

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RECÔNCAVO DA BAHIA  
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS, AMBIENTAS E BIOLÓGICAS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS AGRÁRIAS  
DISSERTAÇÃO DE MESTRADO**

**TRANSPIRAÇÃO EM PLANTAS DE LARANJA E MANGA  
UTILIZANDO SONDA DE DISSIPAÇÃO TÉRMICA E SENSOR  
DE BALANÇO DE CALOR CAULINAR**

**LUCAS MELO VELLAME**

**CRUZ DAS ALMAS - BAHIA**

**FEVEREIRO - 2007**

# **TRANSPIRAÇÃO EM PLANTAS DE LARANJA E MANGA UTILIZANDO SONDA DE DISSIPÇÃO TÉRMICA E SENSOR DE BALANÇO DE CALOR CAULINAR**

**LUCAS MELO VELLAME**

Engenheiro Agrônomo

Escola de Agronomia da Universidade Federal da Bahia, 2005

Dissertação submetida à Câmara de Ensino de Pós-Graduação e Pesquisa da Universidade Federal do Recôncavo da Bahia como requisito parcial para obtenção do Grau de Mestre em Ciências Agrárias, Área de Concentração: Engenharia e Manejo de Irrigação.

**Orientador: Prof. Dr. Vital Pedro da Silva Paz**

**Co-Orientador: Dr. Mauricio Antonio Coelho Filho**

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RECÔNCAVO DA BAHIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS AGRÁRIAS  
CRUZ DAS ALMAS - BAHIA - 2007

## FICHA CATALOGRÁFICA

V432

Vellame, Lucas Melo.

Transpiração em plantas de laranja e manga utilizando sonda de dissipação térmica e balanço de calor / Lucas Melo Vellame. – Cruz das Almas, Ba, 2007.

67p.: il., tab., graf.

Orientador: Prof. . Dr. Vital Pedro da Silva Paz

Dissertação (Mestrado) – Centro de Ciências Agrárias Ambientas e Biológicas, Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, 2007.

1. Fruteiras – fluxo de seiva 2. Fruteiras – transpiração. I. Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, Centro de Ciências Agrárias, Ambientais e Biológicas. II. Título.

CDD 20.ed. 634.6

## COMISSÃO EXAMINADORA

---

Prof. Dr. Vital Pedro da Silva Paz  
Centro de Ciências Agrárias, Ambientas e Biológicas - UFRB  
(Orientador)

---

Prof. Dr. Bernardo Barbosa da Silva  
Centro de Tecnologia e Recursos Naturais - UFCG

---

Prof. Dr. Áureo Silva de Oiveira  
Centro de Ciências Agrárias, Ambientas e Biológicas - UFRB

Dissertação homologada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em  
Ciências Agrárias em.....  
Conferindo o Grau de Mestre em Ciências Agrárias em .....

## **DEDICATÓRIA**

Aos meus pais  
Humberto Vellame Miranda e Maria de Lourdes Melo Vellame

Aos meus irmãos  
Julio e Raul

A minha companheira  
Nita

A meu filho  
Rodrigo

Pelo apoio e compreensão

## **AGRADECIMENTOS**

A Deus e meu mestre Meishu-Sama pela proteção.

Ao Prof. Dr. Vital Pedro da Silva Paz e Dr. Mauricio Antonio Coelho Filho pela orientação, amizade e apoio constantes.

Aos Professores Áureos da Silva Oliveira, Eugenio Ferreira Coelho e Francisco Adriano pela amizade e pelos valiosos ensinamentos.

A Jorge Copquer pela amizade e companheirismo de longa data.

Aos colegas e amigos de curso pela convivência e cooperação

A equipe de irrigação da Embrapa CNPMF: Alisson, Marcelo, Vinícius, Zinho, Roque, Wecslei, Tibério, Tarciso, Zé Cafua e Carlos pelo apoio e convivência.

Ao CNPq pelo financiamento do projeto que deu origem à parte dessa dissertação

A CAPES pela concessão da bolsa de estudos.

A todos que direta ou indiretamente colaboraram para a realização desse trabalho

# SUMÁRIO

	Página
RESUMO	
ABSTRACT	
INTRODUÇÃO .....	01
Capítulo 1	
TRANSPIRAÇÃO EM MANGA ( <i>Mangifera indica</i> L.) PELO MÉTODO GRANIER.....	04
Capítulo 2	
GRADIENTES TÉRMICOS NATURAIS E ÁREA CONDUTORA DE SEIVA NA ESTIMATIVA DA TRANSPIRAÇÃO PELO MÉTODO GRANIER.....	25
Capítulo 3	
MÉTODO DO BALANÇO DE CALOR CAULINAR PARA ESTIMATIVA DE TRANSPIRAÇÃO DE PLANTAS JOVENS DE LARANJA E MANGA..	46
CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	64

# TRANSPIRAÇÃO EM PLANTAS DE LARANJA E MANGA UTILIZANDO SONDA DE DISSIPACÃO TÉRMICA E SENSOR DE BALANÇO DE CALOR CAULINAR

Autor: Lucas Melo Vellame

Orientador: Vital Pedro da Silva Paz

Co-Orientador: Mauricio Antonio Coelho Filho

**Resumo:** O presente trabalho teve como objetivo avaliar os métodos da sonda de dissipação térmica (SDT) e do balanço de calor caulinar (BC) na estimativa da transpiração em mangueira e plantas jovens de laranja. Os experimentos foram conduzidos na EMBRAPA – Mandioca e Fruticultura Tropical, no município de Cruz das Almas – BA (12°48`S; 39°06`W; 225 m). O trabalho foi desenvolvido com plantas de manga e laranja plantadas em vasos que colocados sobre plataformas de pesagens funcionaram como lisímetros. O método da SDT foi aplicado em plantas de manga em vaso e em condições de campo. Foram confeccionadas sondas de 1, 2 e 3 cm de comprimento. A área condutora do caule foi determinada em ramos e troncos de mangueira de diversos diâmetros de caule por meio da aplicação de corantes. Para minimizar o efeito dos gradientes térmicos naturais foram testados diferentes isolamentos térmicos nas plantas em vaso. A correção dos gradientes térmicos naturais presentes no caule mostrou-se imprescindível para a adequada estimativa do fluxo de seiva (FS) pelo método da SDT em manga. As sondas devem ser instaladas abaixo de uma camada externa não condutora (C) que varia com o diâmetro de caule (D) pela relação  $C=0,0625D$ . A área condutora do caule (AS) pode ser estimada pela equação  $AS=0,667D^2-0,006D$ . Modificando os parâmetros empíricos da equação geral de Granier ( $FS=0,00017k^{1,231}AS$ ) o desvio médio em relação às medidas lisimétricas foi de -1,4%. O fluxo de seiva pelo método do balanço de calor foi estimado em 2 plantas jovens de manga e posteriormente em 3 plantas de laranja. O método do balanço de calor estima a transpiração diária de forma precisa em intervalos diários subestimando, em média, 4,6% a transpiração diária em plantas de laranja e superestimando, em média, 0,3% no caso das plantas de manga.

**Palavras-chave:** transpiração, fluxo de seiva, métodos térmicos

# TRANSPIRATION IN ORANGE AND MANGO PLANTS USING HEAT DISSIPATION PROBE AND HEAT BALANCE SENSOR

Autor: Lucas Melo Vellame

Orientador: Vital Pedro da Silva Paz

Co-Orientador: Mauricio Antonio Coelho Filho

**Abstract:** This paper had as objective to evaluate the heat dissipation and heat balance methods in the estimate of transpiration in young trees of orange and mango. The experiments had been lead at EMBRAPA - Mandioca e Fruticultura Tropical, Cruz das Almas - BA (12°48`S; 39°06`W; 225 m). The work was developed with mango and orange trees planted in vases that placed on weighting platforms had functioned as lysimeters. The heat dissipation method was applied in mango trees in such a way in vase how much in field conditions. Heat dissipation probes had confeccioned with 1 2 and 3 cm of length. The sapwood area was determined in stem of diverse diameter of the application of pigment. To minimize the effect of the natural thermal gradients different thermal shield in the plants in vase had been tested. The correction of the thermal gradients natural gifts in stem revealed essential for the adequate estimate of the sap flow (FS) for the heat dissipation method in mango. The probes must be installed below of not conducting an external layer (C) that varies with the diameter of stem (D) for relation  $C=0,0625D$ . The stem sapwood area (AS) can be esteem by D for equation  $AS=0.667D^2-0.006D$ . Modifying the empirical parameters of the general equation of Granier ( $FS=0.00017k^{1.231}AS$ ) the average error in relation to the lisimétricas measures was of -1.4% with high precision. The estimates of sap flow for the heat balance method if gave later in 2 young sleeve plants and in 3 plants of orange. The heat balance method esteem the daily transpiration of necessary form in daily intervals underestimating in average 4.6% daily transpiration in orange plants and overestimating in average 0.3% in mango plants

**Key words:** transpiration, sap flow, thermal methods

## INTRODUÇÃO

O aumento dos conflitos de setores que utilizam os recursos hídricos, a cobrança pelo uso de água e as exigências do mercado por produtos certificados, decorrentes de uma atividade agrícola sustentável, tem aumentado a importância da irrigação localizada. Com esse sistema de irrigação, o volume de água aplicado é reduzido e restrito a uma parcela de solo, reduzindo-se as perdas por evaporação e drenagem, tornando a transpiração o principal elemento a ser determinado para o manejo de água em pomares (COELHO FILHO, 2002).

A técnica lisimétrica de determinação da evapotranspiração apresenta limitação no caso de árvores de grande porte. A principal restrição está no elevado custo do equipamento, principalmente quando se trata de lisímetros de pesagem, o que dificulta a repetição nos estudos. Podem apresentar também problemas de representatividade e estabilidade nas leituras.

O método da covariância de fluxos turbulentos (eddy covariance), proposto inicialmente por Swinbank (1951), tem sido considerado como método de referência permitindo uma estimativa direta da evapotranspiração sem hipóteses sobre a forma dos perfis ou das difusividades turbulentas (SWINBANK, 1951). É o método mais direto para a medição da evapotranspiração, sendo particularmente adequado para culturas esparsas ou com elevado grau de anisotropia, tendo sido utilizado para calibrar outros métodos micrometeorológicos (GREEN et al., 1997). Tal como os métodos micrometeorológicos, em geral, o método das flutuações instantâneas requer sensores de elevado custo e de robustez limitada, bem como culturas em vastas extensões e uniformes para que a sua aplicação seja válida (BRUNET, 1997).

Dentre as alternativas para determinação da transpiração em campo, as câmaras gasosas, nas quais se incluem os porômetros, são bem difundidas atualmente, porém, com problemas relacionados à interferência das medidas na resposta estomática em função dos distúrbios causados no ambiente aéreo ao se

inserir a folha na câmara de medida, representatividade das medidas e impossibilidade de automação (ANGELOCCI, 2001).

Metodologias para determinação do consumo de água em árvores, como o balanço hídrico no solo pode resultar em informações inconsistentes, em vista da grande heterogeneidade do sistema radicular, a variabilidade das variáveis do solo, e a exatidão na determinação da umidade do solo dificultando o uso do método principalmente em escala diária.

Os métodos de medição do fluxo de seiva permitem conhecer a transpiração, um dos componentes da evapotranspiração. Estes métodos possibilitam acompanhar a uma escala temporal de curtos intervalos o funcionamento hídrico das plantas no seu meio ambiente natural e em condições não perturbadas, durante períodos prolongados.

Atualmente, grande parte dos estudos sobre medidas de transpiração de plantas, principalmente em frutíferas lenhosas, é feita com base em metodologias de fornecimento de calor no tronco. Sensores são fixados ou inseridos nos troncos ou ramos de plantas para medição do fluxo de seiva, que no período de 24 horas tem demonstrado grande aproximação com a transpiração (COELHO FILHO, 2002). Cohen et al. (1981), estudando o fluxo de calor, desenvolveram o método de fornecimento de pulsos de calor ao tronco, enquanto Granier (1985) apresentou o fornecimento contínuo de calor ao tronco com o método da sonda de dissipação térmica. O método do balanço de calor caulinar foi desenvolvido por Sakuratani (1981). Os dois primeiros métodos apresentam melhor resposta dinâmica que o método de balanço de calor, que por sua vez apresenta a vantagem de não necessitar de calibração. Os métodos de pulso de calor e da sonda de dissipação térmica, por medirem a velocidade da seiva, exigem a determinação da área efetiva do xilema para o transporte hídrico, transformando a densidade de fluxo de seiva em fluxo de seiva. Esses métodos se destacam por serem não destrutivos e permitirem o estudo simultâneo da transpiração em muitas plantas em nível de campo.

O trabalho proposto tem como objetivo avaliar o método da sonda de dissipação térmica em manga verificando a equação para cálculo do fluxo de seiva e definir procedimentos que minimizem os erros provocados pelos gradientes térmicos naturais e pela área condutora do caule. Assim como comparar o método de balanço de calor caulinar com medidas lisimétricas em

plantas jovens de laranja e manga em ambiente protegido e testar esse método em condições de baixa disponibilidade hídrica.

### REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANGELOCCI, L.R. **Métodos e técnicas de estudo das relações água-planta-atmosfera**. Piracicaba: ESALQ-USP, Departamento de Ciências Exatas, 2001. 104p.

COHEN, Y.; FUCHS, M. ; GREEN, G.C.. Improvement of the heat-pulse method for determining sap flow in trees. **Plant Cell Environment**, v.4, p.391-397, 1981.

