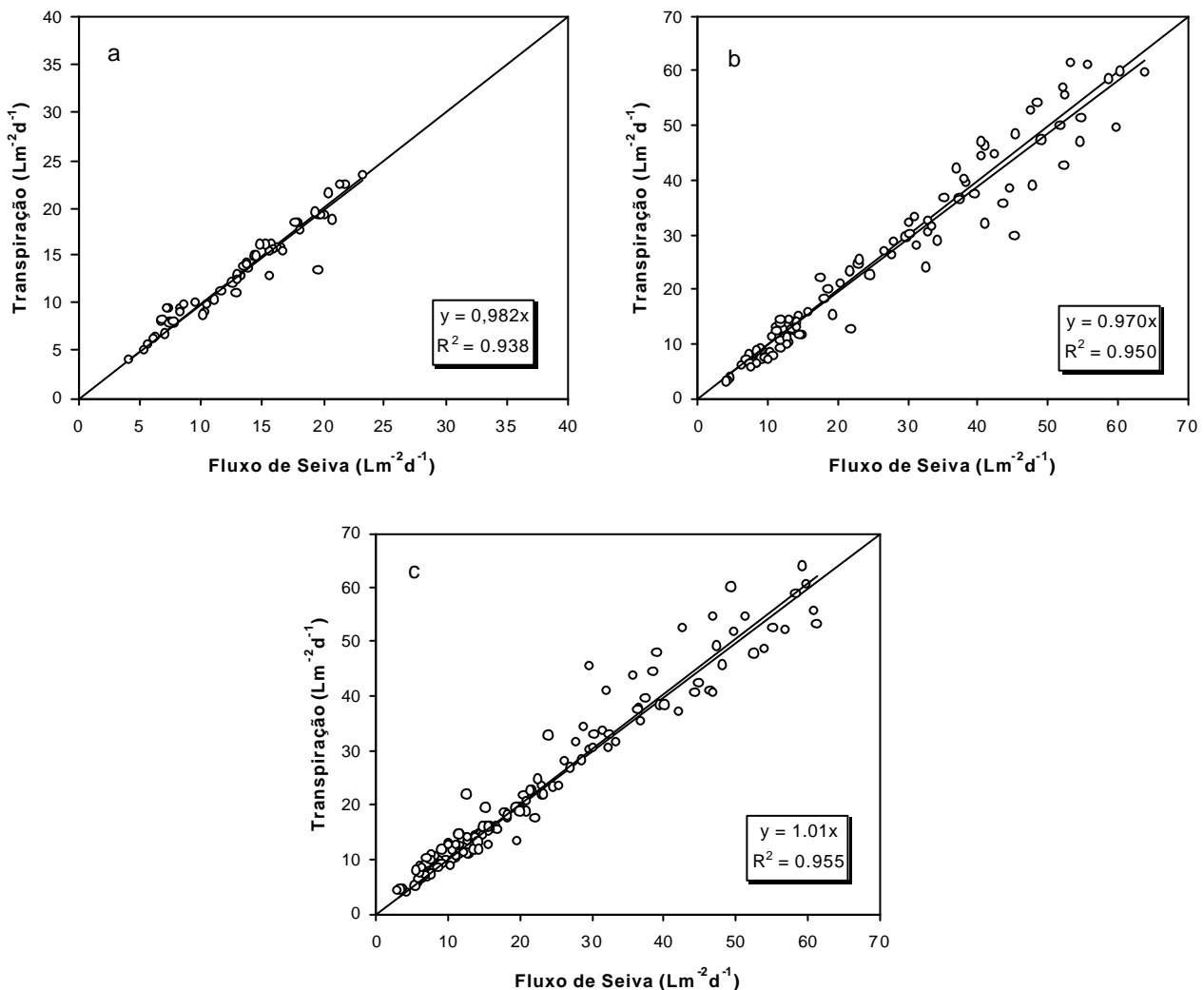


Figura 1. Relação entre a transpiração estimada pelo modelo adaptado e o fluxo de seiva de árvores de macieira, na região de Bordeaux, França, nos anos de 1988 (a), 1989 (b) e nos dois anos conjuntamente (c).

do às fontes de erro encontradas no método de balanço de calor. Deve-se lembrar, também, que a adoção do fluxo de seiva como indicativo da transpiração diária em lenhosas representa uma aproximação.

Portanto, o procedimento aqui proposto apresenta-se altamente promissor e representa uma vantagem em relação ao próprio uso do fluxo de seiva para monitoramento cotidiano do consumo de água por árvores em pomares, devido às dificuldades apresentadas no uso prático dos métodos de determinação do fluxo de seiva.

Para o ano de 1988, VALANCOGNE et al. (1993) relacionaram os valores de evapotranspiração pelo método de Penman e a transpiração estimada pelo fluxo de seiva, expressas em lâmina de água, encontrando desvio acentuado da linha 1:1 entre ambas. Entretanto, quando correlacionaram a transpiração diária na forma de calor latente com o termo radiativo da equação de Penman, calculado com a radiação solar global absorvida pela copa (ambos expressos em $\text{MJm}^{-2}\text{d}^{-1}$), houve boa concordância entre essas variáveis, próxima da linha 1:1, o que permite se ter um procedimento simples de cálculo da transpiração média diária do pomar, embora haja a necessidade de se conhecer a radiação solar interceptada pela copa. O procedimento descrito no presente trabalho é diferente no sentido de que permite determinar a transpiração individual de árvores sem essa necessidade de determinação da radiação absorvida pela copa, embora seja exigida a determinação da área foliar.