GRANIER, A. Une nouvelle methode pour la mesure du flux de seve brute dans le tronc des arbres. **Annales Sciences Forestieres**, v.42, p.193-200, 1985.

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

COELHO FILHO, M.A.. **Determinação da transpiração máxima em um pomar jovem de lima ácida 'Tahiti1 (Citrus latifolia Tan.) e sua relação com a evapotranspiração de referência**. 2002. 91f. Tese – (Doutorado) – ESALQ-USP, Piracicaba, 2002.

BRUNET, Y.. La mesure des flux de vapeur d'eau. In: L'EAU dans l'espace rural: la production végétal. INRA, 1997. p. 171-181.

GREEN, A.E.; MCANENEY, K.. ; LAGOARDE, J.P. Sensible heat and momentum flux measurement with an optical inner scale meter. **Agricultural and Forest Meteorology**, v.85, p.259-267, 1997.

SWINBANK, W.C. The measurement of vertical transfer of heat and water vapor by eddies in the lower atmosphere. **Journal of Meteorology**, v. 8, n. 3, p. 135-145, 1951.

## CAPITULO 1

### TRANSPIRAÇÃO EM MANGUEIRA (*Mangifera indica* L.) PELO MÉTODO GRANIER<sup>1</sup>

---

<sup>1</sup> Artigo submetido ao Comitê Editorial da Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental

## TRANSPIRAÇÃO EM MANGUEIRA (*Mangifera indica* L.) PELO MÉTODO GRANIER

**Resumo:** O método Granier (sonda de dissipação térmica) permite a estimativa do fluxo de seiva com base na determinação da densidade de fluxo em árvores e plantas lenhosas. Esse trabalho teve como objetivo avaliar o método para a cultura da manga quanto à viabilidade de uso em condições de campo e ajustar a equação de determinação do fluxo de seiva com base em medidas lisimétricas em plantas de pequeno porte. Foram utilizadas três mudas da variedade Tommy Atkins com área foliar de 0,66; 0,73 e 1,78 m<sup>2</sup> plantadas em vasos que colocados sobre plataformas de pesagens funcionaram como lisímetros. A área condutora do caule foi determinada por meio da aplicação de corantes e as sondas instaladas apenas na área condutora (AS). As medidas de fluxo de seiva nas plantas em vaso foram realizadas através de sondas de 1 cm de comprimento. Com o objetivo de avaliar o método em plantas adultas foi instalada uma sonda de 3 cm de comprimento no tronco e sondas de 2 cm nos ramos principais, em uma planta com área foliar de 50,7 m<sup>2</sup>. Em outra planta foi instalada, em um mesmo ramo, uma sonda de 1cm e um sensor de balanço de calor caulinar. Os resultados demonstraram que usando os coeficientes originais da equação de Granier o método subestima em 31% o fluxo de seiva (FS) diário em relação à transpiração. Verifica-se tanto nas plantas jovens quanto adultas a defasagem entre o fluxo de seiva e a transpiração e radiação solar. Modificando os parâmetros empíricos da equação ( $FS=0,00017k^{1,231}AS$ ) o desvio médio apresentado foi de -1,4% e o coeficiente de determinação ( $R^2$ ) entre transpiração e fluxo de seiva com regressão linear com coeficiente linear forçado em zero foi de 0,888. O fluxo estimado pela soma dos ramos em plantas adultas foi 15,1% menor que o estimado no tronco. Os métodos da SDT e do balanço de calor caulinar apresentaram boa concordância entre os valores.

**Palavras-chave:** dissipação térmica, fluxo de seiva, gradientes térmicos, xilema

## TRANSPIRATION OF MANGO TREE (*Mangifera indica* L.) EVALUATED BY THE GRANIER METHOD

**Abstract:** The Granier method (heat dissipation probe) esteems the density of sap flow allowing the determination of the sap flow in trees. The objective of this work was to evaluate the viability of use of the method in field conditions for the culture of the mango and to adjust the equation of determination of sap flow on the basis of the lysimeter measured in plants of small transport. For this study, three Tommy Atkins mango nursery trees with foliar area of 0.66, 0.73 and 1.78 m<sup>2</sup> were used. The mango trees were planted vases that placed on weighting platforms had functioned as lysimeters. The stem sapwood area was determined by means of the application of pigment, and the probes installed only in the conducting area (AS). The measures of sap flow in the plants in vase had been carried through probes of 1cm of length. With the objective to evaluate the method in adult plants a probe of 3 cm of length in the trunk and probes of 2 cm in the main branch was installed, in a plant with 50.7 m<sup>2</sup> of foliar area. In another plant it was installed, in one same branch, a heat dissipation probe of 1cm and a heat balance sensor. The results had demonstrated that using the original coefficients of the equation of Granier the method underestimation in 31% the sap flow (FS) daily in relation to that transpiration. It is verified the imbalance enters the sap flow and transpiration and solar radiation in young plants and adult. Modifying the empirical parameters of the equation ( $FS=0.00017k^{1.231}AS$ ) the presented average error was of -1.4% and the coefficient of correlation ( $R^2$ ) between transpiration and sap flow with linear regression was of 0.888. The flow esteem for the addition of the branch in adult plants underestimate in 15.1% when comparative with esteem in the trunk. The heat dissipation and heat balance method presented good agreement between the values of transpiration.

**Key-words:** heat dissipation, sap flow, thermal gradients, xylem.

## INTRODUÇÃO

A transpiração é o principal elemento da evapotranspiração ao se trabalhar com irrigação localizada, onde apenas uma parte do solo é molhada (COELHO FILHO, 2002). Grande parte dos estudos sobre medidas de transpiração de plantas, principalmente em frutíferas lenhosas, é com base em metodologias de fornecimento de calor no tronco. A estimativa da transpiração com base nessas metodologias pressupõe a equivalência entre o fluxo de seiva no tronco e o fluxo transpiratório nas superfícies foliares. Esse pressuposto é válido quando se considera o fluxo em escala diária, como verificado por Coelho Filho (2005) em plantas de lima ácida com o método do balanço de calor caulinar.

O método da sonda de dissipação térmica desenvolvido por Granier (1985) permite a determinação da densidade de fluxo de seiva no caule possibilitando assim a estimativa do fluxo de seiva em plantas lenhosas. O autor relacionou a velocidade de dissipação de calor, aplicado num ponto do tronco, com a densidade de fluxo de seiva. A variação temporal da diferença de temperatura entre esse ponto e um ponto abaixo do mesmo é ocasionada pelo transporte conectivo de calor pela seiva.

Granier (1985) calibrou o método em laboratório, primeiro com três espécies de plantas lenhosas e, posteriormente, com outras seis, verificando que uma única equação de calibração pode ser utilizada. Em função disso, propôs o uso dessa equação em qualquer planta lenhosa de diâmetro de caule superior a 4 cm.

A determinação da área condutora de seiva no caule (área efetiva do xilema) se faz necessária para a estimativa do fluxo de seiva por este método já que a sonda de dissipação térmica determina a densidade de fluxo no local de inserção da sonda. A área condutora pode ser estimada em função do diâmetro externo do caule sendo uma fonte de erro do método. Outra fonte de erro pode ser atribuída ao gradiente térmico natural da temperatura no caule, principalmente quando o sensor é colocado muito próximo ao solo. Este gradiente ocorre pelo efeito da radiação e da temperatura do ar e do solo atuando no caule, afetando o valor da medida térmica da sonda e que por sua vez acaba afetando significativamente a estimativa do fluxo de seiva (ROJAS, 2003).

A abordagem teórica do método da sonda de dissipação térmica é simples e, comparado ao método do balanço de calor, apresenta as vantagens de possuir maior simplicidade na construção dos sensores, menor custo e necessidade de um menor número de canais diferenciais de sistemas de aquisição de dados, tornando possível um maior número de dados em trabalhos no campo. Estas características o torna muito promissor em trabalhos básicos e aplicados em fruteiras tropicais perenes, como a cultura da manga, viabilizando objetivamente estudos interdisciplinares que integram o sistema solo-planta-atmosfera.

Tem-se utilizado a densidade de fluxo de seiva para estimativa da transpiração de grandes áreas vegetadas baseando-se em várias técnicas de integração (GRANIER et al., 1996; WULLSHLEGER et al., 2000). O método da sonda de dissipação térmica também tem sido utilizado na investigação de efeitos ambientais na variação da transpiração em condições de campo, como em fisiologia do estresse (MASSAI et al., 2000) e fitossanidade (PORTEN et al., 2000). Apesar de utilizado em larga escala verifica-se que a avaliação da precisão e da exatidão do método não está suficientemente documentada.

Em um estudo comparativo com medidas lisimétricas em manga Lu et al. (1998) encontraram boa concordância entre os valores de transpiração e fluxo de seiva em escala diária pelo método da sonda de dissipação térmica. Rojas (2003) também comparando medidas lisimétricas com plantas cítricas conclui que o método pode ser aplicado com boa exatidão desde que os efeitos dos gradientes térmicos naturais no caule sejam corrigidos. Silva et al. (2004) ajustaram uma equação com os dados obtidos por gravimetria e pela sonda de dissipação térmica em plantas de kiwi obtendo boa correlação. A transpiração calculada por métodos micrometeorológicos e a estimada por fluxo de seiva em espécies florestais com o método da sonda de dissipação térmica apresentaram boa correlação nos trabalhos de Granier et al. (1990) e Saugier et al. (1997). Ferreira & Silvestre (2004) relacionaram o fluxo de seiva em vinha com a evapotranspiração pelo método da covariância de fluxos turbulentos (eddy covariance) encontrando resultados semelhantes.

Esse trabalho teve como objetivo avaliar o método Granier para a cultura da manga quanto à viabilidade de uso em condições de campo e ajustar a equação de determinação do fluxo de seiva com base em medidas lisimétricas em plantas de pequeno porte.

## MATERIAL E MÉTODOS

O trabalho foi conduzido no campo experimental da Embrapa Mandioca e Fruticultura Tropical, localizada no município de Cruz das Almas – BA (12°48`S; 39°06`W; 225 m). O clima da região é classificado como úmido a sub-úmido com pluviosidade média anual de 1.143 mm (D`ANGIOLELLA et al., 1998).

O estudo foi realizado em plantas de manga da variedade Tommy Atkins, em duas condições:

a) Plantas em fase inicial de desenvolvimento, em vasos de 15 litros e 50 litros que colocados sobre plataformas de pesagem funcionaram como lisímetros.

b) Em planta adulta de um pomar de idade de 30 meses, com plantas espaçadas de 6 x 7 m, em desenvolvimento uniforme.

### **Lisímetros para estudo com plantas de pequeno porte**

Plataformas de pesagem foram constituídas com células de carga “tipo I” de capacidade de 45, 50 e 140 kg, centralizadas entre duas chapas de aço com dimensões 30 x 30 cm. Foi utilizado um sistema de aquisição de dados “datalogger CR10X” para leitura e armazenamento das informações de pesagem dos vasos que funcionaram como lisímetros. A Figura 1 mostra a plataforma e o procedimento de calibração.

Para a calibração dos lisímetros de pesagem foram confeccionadas massas de peso conhecido, utilizando balança analítica. As massas foram aplicadas em ordem crescente e decrescente em quatros ciclos de leituras (Figura 1). Os erros apresentados na Tabela 1 foram obtidos de acordo com a metodologia sugerida por Wheeler & Ganji (1996), e aplicada por Santos (2006) e Vellame (2005). Os erros apresentados estão em valores adequados ao estudo dada sua pequena magnitude e pela redução do erro de repetibilidade quando tomadas as médias horárias.

Para que os lisímetros medissem apenas a transpiração a superfície do solo foi coberta com lona plástica evitando perdas de água por evaporação durante as medições.

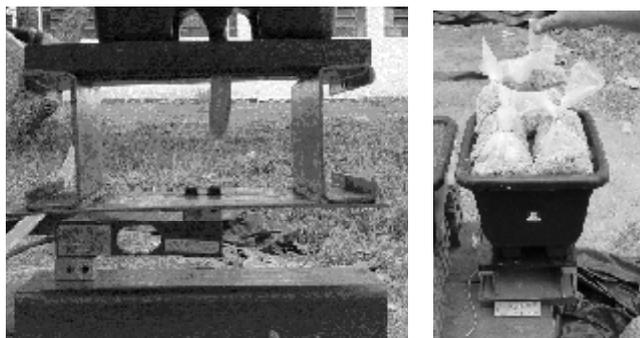


Figura 1. Plataforma de pesagem e calibração do lisímetro.

Tabela 1. Erros dos lisímetros de pesagem.

	Erro (g)		
	Lisímetro 45 kg	Lisímetro 50 kg	Lisímetro 140 kg
Erro máximo absoluto	6,5	7,2	44,6
Repetibilidade	10,3	12,0	58,4
Linearidade	2,5	3,2	17,7
Histerese	8,8	9,8	21,5

### Princípio de funcionamento da sonda de dissipação térmica (SDT)

Cada sensor é composto por uma sonda aquecida à potência constante de 0,1 W, por centímetro de comprimento do sensor, e por uma sonda não aquecida (sonda de referência), que possuem internamente um termopar.

A Figura 2 mostra o processo de instalação das sondas no caule da planta para medida da diferença de temperatura entre os pontos.

Granier (1985) desenvolveu uma relação empírica ( $k$ ) entre a densidade de fluxo de seiva ( $J_s$ ) e a diferença de temperatura ( $DT$ ) entre as duas sondas, equação esta que foi validada para algumas espécies, na maioria florestais.

A equação é dada por:

$$k = \frac{(DT_m - DT)}{DT} = 0,0206 \cdot J_s^{0,8124} \quad (1)$$

em que  $DT_m$  é a diferença de temperatura entre as duas sondas, na situação de fluxo nulo ( $^{\circ}C$ ).

O fluxo de seiva ( $F$ ) é calculado considerando a área da secção efetiva do xilema que conduz a seiva bruta ( $AS$ ), ou seja:

$$F = 118,99 \cdot 10^{-6} k^{1,231} AS \quad (2)$$

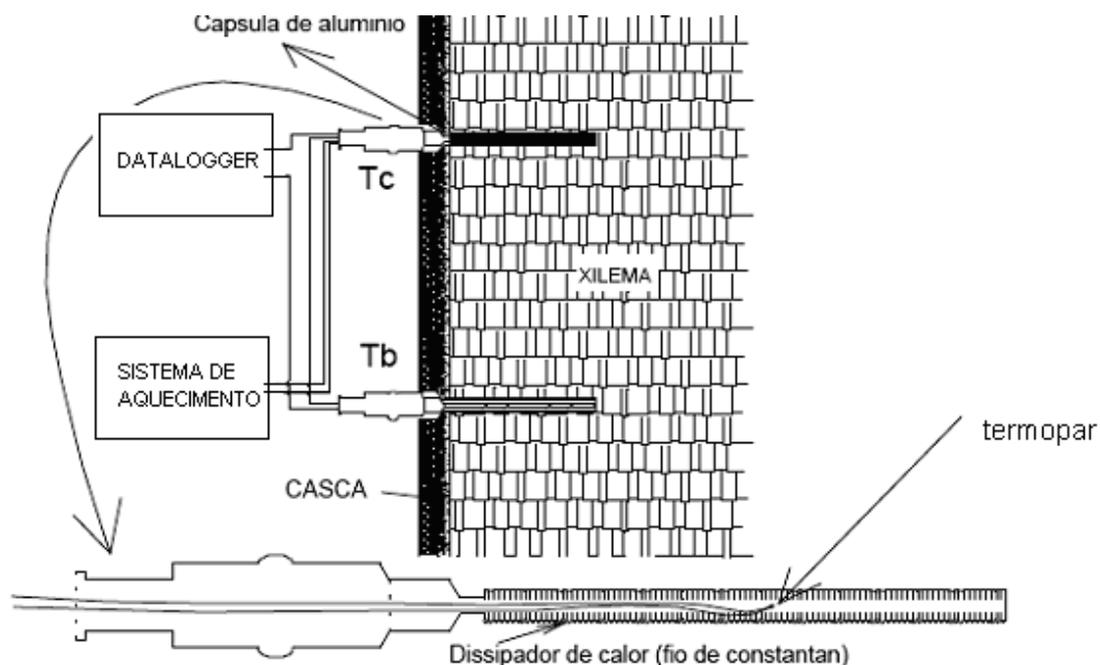


Figura 2. Esquema de medição do sensor de dissipação térmica (ROJAS, 2003).

### Construção das sondas

No Laboratório de Irrigação da Embrapa CNPMF foram construídas sondas de 1, 2 e 3 cm de comprimento utilizando-se termopares de cobre-“constantan” de 0,5 mm, inseridos em agulhas de 1,6 mm de diâmetro, preenchidas com resina para fixação (Figura 3).

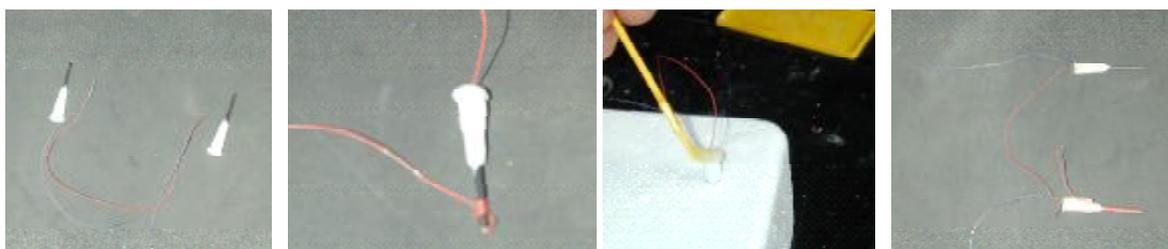


Figura 3. Detalhe dos passos para construção das sondas de dissipação térmica.

O aquecimento da sonda superior ocorreu por meio do fio de “constantan” enrolado na parte externa da agulha. Para o aquecimento foram construídas 3 fontes de tensão ajustáveis com os elementos aquecedores conectados em série como mostrado na Figura 4.

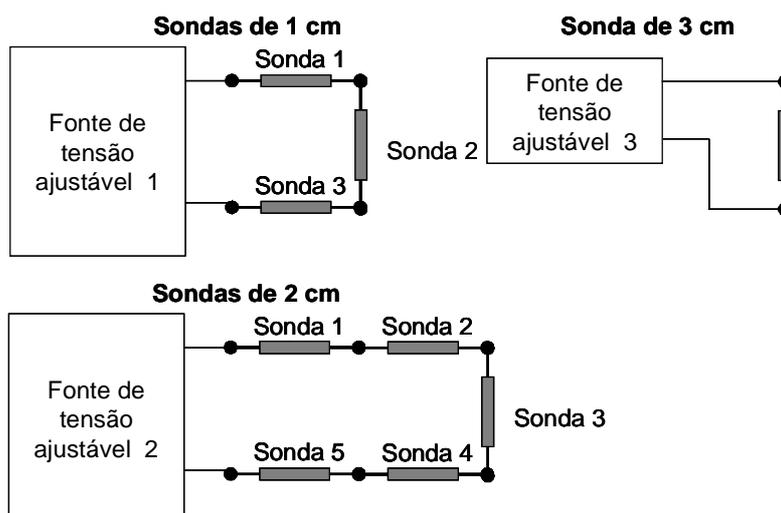


Figura 4. Esquema do sistema de aquecimento das sondas.

A resistência elétrica total das sondas ( $R$ ) foi medida por meio de um multímetro e calculada a tensão ( $V$ ) a ser aplicada de acordo com a equação 3, derivada da lei de Ohm, de modo a se obter uma potência ( $P$ ) em cada sonda de 0,1; 0,2 e 0,3 W, correspondentes aos sondas de 1, 2 e 3 centímetros de comprimento, respectivamente.

$$V = \sqrt{P \cdot R} \quad (3)$$

### Área efetiva do xilema e instalação da sonda

Como a aplicação do método da sonda de dissipação térmica para a estimativa do fluxo de seiva pressupõe o conhecimento da área condutora do caule, procedeu-se à sua determinação através de método destrutivo com aplicação de corantes em troncos e ramos de diversos diâmetros (Figura 5). Com base nesses dados a área condutora ( $AS$ ) foi calculada em função do diâmetro de caule ( $D$ ) pela seguinte equação:

$$AS = 0,667D^2 - 0,006D \quad (4)$$

Os sensores foram instalados abaixo de uma camada externa não condutora ( $C$ ) que variou com o diâmetro de caule pela equação:

$$C = 0,0625D \quad (5)$$

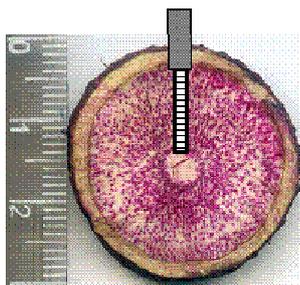


Figura 5. Secção de caule apresentando a parte condutora pigmentada e posicionamento da sonda.

### Correção das diferenças térmicas naturais

Para corrigir o efeito dos gradientes térmicos naturais no caule as diferenças térmicas foram medidas com o sensor não aquecido em períodos distintos à medição de fluxo de seiva. Foram gerados modelos de estimativa em função da temperatura do ar para cada sonda individualmente. Os dados coletados foram corrigidos posteriormente com base nesses modelos.

### Diferenças térmicas entre sondas e transpiração nos lisímetros

Foram instaladas sondas de dissipação com 1 cm de comprimento em plantas em fase inicial de desenvolvimento, com área foliar de 0,73 e 1,78 m<sup>2</sup>. O estudo foi realizado em telado coberto no período do dia 3 a 7 de dezembro de 2005 e em campo entre os dias 26 e 31 de março de 2006.

As diferenças térmicas foram medidas e armazenadas as médias das leituras a cada 10 minutos, em sistema de aquisição e armazenamento de dados ("datalogger" CR10X Campbell SCi.) associado a um multiplexador de canais (AM 416 Relay Multiplexer, Campbell SCi.) (Figura 6). Além dessas variáveis foram medidas e registradas pelo sistema a radiação solar global e a temperatura do ar.

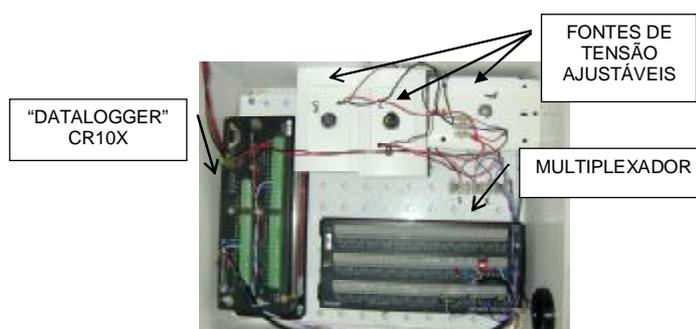


Figura 6. Sistema de aquisição de dados e fontes de tensão ajustáveis.

A transpiração das plantas foi obtida pela diferença de massa medida pelos lisímetros de pesagem (Figura 7), com registro no sistema de aquisição e armazenamento de dados citado anteriormente. Durante o experimento o solo foi mantido na capacidade de campo a fim de se obter a transpiração potencial.



Figura 7. Medida de fluxo de seiva (Granier) e transpiração (lisímetros de pesagem).

### **Aplicação do método Granier em plantas adultas**

Em um pomar de manga com idade de 30 meses, com plantas espaçadas de 6 x 7 m, em desenvolvimento uniforme, foi escolhida uma planta de área foliar de 50,7 m<sup>2</sup>. Uma sonda de 3 cm de comprimento foi instalada no tronco com diâmetro de 10,3 cm, à 25 cm do solo e espaçadas de 10 cm. Nos ramos principais de 5,45; 4,8; 6,98; 5,95 e 4,6 cm de diâmetro foram instaladas sondas de 2 cm de comprimento (Figura 8). As medidas das diferenças térmicas foram realizadas no período de 27 de agosto a 6 de setembro de 2006.

No mesmo pomar em outra planta, em um ramo de 3,05 cm de diâmetro com área foliar de 3,39 m<sup>2</sup>, foi instalado um sensor comercial de fluxo de seiva por balanço de calor (Dynamax SGA16). No mesmo ramo foi instalado uma sonda de 1 cm construída nesta pesquisa (Figura 9). As medidas de fluxo de seiva realizadas no período de 13 a 23 de março de 2006 permitiram a comparação dos

dados obtidos pela sonda de dissipação térmica e pelo método do balanço de calor.



Figura 8. Instalação de uma sonda de dissipação térmica (SDT) no tronco e ramos de planta adulta

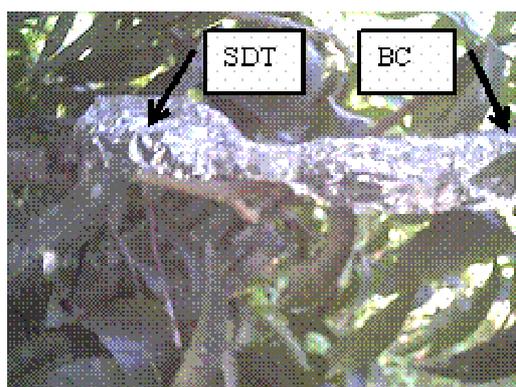


Figura 9. Instalação de uma sonda de dissipação térmica (SDT) e sensor por balanço de calor (BC) em um ramo.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

### Curso do fluxo de seiva, transpiração e radiação solar global

Na Figura 10 está apresentado o curso da transpiração medida pelo lisímetro, do fluxo de seiva medido pela sonda de dissipação térmica e da radiação global ao longo de 4 dias com registros horários. Observa-se que o fluxo de seiva estimado pela equação geral de Granier sem modificação dos parâmetros empíricos subestima os valores de transpiração obtida com lisímetros fato evidenciado pelos picos dos valores de transpiração na referida figura. Verifica-se que a defasagem entre o fluxo de seiva e a transpiração, segue o curso da radiação solar, fato este detectado por vários autores (WEIBEL & VOS, 1994; HEILMAN & HAN, 1990; SHACKEL et al., 1992; VALANCOGNE & NASR, 1993). Nas primeiras horas da manhã ocorre transpiração da água armazenada nos tecidos vegetais. Ao final do dia, quando a transpiração tende a cessar, o fluxo de seiva continua a ocorrer a fim de repor a água dos tecidos perdida durante o dia (COELHO FILHO, 2002)

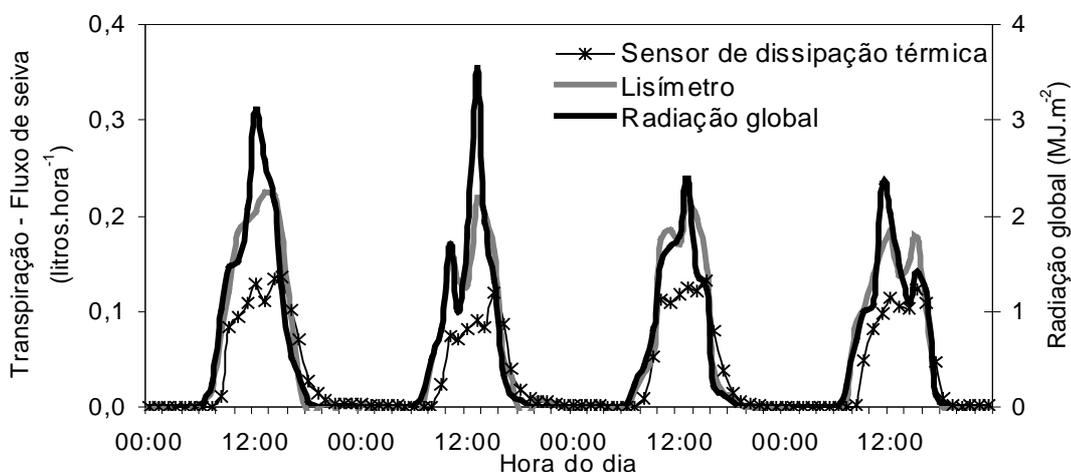


Figura 10. Transpiração medida por lisímetro, fluxo de seiva pela sonda de dissipação térmica e radiação solar global ao longo dos dias Julianos 87, 88, 89 e 90.