O uso de dados meteorológicos na estimativa da transpiração máxima, ou seja, aquela que ocorre com o solo sob condições de umidade favoráveis, na forma aqui descrita, é bastante simples e exige instrumental menos complexo para operação do que os métodos de determinação do fluxo de seiva por fornecimento de calor ao tronco. O procedimento aqui proposto é mais simples, também, do que o uso do modelo de Penman-Monteith adaptado para estimativa da transpiração máxima de macieiras, como proposto por GREEN et al. (1995) e ANGELOCCI (1996), onde são exigidas variáveis difíceis de serem determinadas, como o saldo de radiação na copa e as resistências à difusão de vapor.

Um problema que se apresenta no procedimento descrito e que ocorre, também, no uso do modelo de Penman-Monteith para a estimativa da transpiração máxima é a exigência do conhecimento

Tabela 3. Coeficiente angular (b) e de determinação (R^2) para as relações entre a transpiração estimada pelo modelo adaptado e o fluxo de seiva de árvores de macieira, na região de Bordeaux, França, nos anos de 1988 e 1989, empregando-se diferentes critérios (alturas) para o uso da velocidade do vento (U).

Ano	Velocidade do vento	b	R^2
1988	$U_{4,5\text{m}}$	0,978	0,937
	$U_{5,3\text{m}}$	0,982	0,938
1989	$U_{4,0\text{m}}$	0,999	0,941
	$U_{5,1\text{m}}$	0,970	0,950

da área foliar da árvore. O grande número de folhas e conseqüentemente a elevada área foliar de árvores exige o uso de métodos expeditos, como o medidor de área foliar por interceptação da radiação.

A metodologia de cálculo aqui descrita funcionou bem para a macieira, nas condições experimentais de cultivo e ambientais em dois anos distintos, o que suporta bem a conclusão da potencialidade do seu emprego. Mas, é evidente que a sua aplicabilidade em outras espécies ou em outras situações de cultivo precisa ser melhor investigada.

Conclusões

O método proposto para a estimativa da transpiração máxima de árvores de macieiras em pomares irrigados teve excelente desempenho quando comparado com as medidas de fluxo de seiva, ficando evidente sua potencialidade de emprego. Devido ao grau de empirismo empregado no referido modelo, a aplicação em outras espécies ou em condições de crescimento/desenvolvimento das plantas e de clima diferentes das utilizadas deve ser testada.

Referências bibliográficas

ALLEN, R.G et al. **Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements.** Rome: FAO, 1998. 301 p. (Irrigation and Drainage Paper 56).

ANGELOCCI, L.R. **Estimativa da transpiração máxima em macieiras (*Malus spp*) em pomares pelo método de Penman-Monteith.** Piracicaba: ESALQ/USP,

1996. 95 p. Tese (Livre-Docência) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz". Universidade de São Paulo, 1996.

ANGELOCCI, L.R.; VALANCOGNE, C. Leaf area index and water flux in apple trees. **Journal of Horticultural Science**, London, v. 68, n. 2. p. 299-307, 1993.

BRAUN, P.; SCHMID, J. Sap flow measurements in grapevines (*Vitis vinifera* L.). 1 – Stem morphology and use of the heat balance method. **Plant and Soil**, Haia, v. 215, p. 39-45, 1999.

GREEN, S.R. et al. Measurement of the increased PAR and net all-wave radiation absorption by an apple tree caused by applying a reflective ground covering. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 76, p. 163-183, 1995.

PENMAN, H.L. **Vegetation and Hydrology**. Farnham Royal: Common Wealth Agricultural Bureaux, 1963. 124 p. (Technical Communication, 53).

SAKURATANI, T. A heat balance method for measuring water sap flow in the stem of intact plant. **Journal Agricultural Meteorology**, Tokyo, v. 37, p. 9-17, 1981.

SCHACKEL, K.A. et al. Substantial errors in estimates of sap flow using the heat balance technique on woody stems under field conditions. **Journal of American Society of Horticultural Science**, Geneva, v. 117, p. 351-356, 1992.

STEINBERG, S.L.; VAN BAVEL, C.H.M.; MCFARLAND, M.J. Improved sap flow gauge for ~~woody and herbaceous plants~~ **Agronomy Journal**, Madison, v. 81, p. 851-854, 1990.

THORPE, M.R. Net radiation and transpiration of apple tree in rows. **Agricultural Meteorology**, Amsterdam, v. 19, p. 41-57, 1978.

THORPE, M.R.; WARRIT, B.; LANDSBERG, J.J. Responses of apple leaf stomata: a model for single leaves and whole tree. **Plant, Cell and Environment**, Oxford, v. 3, p. 23-27, 1980.

VALANCOGNE, C.; NASR, Z. A heat balance method for measuring sap flow in small trees. In: BORGHETTI, M.; GRACE, J.; RASCHI, A. **Water transport in plants under climatic stress**. Cambridge: Cambridge University Press, 1993. p. 166-173.

VALANCOGNE, C. et al. Evaluation of transpiration of apple trees and measurement of daily course of water flow within the main branches of walnut trees. In: BORGHETTI, M., GRACE, J., RASCHI, A. **Water transport in plants under climatic stress**. Cambridge: Cambridge University Press, 1993. p. 219-227.

WEIBEL, F.P.; DE VOS, J.A. Transpiration measurements on apple trees with an improved stem heat balance technique. **Plant and Soil**, Haia, v. 166, p. 203-219, 1994.