### Ajuste da equação de Granier para estimativa da transpiração em plantas em vaso

A Tabela 2 apresenta os valores dos coeficientes angulares ( $a$ ) e de determinação ( $R^2$ ) de regressões lineares com intercepto forçado em zero para

medidas de fluxo de seiva (sonda de dissipação térmica) e transpiração (lisímetro) das plantas em diferentes tempos de integração. Observa-se que quanto maior o intervalo de tempo utilizado para as comparações maior é a concordância entre os dois métodos. Isso pode ser explicado pela defasagem entre fluxo de seiva e transpiração, além da diminuição do efeito das variações nas leituras do lisímetro provocada provavelmente pela ação do vento.

A Figura 11 mostra a relação transpiração e fluxo de seiva em intervalos de 1 e 24 horas. Observa-se que o método da sonda de dissipação térmica utilizando os coeficientes originais da equação de Granier (1985) subestimou em média 31% os valores de fluxo de seiva em escala diária

Tendo em vista a defasagem entre fluxo de seiva e transpiração optou-se por modificar o coeficiente linear da equação geral de Granier aproximando os valores em escala diária segundo equação:

$$FS = 0,00017 \cdot k^{1,231} \cdot AS \quad (6)$$

O desvio médio entre o fluxo de seiva e a transpiração em escala diária no período estudado nas três plantas foi de -1,4% quando utilizando a equação 4.

Tabela 2. Coeficiente linear (a), coeficiente de determinação ( $R^2$ ) e número de observações de regressões lineares com coeficiente da regressão forçado em zero ( $y = a \cdot x$ ) das medidas de fluxo de seiva estimado pela sonda de dissipação térmica em função de medidas lisimétricas em plantas jovens de manga em diferentes tempos de integração

Tempo de integração (horas)	a	$R^2$	N
1	0,6001	0,7356	384
2	0,6238	0,7875	192
3	0,6242	0,8178	128
4	0,6503	0,8650	96
24	0,6878	0,8881	16

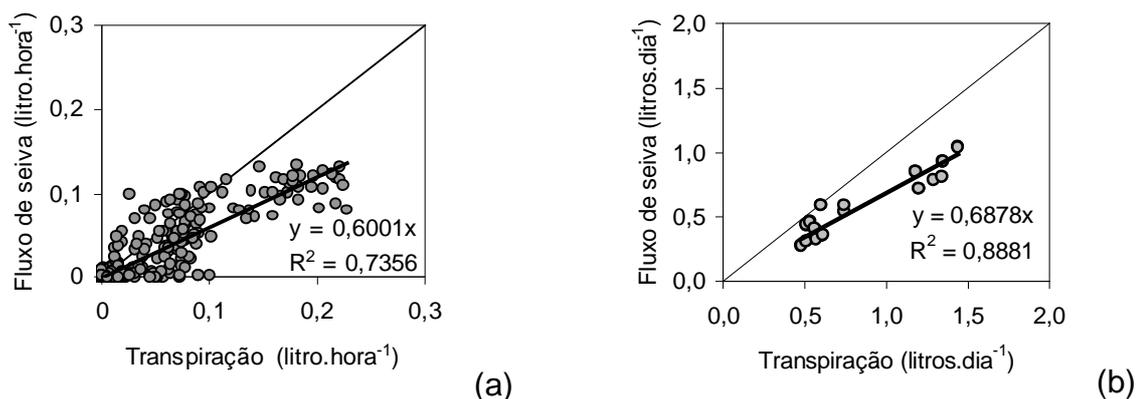


Figura 11. Relação entre transpiração medida pelo lisímetro e o fluxo de seiva pela equação geral de Granier em intervalos de (a) 1 e (b) 24 horas em plantas jovens manga.

Silva et al. (2004) verificaram em plantas de kiwi que a equação geral de Granier apresentou uma forte subestimativa dos valores de fluxo de seiva principalmente em condições de maior fluxo. Os autores ajustaram uma equação polinomial de grau 2 aos valores de  $k$  (equação 1) em relação a densidade de fluxo calculada com base em medidas lisimétricas e na área da secção condutora do caule, obtendo uma coeficiente de determinação de 0,8252. Rojas (2003) também baseado em medidas lisimétricas verificou que o fluxo de seiva pelo método da dissipação térmica subestimou na ordem de 3% a transpiração em plantas cítricas. Ferreira & Silvestre (2004) ajustaram uma equação potencial com os valores de fluxo de seiva obtidos com os parâmetros originais da equação de Granier e a evapotranspiração para vinha em condições de evaporação do solo desprezível, estimada pelo método meteorológico da covariância de fluxos turbulentos (eddy covariance), obtendo uma boa correlação ( $R^2 = 0,84$ ).

### Fluxo de seiva em plantas adultas

A Figura 12 mostra o curso do fluxo de seiva estimado pela sonda de dissipação térmica e pelo método do balanço de calor caulinar e a radiação solar global ao longo do dia em um ramo de 3,05 cm de diâmetro e 3,39 m<sup>2</sup> de área foliar em uma planta adulta. A defasagem entre fluxo de seiva e radiação, discutida anteriormente, se repete tanto para as medida com a sonda de dissipação térmica quanto pelo método do balanço de calor, inferindo-se que esta defasagem não é função do tempo de resposta da sonda de dissipação térmica.

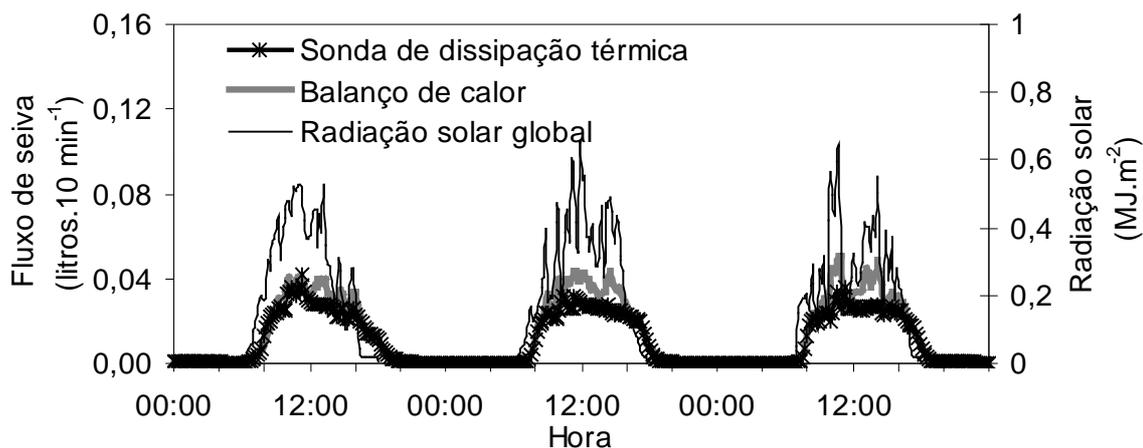


Figura 12. Curso da radiação solar global e do fluxo de seiva estimado pela sonda de dissipação térmica e balanço de calor em um ramo de manga.

A Figura 13 mostra a relação entre o fluxo de seiva diário no ramo estimado pelo método da sonda de dissipação térmica e pelo balanço de calor caulinar. Ocorreu uma diferença média de 6,5 % entre os métodos, que apresentaram boa correlação entre si. Tournebize & Boistard (1998) em estudo com uma árvore do Mediterrâneo, observaram discrepância máxima de 10% entre os métodos da sonda de dissipação térmica e do balanço de calor caulinar. Entretanto, Rojas (2003) em plantas cítricas observou uma grande dispersão dos dados e uma tendência de superestimativa de 35% dos valores calculados pelo método de balanço de calor em relação aos de dissipação térmica. O autor atribui como prováveis fontes de erro valores de fluxo de seiva noturnos medidos pelo método do balanço de calor e ao efeito dos gradientes térmicos naturais no método de dissipação térmica.

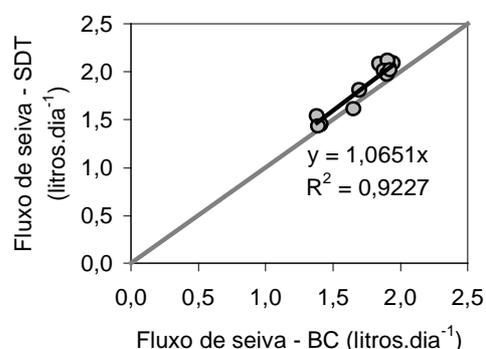


Figura 13. Fluxo de seiva estimado pelo método de balanço de calor (BC) e pelo método da sonda dissipação térmica (SDT).

A Figura 14 mostra o curso do fluxo de seiva estimado pela sonda de dissipação térmica nos ramos principais e no tronco de uma planta adulta de 50,7 m<sup>2</sup> de área foliar. Observa-se uma defasagem entre o fluxo no tronco e nos ramos confirmando que nas primeiras horas da manhã ocorre transpiração da água armazenada nos tecidos vegetais sem ocorrer fluxo uma vez que este não ocorre simultaneamente em toda planta.

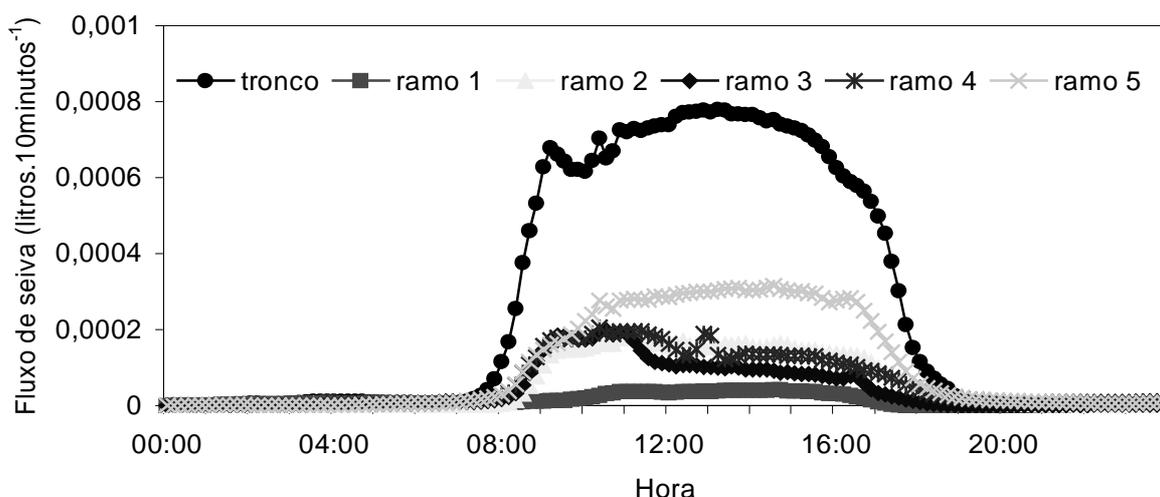


Figura 14. Curso do fluxo de seiva estimado pela sonda de dissipação térmica em ramos e tronco de uma mangueira adulta

Na Figura 15 tem-se a comparação entre o fluxo de seiva estimado pela soma dos fluxos dos ramos principais de uma planta adulta e o estimado pela medida no tronco. O fluxo estimado pela soma nos ramos foi 15,5% menor que o fluxo estimado no tronco. Esses desvios podem estar relacionados à diferenças entre as propriedades térmicas de caules de diâmetros maiores, assim como, a diferença nas estimativas com sondas de comprimentos diferentes da usada na calibração com lisímetros.

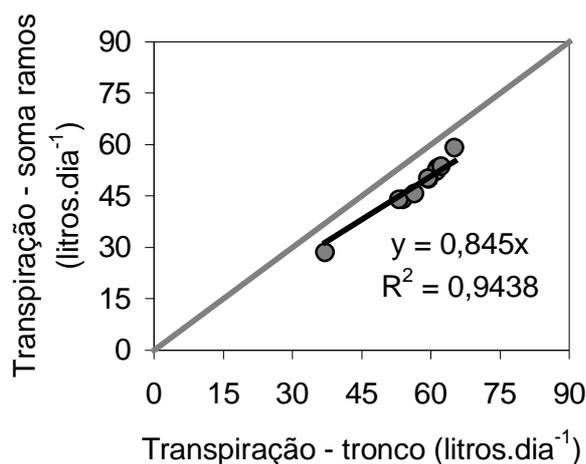


Figura 15. Relação entre a transpiração total medida no tronco e a soma das transpirações de cada ramo em planta adulta (b).

## CONCLUSÕES

1. O método Granier com o coeficiente linear da equação modificado  $FS = 0,00017 \cdot k^{1,231} \cdot AS$  mostrou-se eficiente na estimativa do fluxo de seiva em escala diária.
2. As estimativas de fluxo de seiva apresentaram boa concordância em ramo de 3,05 cm de diâmetro com o método da sonda de dissipação térmica utilizando a equação de Granier com os parâmetros empíricos modificados e o método do balanço de calor caulinar.
3. O fluxo de seiva estimado em uma planta adulta pela soma dos fluxos nos ramos foi 15% menor que o estimado no tronco.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

COELHO FILHO, M.A. et al. Field determination of young acid lime plants transpiration by the stem heat balance method. **Scientia Agricola**, Piracicaba,, v.62, n.3, p.240-247, 2005

COELHO FILHO, M.A. **Determinação da transpiração máxima em um pomar jovem de lima ácida 'Tahiti1 (Citrus latifolia Tan.) e sua relação com a evapotranspiração de referência.** 2002. 91f. Tese (Doutorado) - ESALQ-USP, Piracicaba, 2002.

D'ANGIOLELLA, G.L.B.; CASTRO NETO, M.T.; COELHO, E.F. Tendências climáticas para os tabuleiros costeiros da região de Cruz das Almas, BA. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 27., 1998, Poços de Caldas, MG. **Anais...** Lavras, MG: SBEA, 1998. v.1, p. 43-45.

FERREIRA, M. I.; SILVESTRE, J. C. Medição da transpiração em cobertos descontínuos: Vinha em diferentes declives, na região do oeste. In: CONGRESSO DA ÁGUA, 7., 2004, Lisboa, Portugal. **Anais...** Lisboa, Portugal: LNEC, 2004. Disponível em: <<http://www.aprh.pt/congressoagua2004/PDF/110.PDF>>. Acesso em: 10/12/2006

GRANIER A. et al. Vapour flux density and transpiration rate comparisons in a stand of Maritime pine (*Pinus pinaster* Ait.) in Les Landes forest. **Agricultural and Forest Meteorology**, v.51, p. 309–319, 1990.

GRANIER, A. Une nouvelle methode pour la mesure du flux de seve brute dans le tronc des arbres. **Annales Sciences Forestieres**, v.42, p.193-200, 1985.

GRANIER, A.; BRÉDA, N. Modeling canopy conductance and stand transpiration of an oak forest from sap flow measurements. **Annales Sciences Forestieres**, v.53, p.1-14, 1996.

HEILMAN, J.L.; HAM, J.M. Measurement of mass flow rate of sap in *Ligustrum japonicum*. **Hortscience**, v.25, n.4, p.465-467, 1990

LU P., CHACKO E. Evaluation of Granier's sap flux sensor in young mango trees. **Agronomie**, v. 18 p. 461-471, 1998.

MASSAI, R. et al. Sap flow in peach trees during water stress and recovery in two environmental conditions. **Acta Horticultural**, v.537, p.351-358, 2000.

PORTEN, M.; SCHMID, J.; RUHL, E.H. Sap flow measurements on phylloxera infested grapevines. **Acta Horticultural**, v.537, p.367-373, 2000.

ROJAS, J.S.D. **Avaliação do uso do fluxo de seiva e da variação do diâmetro do caule e de ramos na determinação das condições hídricas de citrus, como base para o manejo de irrigação**. 2003. 110f.. Tese (Doutorado) – ESALQ/USP, Piracicaba, 2003.

SANTOS, R. M. et al. ;. Montagem e acurácia de um sistema experimental de pesagem para calibração de sensores de umidade do solo. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 30, n. 6, p. 1162-1169, 2006.

SAUGIER B., GRANIER A., PONTAILLER J.Y., DUFRÊNE E., BALDOCCHI D.D., Transpiration of a boreal pine forest measured by branch bag, sap flow and micrometeorological methods, **Tree Physiology**, v.17, p.511-519, 1997.

SHACKEL, K. A.; JOHNSON, R. S.; MEDAWAR, C.K. Substantial errors in estimates of sap flow using the heat balance technique on wood stems under field conditions. **Journal of the American Society for Horticultural Science**, v.117, n.2, p.351-356, 1992.

SILVA, R.M. et al. Determinação das necessidades de rega em kiwi na região do Entre Douro e Minho. In: CONGRESSO DA ÁGUA, 7.,2004, Lisboa, Portugal. **Anais...** Lisboa, Portugal: LNEC, 2004. Disponível em: <<http://www.aprh.pt/congressoaqua2004/PDF/108.PDF>> Acesso em: 10/12/2006

TORNEBIZE, R.; BOISTARD, S. Comparison of two sap flow methods for the estimation of tree transpiration. **Annales des Sciences Forestieres**, v.55, n.6, p.706-713, 1998

VALANCOGNE, C.; NASR, Z. Measuring sap flow in the stem of small trees. In: BORGHETTI, M.; GRACE, J.; RASCHI, A. **Water transport in plants under climatic stress**. Cambridge: Cambridge University Press, 1993. p.166-173.

VELLAME, L. M.; COELHO FILHO, M. A.; COELHO, E. F. Lisímetro de pesagem e de lençol freático de nível constante para uso em condições de ambiente protegido. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, 14., 2005, Campinas. **Anais...** Campinas: Sociedade Brasileira de Agrometeorologia, 2005. 1 CD ROM.

WEELER, A. J.; GANJI, A. R. **Introduction to engineering experimentation**. New Jersey: Prentice Hall, 1996. 415 p.

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

WULLSCHLEGER, S.D; KING, A.W.. Radial variation in sap velocity as a function of stem diameter and sapwood thickness in yellow- poplar trees. **Tree Physiology**, v.20, p.511–518, 2000

## **CAPITULO 2**

### **GRADIENTES TÉRMICOS NATURAIS E ÁREA CONDUTORA DE SEIVA NA ESTIMATIVA DA TRANSPIRAÇÃO PELO MÉTODO GRANIER**

## GRADIENTES TÉRMICOS NATURAIS E ÁREA CONDUTORA DE SEIVA NA ESTIMATIVA DA TRANSPIRAÇÃO PELO MÉTODO GRANIER

**Resumo:** Dentre os problemas metodológicos envolvidos nas estimativas de fluxo de seiva pelo método Granier (sonda de dissipação térmica) estão os efeitos dos gradientes térmicos naturais no caule, a determinação da área da secção condutora de seiva e a distribuição radial da densidade de fluxo no caule. O presente trabalho estudou o efeito causado pelos gradientes térmicos naturais e pela área da secção condutora de seiva no caule na estimativa do fluxo de seiva com a sonda de dissipação térmica na cultura da manga. Foi determinada a área da secção condutora de seiva em diversos diâmetros de caule por meio da aplicação de corantes. Determinou-se o fluxo de seiva com o sensor posicionado apenas na área da secção condutora e em todo o caule. Para minimizar o efeito dos gradientes térmicos naturais foram testados diferentes isolamentos térmicos do caule em plantas jovens. Foram medidas as diferenças térmicas em planta adulta com elevada densidade de folhas e pequena exposição dos ramos à radiação solar. A correção dos gradientes térmicos naturais presentes no caule mostrou-se imprescindível para a adequada estimativa da densidade de fluxo de seiva pelo método Granier. Em plantas adultas os gradientes térmicos foram menores comparados a ramos de plantas jovens. A temperatura do ar pode ser utilizada, com eficiência, para as correções dos gradientes térmicos. A área da secção condutora de seiva ( $m$ ) pode ser estimada em função do diâmetro do caule ( $m$ ) pela equação  $A = 0,666D^2 - 0,0063D$ . Os sensores devem ser instalados abaixo da camada externa não condutora que varia com o diâmetro de caule pela relação  $C = 0,0625D$ .

**Palavras-chave:** densidade de fluxo, dissipação térmica, xilema

## NATURAL THERMAL GRADIENTS AND SAPWOOD AREA IN THE ESTIMATE OF TRANSPIRATION FOR GRANIER METHOD

**Abstract:** Amongst the involved problems in the estimates of sap flow for the Granier method (heat dissipation probe) they are the effect of the natural thermal gradients in stem, the determination of the sapwood area and the radial distribution of the density of sap flow in stem. The present work studied the effect caused for the natural thermal gradients and the stem sapwood area in the estimate of the sap flow with the heat dissipation probe in the culture of the mango. The sapwood area was determined in branch and trunks of diverse diameter of the application of pigment. The sap flow determined with the sensor located only in the stem sapwood area and in itself all. To minimize the effect of the natural thermal gradients different thermal shield of stem in young plants had been tested. The thermal differences had been measured in adult plant with raised density of leaves and small exposition of the branches to the solar radiation. The correction of the stem natural thermal gradients revealed essential for the adequate estimate of the density of sap flow. In adult plants the thermal gradients lesser had been compared the stem of young plants. The temperature of air can be used, with efficiency, for the corrections of the thermal gradients. The sapwood area ( $m^2$ ) can be esteem in function of the diameter of stem ( $m$ ) for the equation =  $0,666D^2 - 0,0063D$ . The sensors must be installed below of not conducting external area that varies with the diameter of stem for the relation  $C = 0,0625D$ .

**Key words:** sap flux, thermal dissipation, xylem

## INTRODUÇÃO

Grande parte dos estudos sobre transpiração de plantas, principalmente em frutíferas lenhosas, é com base em metodologias de fornecimento de calor no caule. O método de Granier (dissipação térmica) tem sido utilizado em trabalhos relacionados à modelagem da transpiração (GRANIER et al., 1996), fisiologia do estresse (MASSAI et al., 2000) e fitossanidade (PORTEN et al., 2000) em condições de campo. Apesar de serem utilizados em larga escala, verifica-se que a avaliação da precisão e exatidão do método está insuficientemente documentada. As maiores fontes de erro estão relacionadas à determinação da área da secção condutora de seiva, a distribuição espacial do fluxo no caule e a presença de gradientes térmicos naturais presentes no tronco.

A determinação da área da secção condutora de seiva se faz necessária para a estimativa do fluxo de seiva pelo método Granier visto que a sonda de dissipação térmica determina a densidade de fluxo no local de inserção. A determinação da área condutora é uma fonte de erro do método e ao exigir a retirada de uma amostra do lenho ou da destruição total da planta, torna-se um procedimento desvantajoso.

Clearwater et al. (1999) afirmam que o método da sonda de dissipação térmica com os coeficientes originais da equação de Granier subestima o fluxo de seiva em algumas espécies pelo contato da sonda em regiões não condutoras. Segundo Nadezhdina et al. (2002) em estudo com *Pinus sylvestris* L., *Prunus serotina* Ehrh., *Rhododendron ponticum* L. e *Populus canescens* L., supor que o fluxo de seiva é uniforme em toda profundidade do caule resulta em erros elevados. Os autores consideram vantajoso posicionar a sonda à profundidade de fluxo de seiva máximo, dada à alta sensibilidade de fluxo de seiva para mudanças nas condições ambientais e devido a menores erros aleatórios associados ao posicionamento da sonda ao longo da secção do caule. De acordo com Ferreira & Zitscher (1996) para se fazer uma correta integração das medições pontuais da densidade de fluxo pela sonda, para toda a secção do caule, é necessário relacionar esta medição pontual com a curva do perfil radial.

Os gradientes térmicos naturais presentes no caule é outra importante fonte de erro no método da sonda de dissipação térmica. Granier (1987) observou diferença entre os valores de fluxo de seiva medidos com três sensores distintos,

orientados em lados opostos à altura de 1 m acima do solo. Loustau et al. (1998) também observaram diferenças nas medições com sondas em alturas diferentes no caule, provavelmente causadas pelo gradiente térmico natural. Esse gradiente é efeito da radiação solar e da temperatura do ar e do solo que atuam sobre o caule. Do e Rocheteau (2002), em um estudo com *Acacia* no Senegal, afirmam que os gradientes térmicos naturais raramente podem ser negligenciados (i.e.  $<0,2^{\circ}\text{C}$ ) e que os erros na estimativa de fluxo de seiva podem ser de até 100%. Rojas (2003) conclui em seu estudo com limoeiro que os gradientes térmicos naturais devem ser considerados e sugere estudos mais aprofundados para encontrar uma solução para o problema. Lundblada et al. (2001) concluem em um trabalho com pinheiros que os gradientes podem provocar erros de até 30% nas estimativas. Diferentes métodos de correção foram propostos visando minimizar a influência de gradientes térmicos naturais em medidas de fluxo de seiva (ÈERMÁK & KUÈERA, 1981; CABIBEL & DO, 1991; GOULDEN & FIELD, 1994; GUTTIÉRREZ et al., 1994; KÖSTNER et al., 1998). Esses métodos, entretanto, são inadequados em condições de alta variabilidade espacial e temporal dos gradientes.

Este trabalho tem como objetivo estudar o efeito causado pelos gradientes térmicos naturais e pela área da secção condutora de seiva bruta no caule na estimativa do fluxo de seiva com a sonda de dissipação térmica na cultura da manga

## MATERIAL E MÉTODOS

O trabalho compreendeu estudos com a cultura da manga em fase inicial de desenvolvimento em vaso e em plantas adultas. O estudo foi realizado no campo experimental da Embrapa Mandioca e Fruticultura Tropical, localizada no município de Cruz das Almas – BA ( $12^{\circ}48' \text{S}$ ;  $39^{\circ}06' \text{W}$ ; 225m). O clima da região é classificado como úmido a sub-úmido com pluviosidade média anual de 1.143mm (D'ANGIOLELLA et al., 1998)..

O estudo com gradientes térmicos naturais foi realizado em plantas de manga da variedade Tommy Atkins em dois estágios de desenvolvimento:

a) Em fase inicial de desenvolvimento com plantas de 0,66; 0,73 e 1,78 m<sup>2</sup> de área foliar, plantadas em vasos de 15 litros e 50 litros que colocados sobre plataformas de pesagem funcionaram como lisímetros; para evitar perdas de água por evaporação durante as medições, a superfície do solo foi coberta com lona plástica. O estudo foi conduzido em ambiente protegido com telado no período de 3 a 18 de julho de 2005 e em campo aberto de 2 de fevereiro a 5 de março de 2006.

b) Em uma planta de 50,7 m<sup>2</sup> de área foliar em pomar de idade de 30 meses, com plantas espaçadas de 6 x 7 m, com desenvolvimento uniforme, no período de 2 de fevereiro a 5 de março de 2006

### **Isolamento térmico do caule e gradientes térmicos naturais em plantas em vaso**

Com a finalidade de minimizar o efeito dos gradientes naturais de temperatura no caule foram estabelecidas três condições de isolamento térmico para instalação do sensor como mostrado na Figura 1. Nesse estudo foram utilizadas sondas de 1 cm. As diferenças térmicas naturais foram medidas inicialmente com as sondas não aquecidas e posteriormente os sensores aquecidos a uma potência constante de 0,1W.

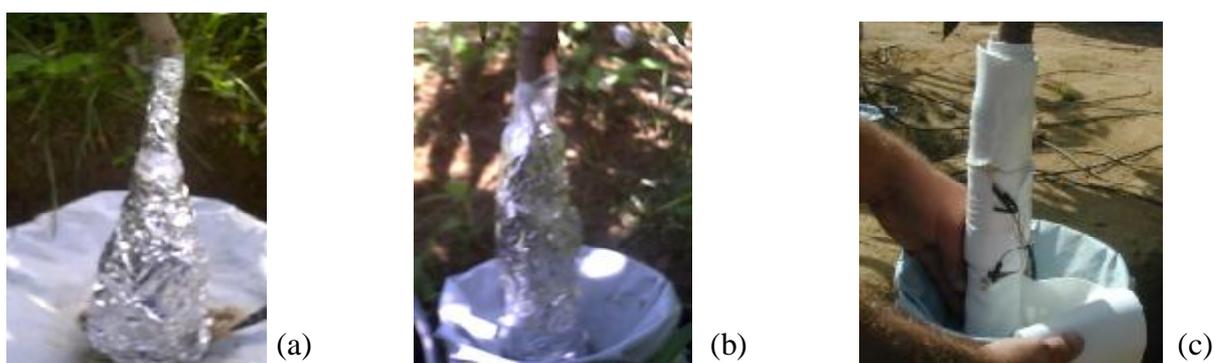


Figura 1. Isolamento térmico do caule por medidas de gradiente de temperatura:

- caule isolado acima e abaixo do sensor com laminado em formato de saia, permitindo a dissipação de calor do volume coberto, entre o caule e o laminado;
- laminado cobrindo completamente o caule, acima e abaixo do sensor não permitindo a troca de calor;
- caule coberto com neoprene, em toda extensão acima e abaixo da posição do sensor.

### Medições das diferenças térmicas naturais em planta adulta

Em um pomar de manga com idade de 30 meses, com plantas espaçadas de 6 x 7 m, em desenvolvimento uniforme, foi escolhida uma planta considerada representativa do pomar. Uma sonda de 3 cm de comprimento foi instaladas no tronco com diâmetro de 103 cm, à 25 cm do solo. Nos ramos principais de 5,45; 4,8; 6,98; 5,95 e 4,6 cm de diâmetro foram instaladas sondas de 2 cm de comprimento (Figura 2). Os segmentos de caule foram isolados com papel laminado em formato de saia.



Figura 2. Instalação de uma sonda de dissipação térmica (SDT) em um tronco e ramos de planta adulta.

Após a medição das diferenças térmicas naturais as sondas foram aquecidas a uma potência constante de 0,2 e 0,3 W para os sensores de 1 e 2 cm respectivamente.

### Determinação do fluxo de seiva

As diferenças térmicas naturais do caule, radiação solar global e temperatura do ar foram utilizadas para correlacionamento e modelos de estimativa das diferenças térmicas naturais tanto das plantas em vaso quanto adulta.

A diferença térmica com o sensor aquecido foi corrigida através da Equação 1

$$DT = DT_{medido} - DTN_{estimado} \quad (1)$$

sendo,

DT - diferença térmica corrigida (°C);

DT<sub>medido</sub> - diferença térmica medida pela sonda não corrigida (°C);

DTN<sub>estimado</sub> - diferença térmica natural estimada pelos modelos (°C).

Calculou-se o fluxo de seiva (F) pela equação geral de Granier com os parâmetros empíricos modificados, ou seja:

$$F = 0,00017 \cdot k^{1,231} \cdot AS \quad (2)$$

sendo,

AS – área da secção condutora de seiva no caule;

k – um fator característico de cada espécie vegetal calculado pela equação a seguir:

$$k = \frac{(DTm - DT)}{DT} \quad (3)$$

em que DTm é a diferença de temperatura entre as duas sondas, na situação de fluxo nulo (°C).

Também foram estimados valores de fluxo de seiva sem as correções das diferenças térmicas naturais e os dados comparados com medidas lisimétricas.

### **Área da secção condutora de seiva no caule e posicionamento dos sensores**

A aplicação do método Granier para a estimativa do fluxo de seiva pressupõe o conhecimento da área da secção condutora no caule. Com a finalidade de estimar essa área foram seccionados ramos e troncos de diversos diâmetros. Através da aplicação de corantes procedeu-se à determinação da área condutora sendo esta relacionada com o diâmetro externo. Observou-se que uma camada externa do tronco apresentava-se sem pigmentação. A espessura desta camada foi relacionada com o diâmetro externo do caule e testaram-se as estimativas de fluxo de seiva com o sensor inserido em todo o tronco e na área do xilema.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

### Efeito do isolamento térmico do caule nas diferenças térmicas naturais

Na Figura 3 esta representado as diferenças térmicas naturais apresentadas no tronco de uma planta adulta e em uma das plantas em vaso. Em vaso a exposição do caule aos efeitos do tempo são maiores devido ao menor grau de cobertura, criando uma condição menos uniforme e com isso gerando gradientes de temperatura elevados quando comparado a plantas com maior área foliar. Tomando como base essa condição ao se definir uma metodologia que minimizem os efeitos dos referidos gradientes em plantas em vaso, estará sendo assegurado que o mesmo será eficiente em plantas adultas.

Comparando o efeito do isolamento térmico do caule no curso da diferença térmica natural (Figura 3a, 3b), observa-se que quando o segmento de tronco em que está inserido o sensor encontra-se exposto à atmosfera as diferenças são negativas durante o dia, o que significa que o sensor inserido mais próximo ao solo está submetido a uma temperatura maior que o sensor superior. Comportamento semelhante foi observado por Rojas (2003) em um ramo de planta adulta. Quando o segmento de caule encontra-se protegido por papel laminado o comportamento das diferenças se inverte, sendo positivo durante o dia e com valores absolutos muito inferiores, já que se cria um ambiente com temperaturas mais uniformes na região de medição.

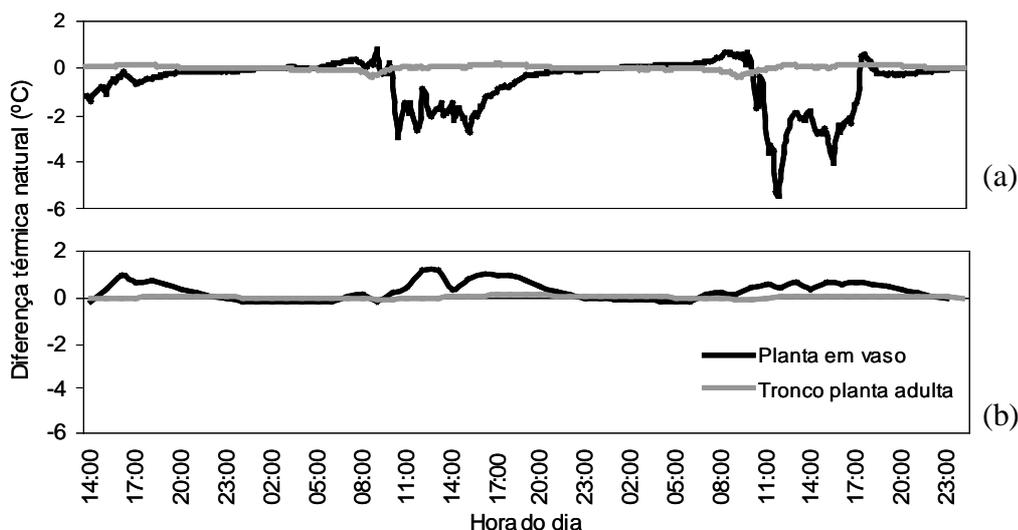


Figura 3. Diferenças térmicas naturais ao longo do dia em um tronco de planta adulta e outra em vaso (a) sem isolamento térmico e (b) com o segmento de tronco protegido por papel laminado.

Na Tabela 2 estão apresentados os valores de média e amplitude para os valores de diferenças térmicas naturais nas plantas em vaso quando submetidas a diferentes proteções do segmento de caule. As menores diferenças foram obtidas quando o segmento de caule se encontrava protegido por folhas de neoprene e papel laminado tipo saia, apresentando uma média, nas três plantas,, de 0,05°C.

Pode-se inferir que a condição de isolamento com neoprene e papel laminado minimizou as variações das diferenças térmicas naturais ao longo do estudo nas três plantas como pode ser observado pela amplitude das medidas (Tabela 2). Esse resultado refletiu o efeito combinado do neoprene, evitando o aquecimento do caule e transporte de calor ao sensor; e do laminado, evitando incidência direta de radiação no sensor e caule. Diferenças maiores ocorreram quando o segmento de caule foi coberto com papel laminado sem deixar abertura para troca de calor (0,23°C) apresentando também maior variação nas medidas térmicas, não sendo, portanto, recomendado.

Em todas as condições de isolamento observou-se diferença nos valores entre as plantas quanto à média e amplitude ao longo do período, provavelmente devido ao posicionamento dessas em campo e às diferenças quanto áreas foliares.

Tabela 2. Média, e amplitude das diferenças térmicas naturais (°C) presentes no caule das três plantas em vaso com diferentes proteções do segmento de caule.

Planta	Amplitude das diferenças térmicas naturais (°C)		
	Neoprene e laminado	Laminado aberto	Laminado fechado
1	0,7	2,2	2,3
2	0,7	1,8	3,1
3	1,5	1,5	3,7
Média das diferenças térmicas naturais (°C)			
	Neoprene e laminado	Laminado aberto	Laminado fechado
1	-0,01	-0,01	0,53
2	-0,01	0,23	0,08
3	0,17	0,19	0,09
Média	0,05	0,14	0,23

### Diferenças térmicas naturais, temperatura do ar e radiação solar global

Na Figura 4 é apresentado o curso das diferenças térmicas naturais em um ramo e tronco de mangueira adulta, temperatura do ar e radiação solar global ao longo de três dias. Observa-se que as diferenças térmicas no tronco foram menores que a do ramo provavelmente em virtude do maior sombreamento. As diferenças térmicas naturais seguiram o curso da temperatura do ar apresentando uma defasagem em relação a radiação global. Rojas (2003), em planta cítrica jovem verificou que o gradiente térmico natural é muito mais acentuado no período diurno.

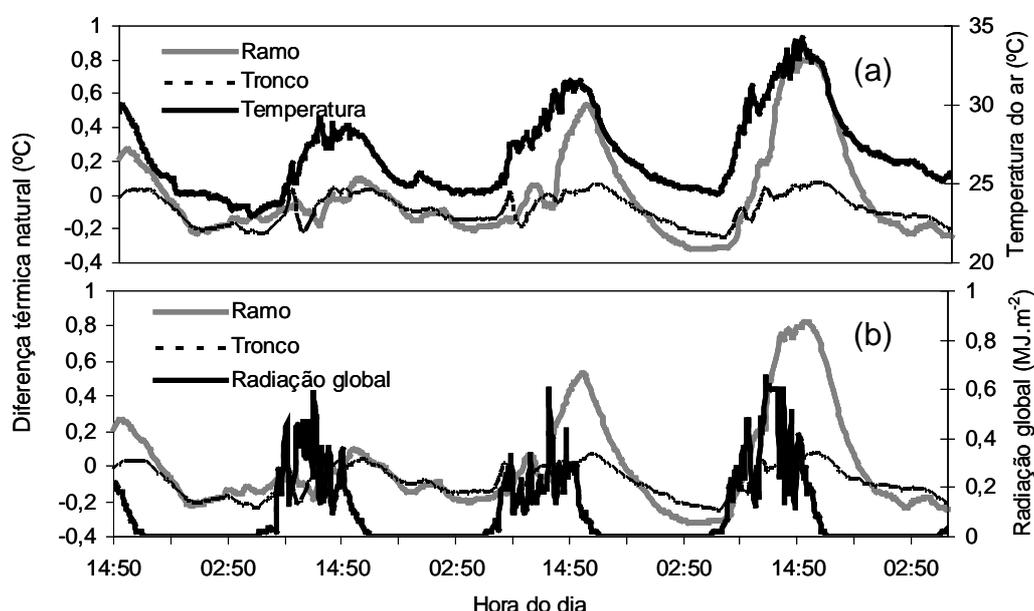


Figura 4. Diferenças térmicas naturais em ramo e tronco de mangueira adulta, temperatura do ar (a) e radiação solar global (b) ao longo de três dias

Na Tabela 3 estão apresentados os coeficientes de correlação de Pearson entre as diferenças térmicas naturais apresentadas em cada ramo e tronco, radiação solar global e temperatura do ar. Todas as variáveis apresentaram boa correlação entre si. A temperatura do ar mostrou melhor correlação com as diferenças térmicas naturais do que a radiação global em virtude da defasagem entre ambas variáveis, como discutido anteriormente.

Tabela 3. Coeficiente de correlação de Pearson\* entre as diferenças térmicas naturais medidas em ramos e tronco de uma planta adulta durante três dias consecutivos, radiação solar global (Rg) e temperatura do ar a 2 m de altura (Tar).

	Ramo 1	Ramo 2	Ramo 3	Ramo 4	Ramo 5	Tronco	Rg	Tar
Ramo 1	1,000	0,855	0,808	0,808	0,983	0,799	0,642	0,854
Ramo 2	0,855	1,000	0,781	0,781	0,878	0,783	0,408	0,861
Ramo 3	0,808	0,781	1,000	0,963	0,811	0,939	0,377	0,733
Ramo 4	0,808	0,781	0,963	1,000	0,811	0,939	0,377	0,733
Ramo 5	0,983	0,878	0,811	0,811	1,000	0,788	0,587	0,831
Tronco	0,799	0,783	0,939	0,939	0,788	1,000	0,356	0,763
Rg	0,642	0,408	0,377	0,377	0,587	0,356	1,000	0,654
Tar	0,854	0,861	0,733	0,733	0,831	0,763	0,654	1,000

\* Coeficientes significativos a 0,1 % de probabilidade

Apesar da boa correlação entre as diferenças térmicas naturais a subtração direta dos valores medidos por um sensor não aquecido instalado em outra planta ou ramo dos registrados com a sonda aquecida, deve ser observado com cautela, dada a variabilidade espacial. Na Tabela 4 estão apresentados os valores de média, máximo e mínimo para os valores de diferença térmica natural nos ramos e tronco da planta adulta. Observa-se discrepância entre os valores da média, máximo e mínimo entre os ramos. Infere-se ser necessário, portanto, para correção dos gradientes de dados individualizados das diferenças térmicas naturais obtidas com os sensores não aquecidos para estimativa das mesmas com base na temperatura do ar ou de outro ramo (Peschke et al., 2005; Tournebize & Boistard, 1998)

Tabela 4. Média, valores máximo e mínimo das diferenças térmicas naturais (DTN) presentes nos ramos principais e tronco de uma planta adulta em um período de 5 dias consecutivos

	Diferenças térmicas naturais (°C)		
	Média	Máximo	Mínimo
Ramo 1	-0,01	0,38	-0,39
Ramo 2	0,00	0,83	-0,32
Ramo 3	-0,08	0,09	-0,25
Ramo 4	-0,12	0,24	-0,49
Ramo 5	-0,14	0,40	-0,49
Tronco	-0,08	0,08	-0,25

#### **Efeito dos gradientes térmicos naturais na estimativa do fluxo de seiva**

Com a finalidade de quantificar o efeito dos gradientes térmicos naturais na estimativa do fluxo de seiva pela sonda de dissipação térmica, este foi correlacionado com a transpiração medida pelos lisímetros em escala diária. Quando se corrigem as diferenças térmicas pela subtração das diferenças térmicas naturais estimadas pela temperatura do ar, a tendência de subestimativa do fluxo pelo método diminui, como pode ser observado pelo coeficiente angular da reta ajustada. A correção das diferenças aumenta a precisão do método na estimativa do fluxo de seiva, como pode ser verificado pelo aumento da determinação ( $R^2$ ) (Figura 5). Os autores Rojas (2003), Cabidel & Do (1991) e Silva (2004) observaram tendências de subestimativa do fluxo de seiva pelo método da sonda de dissipação térmica.

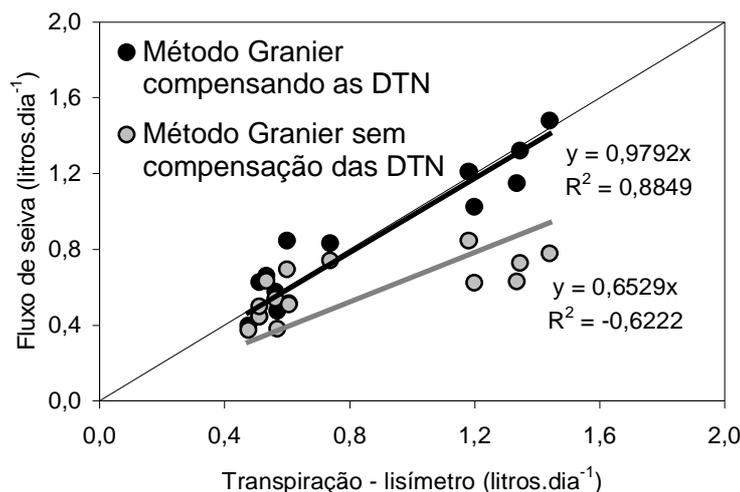


Figura 5. Relação entre transpiração medida pelo lisímetro e o fluxo de seiva pelo método Granier com e sem compensação das diferenças térmicas naturais (DTN).

Em planta adulta, apesar das diferenças térmicas naturais terem sido menores, estas promoveram uma subestimativa média de 13,15% do fluxo de seiva. A subestimativa pode ser observada na Figura 6 que apresenta a relação entre radiação solar global e fluxo de seiva pelo método Granier.

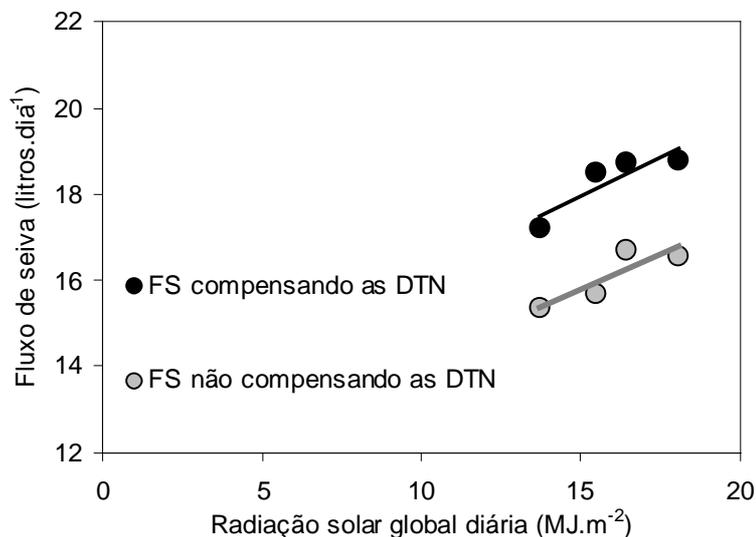


Figura 6. Relação entre a radiação global e o fluxo de seiva (FS) pelo método Granier em uma planta adulta pela soma dos fluxos nos ramos com e sem compensação das diferenças térmicas naturais (DTN).

### Área da secção condutora de seiva e posicionamento do sensor

O processo de pigmentação do caule com uso de corantes (Figura 7) mostra uma área não condutora (córTEX) de espessura que varia de 2,5 a 24,4 mm em torno da casca de caules com diâmetro de 19,3 a 196 mm. Observou-se também uma área não condutora na parte central do caule (cilindro central) de diâmetro 1,2 a 9,4 mm.

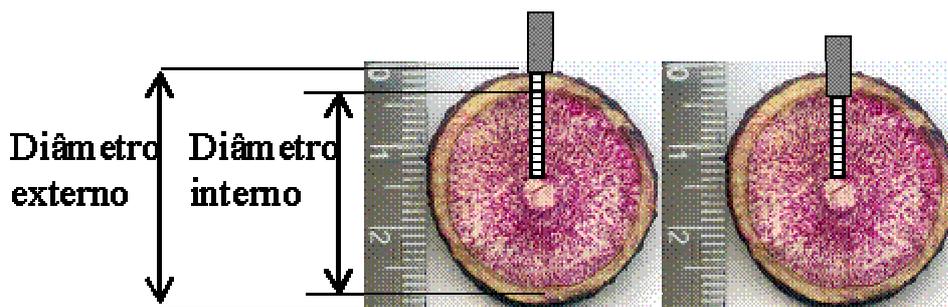


Figura 7. Secção de caule condutora (pigmentada) com esquema de posicionamento dos sensores

A área da secção condutora de seiva foi obtida pela subtração da área do cilindro central e da área do córtex pela área total da secção do caule. A relação entre o diâmetro externo do caule e a área da secção condutora de seiva está apresentada na Figura 8a. A média dos desvios absolutos da estimativa da área condutora com base no diâmetro externo foi de 6,75%.

Para o posicionamento do sensor apenas na área condutora este deve ser inserido além da camada não condutora. Essa camada apresenta uma espessura (diâmetro externo menos diâmetro interno) que de acordo com a relação apresentada na Figura 8b varia com o diâmetro do caule ( $D$ ) pela equação:

$$C = 0,0625D \quad (4)$$

Na Figura 9 têm-se as relações entre a transpiração medida pelo lisímetro e o fluxo de seiva estimado pela sonda de dissipação térmica com o sensor posicionado apenas na área condutora de seiva e em todo o tronco

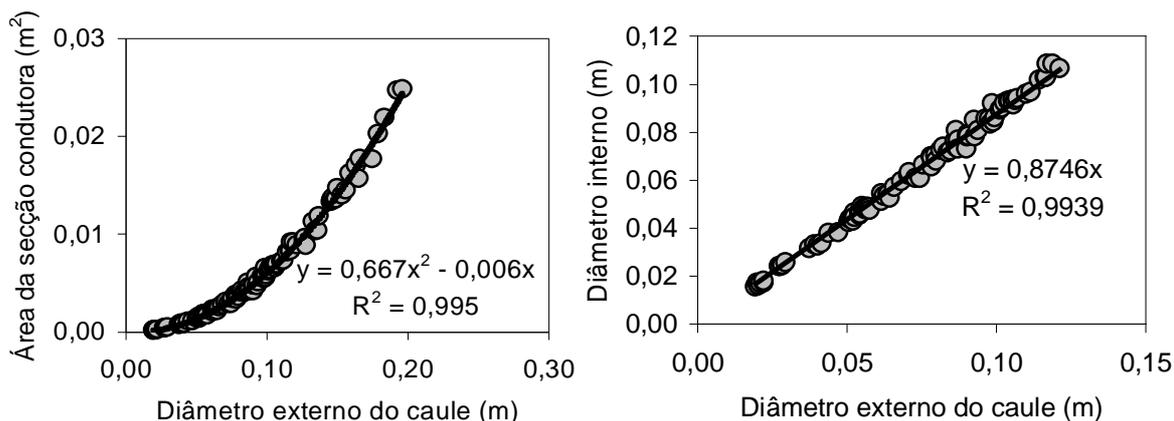


Figura 8. Relação entre diâmetro externo do caule com (a) área da secção condutora de seiva e (b) diâmetro interno.

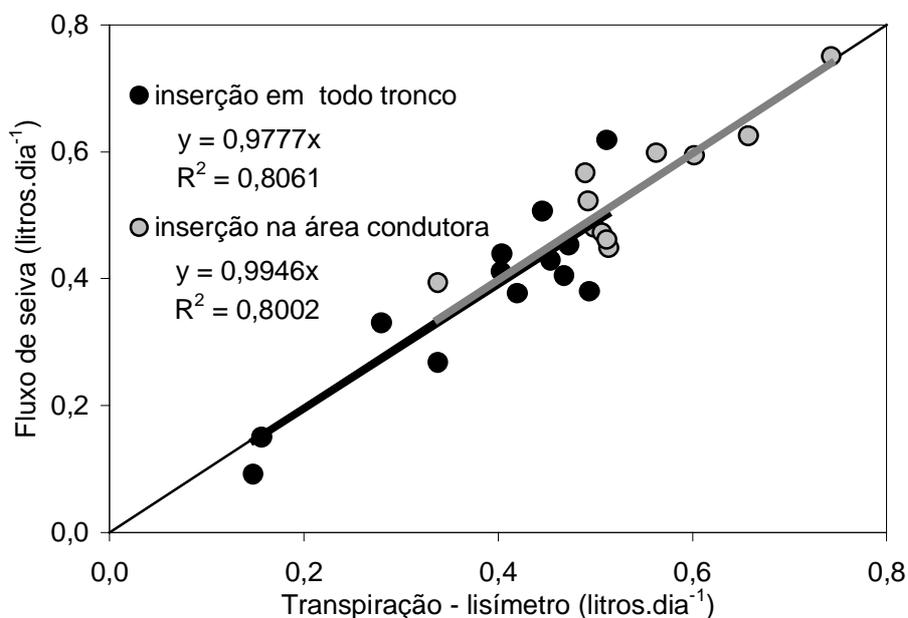


Figura 9. Fluxo de seiva com sensor inserido em todo o tronco e calculado considerando como toda a secção transversal do caule como condutora. Sensor inserido na área da secção condutora de seiva considerando para cálculo do fluxo apenas a área verdadeiramente condutora

Quando se instala o sensor de forma a medir a densidade de fluxo em toda área do caule e calcula-se o fluxo de seiva considerando como área condutora de seiva todo o segmento do caule, os valores de fluxo de seiva estimados

apresentam uma subestimativa média de 2,2%. Ao se instalar o sensor na área condutora considerando para o cálculo de fluxo de seiva a área estimada pela relação apresentada na Figura 8a a subestimativa foi de 0,5%. As pequenas diferenças entre as duas condições de instalação neste caso se devem possivelmente ao fato da superestimativa da zona do xilema (AS aproximadamente igual a 0,68 em ramos finos) deva ter compensado as subestimativas de densidade de fluxo pelo contato da sonda em área não condutora de seiva. No caso de troncos ou caules grossos, quando o córtex chega a medir aproximadamente 1 cm, o posicionamento do sensor nessa região irá subestimar sobremaneira a densidade de fluxo de seiva não sendo recomendável realizar essa aproximação..

Nadezhdina et al. (2002) apresentam perfis de distribuição da densidade de fluxo no caule em três espécies florestais (*Pinus sylvestris* L, *Prunus serotina* Ehrh, *Rhododendron ponticum* L e *Populus canescens* L) demonstrando que não se pode considerar como uniforme a distribuição radial do fluxo de seiva no caule. Lundblada et al. (2001) encontraram diferenças nas medidas de densidade de fluxo em torno de 35% entre sensores instalados a 0-2 cm e 2-4 cm de profundidade no caule. Kumagai et al. (2005) também com sensores a estas profundidades encontraram diferenças médias de 40% em estudo com a espécie florestal *Cryptomeria japonica*

## CONCLUSÕES

1. É indispensável à correção dos gradientes térmicos naturais presentes no caule para a adequada estimativa da densidade de fluxo de seiva pelo método Granier;
2. Em plantas adultas de manga, sensores posicionados no interior da copa, com elevada densidade de folhas, os gradientes térmicos foram menores comparados a ramos super expostos de plantas jovens;
3. Em ramos expostos é necessário, para minimização dos gradientes térmicos, a utilização de cobertura de todo ramo acima e abaixo do sensor com neoprene e proteção (tipo saia) com laminado de todo ramo;

4. A temperatura do ar a 2 m de altura pode ser utilizada, com eficiência, para as correções dos gradientes térmicos.
5. A área da secção condutora de seiva (AS) pode ser estimada em relação ao diâmetro do caule (D) por meio da equação  $AS = 0,667D^2 - 0,006D$
6. Os sensores devem ser instalados abaixo de uma camada externa não condutora (C) que varia com o diâmetro de caule (D) pela relação  $C = 0,0625D$

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

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

CABIBEL, B.; DO. D. Mesures thermiques des flux de seve dans les troncs et les racines et fonctionnement hydrique des arbres: I. analyse théorique des erreurs sur la mesure des flux et validation des mesures en présence de gradients thermiques extérieurs. **Agronomie**, v.11, p.669–678, 1991.

CLEARWATER M.J. et al. Potential errors in measurement of nonuniform sap flow using heat dissipation probes. **Tree Physiology**, v.19, p.681–687, 1999

COELHO FILHO, M.A. et al. Field determination of young acid lime plants transpiration by the stem heat balance method. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v.62, n.3, p.240-247, 2005

COHEN, Y., FUCHS, M. ; GREEN, G.C.. Improvement of the heat-pulse method for determining sap flow in trees. **Plant Cell Environment**, v.4, p.391-397, 1981.

D'ANGIOLELLA, G.L.B.; CASTRO NETO, M.T.; COELHO, E.F. Tendências climáticas para os tabuleiros costeiros da região de Cruz das Almas, ba. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 27., 1998, Poços de Caldas, MG. **Anais...** Lavras, MG: SBEA, 1998. v.1, p..43-45.

DO, F.; ROCHETEAU, A. Influence of natural temperature gradients on measurements of xylem sap flow with thermal dissipation probes. 1. field observations and possible remedies. **Tree Physiology**, v.22, p.641–648, 2002.

ÈERMÁK, J.; KUÈERA, J. The compensation of natural temperature gradient at the measuring point during the sap flow rate determination in trees. **Biology Plant**, v. 23 p.469–471, 1981.

FERREIRA, M.I. ; ZITSCHER, H.. Measurements performed with the Granier method in short trunks near the soil. In: WORKSHOP ON MEASURING SAP FLOW IN INTACT PLANTS, 3., 1996, Itges, Barcelona. **Anais...** Barcelona: [ S.e.], 1996. p.

GOULDEN, M.L.; FIELD, C.B. Three methods for monitoring the gas exchange of individual tree canopies: ventilated-chamber, sap-flow and Penman-Monteith measurements on evergreen oaks. **Functional Ecology**, v.8, p.25–135, 1994.

GRANIER, A. Evaluation of transpiration in a Douglas-fir stand by means of sap flow measurements. **Tree Physiology**, v.3, p.309–319, 1987.

GRANIER, A. Une nouvelle methode pour la mesure du flux de seve brute dans le tronc des arbres. **Annales Sciences Forestieres**, v.42, p.193-200, 1985.

GRANIER, A.; BRÉDA, N. Modeling canopy conductance and stand transpiration of an oak forest from sap flow measurements. **Annales Sciences Forestieres**, v.53, p.1-14, 1996

GUTTIÉRREZ, 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**, v.14, p.179–190, 1994

KÖSTNER, B.; GRANIER, A.; ÈERMÁK, J. Sapflow measurements in forest stands: methods and uncertainties. **Annales Sciences Forestieres**, v.55, p.13–27, 1998

KUMAGAI, T. et al. Effects of tree-to-tree and radial variations on sap flow estimates of transpiration in Japanese cedar. **Agricultural and Forest Meteorology**, v.135, p.110–116, 2005.

LOUSTAU, D.; DOMEQ, J.C.; BOSCH, A. Interpreting the variation in xylem sap flux density with the trunk of maritime pine (*Pinus pinaster* Ait.) application of a model for calculating water flows at tree and stand levels. **Annales Sciences Forestieres**, v.55, p.29–40, 1998

LUNDBLAD, M.; LAGERGREN, F.; LINDROTH, A. Evaluation of heat balance and heat dissipation methods for sapflow measurements in pine and spruce. **Annales Sciences Forestieres**, v.58, p.625-638, 2001.

MASSAI, R. et al. Sap flow in peach trees during water stress and recovery in two environmental conditions. **Acta Horticultural**, v. 537, p.351-358, 2000.

NADEZHINA, N. ; JAN ÈERMÁK, J.; CEULEMANS, R. T Radial patterns of sap flow in woody stems of dominant and understory species: scaling errors associated with positioning of sensors. **Tree Physiology**, v.22, p.907–918, 2002

PESCHKE, G. et al. Experimentelle Untersuchungen zum Wasserhaushalt von Fichten, Forstwiss. **Centralbl**, v. 114, p.326–339, 1995

PORTEN, M.; SCHMID, J.; RUHL, E.H. Sap flow measurements on phylloxera infested grapevines. **Acta Horticultural**, v. 537, p.367-373, 2000.

ROJAS, J.S.D. **Avaliação do uso do fluxo de seiva e da variação do diâmetro do caule e de ramos na determinação das condições hídricas de citrus, como base para o manejo de irrigação**. 2003. 110f.. Tese (Doutorado) – ESALQ/USP, Piracicaba, 2003.

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

SILVA, R.M. et al. Determinação das necessidades de rega em kiwi na região do Entre Douro e Minho. In: CONGRESSO DA ÁGUA, 7., 2004, Lisboa, Portugal. **Anais...** Lisboa, Portugal: LNEC, 2004. Disponível em: <<http://www.aprh.pt/congressoaqua2004/PDF/108.PDF>> Acesso em: 10/12/2006

TOURNEBIZE, R.; BOISTARD, S. Comparison of two sap flow methods for the estimation of tree transpiration. **Annales Sciences Forestieres**, v.55, 707-713, 1998.

## CAPITULO 3

### MÉTODO DE BALANÇO DE CALOR CAULINAR PARA ESTIMATIVA DE TRANSPIRAÇÃO DE PLANTAS JOVENS DE LARANJA E MANGA<sup>2</sup>

## MÉTODO DE BALANÇO DE CALOR CAULINAR PARA ESTIMATIVA DE TRANSPIRAÇÃO DE PLANTAS JOVENS DE LARANJA E MANGA

**Resumo:** O presente estudo teve como objetivo avaliar o método de balanço de calor em plantas jovens de laranja e manga em ambiente protegido. O trabalho foi conduzido na Embrapa Mandioca e Fruticultura localizada em Cruz das Almas – BA. Foram realizadas estimativas de fluxo de seiva em 2 plantas de manga plantadas em vasos de 15 e 50 litros, instalados sobre plataformas de pesagem de 45 e 140 kg. Posteriormente, foi determinado o fluxo de seiva em 3 plantas de laranja, duas também instaladas em lisímetros de pesagem. Em outra planta, em vaso de 15 litros, foi mantido um lençol freático constante a fim de garantir transpiração potencial. Foram monitorados a radiação solar global e o potencial matricial de água no solo. Os valores de fluxo de seiva obtidos foram comparados com a transpiração medida pelos lisímetros em intervalos de integração de 10 minutos, 1 h, 2 h, 4 h e 24 h. Os resultados demonstraram que o método do balanço de calor estima a transpiração diária de forma precisa em intervalos diários ( $R^2 > 0,89$ ), subestimando em média 4,6% a transpiração diária em plantas de laranja e superestimando em média 0,3% no caso das plantas de manga quando em condições de boa disponibilidade de água no solo. Em condições de baixa disponibilidade hídrica acentua-se a tendência do método do balanço de calor em subestimar a transpiração em laranja (16%). A transpiração diária por área foliar apresentou boa correlação com a radiação global. Em condições de déficit hídrico acentua-se a tendência de subestimar a transpiração em laranja (16%).

**Palavras chave:** fluxo de seiva, lisímetros, balanço de calor.

## HEAT BALANCE METHOD FOR ESTIMATE OF TRANSPIRATION OF YOUNG PLANTS OF ORANGE AND MANGO

**Abstract:** The present study it had as objective to evaluate the heat balance method in young plants of orange and mango in protecting environment. The work was lead at Embrapa Mandioca e Fruticultura Tropical, Cruz das Almas - BA. Estimates of sap flow in 2 mango plants planted in vases of 15 and 50 liters, installed on weighting platforms of 140 and 45 kg Later, was determined the sap flow in 3 plants of orange, two also installed in weighting platforms. In another plant, in vase of 15 liters, was kept a water table sheet in order to guarantee potential transpiration. Had been monitored the global solar radiation and the matric water potential in the ground. The values of sap flow gotten had been compared with the transpiration measured for the lysimeters in intervals of integration of 10 minutes, 1 h, 2 h, 4 h and 24 h. The results had demonstrated that the method of the heat balance esteem the transpiration necessarily in daily intervals ( $R^2$  0,89) underestimating in average 4.6% daily transpiration in orange plants and overestimating in average 0.3% in mango plants when in conditions of good water availability in the ground. In conditions of low water availability it is accented trend of the heat balance method in to underestimate transpiration in orange plants (16%). Daily transpiration for foliar area presented good correlation with the global radiation

**Key words:** sap flow, thermal methods, lysimeter.

## INTRODUÇÃO

Na agricultura irrigada é importante minimizar as perdas de água, principalmente por percolação e escoamento superficial, pois além do desperdício da água e energia necessária ao seu bombeamento, esta pode lixiviar os fertilizantes usados para os aquíferos causando a poluição destes. Ao mesmo tempo é necessária uma irrigação suficiente para manter a umidade do solo em níveis aceitáveis para o bom desenvolvimento das plantas e garantia de rendimento que assegure a viabilidade econômica do empreendimento. A transpiração é o principal elemento da evapotranspiração em culturas irrigadas por irrigação localizada, onde apenas uma parte da área recebe água, sendo de fundamental importância na determinação do consumo hídrico.

Atualmente, a grande parte dos estudos sobre medidas de transpiração de plantas, principalmente em frutíferas lenhosas, são com base em metodologias de fornecimento de calor no tronco. Sensores são fixados ou inseridos nos troncos ou ramos de plantas para medição do fluxo de seiva, que no período de 24 horas tem demonstrado grande aproximação com a transpiração (COELHO FILHO, 2005). Na determinação do fluxo de seiva (transpiração), têm sido utilizados métodos com base no fornecimento de pulsos de calor ao tronco (SWANSON, 1994), no fornecimento contínuo de calor ao tronco, como no método da sonda de dissipação térmica (GRANIER, 1985) e no método de balanço de calor (SAKURATANI, 1981). Esses métodos se destacam por serem não destrutivos e permitirem o estudo simultâneo da transpiração em muitas plantas em nível de campo. O método de balanço de calor apresenta a vantagem de não necessitar de calibração, enquanto que os outros dois, por medirem, em princípio, a velocidade da seiva, exigem a determinação, da área efetiva do xilema para o transporte hídrico, de modo a se transformar a densidade de fluxo de seiva em fluxo de seiva

O método de balanço de calor consiste na aplicação de uma potência que é dissipada na forma de calor em regime constante em um segmento de caule. O resultado da subtração do calor armazenado e perdido por condução radial e axial pela potência fornecida representa o calor transportado pela seiva. É possível então relacionar o fluxo volumétrico de seiva pelo calor transportado

(SAKURATANI,1981). Vários autores adotaram este método tanto em plantas herbáceas ( BAKER & VAN BAVEL, 1987; HEILMAN & HAN, 1990; COHEN et al., 1990), como em plantas lenhosas (ANGELOCCI & VALANCOGNE, 1993; MARIN, 2000; TREJO-CHANDIA et al., 1997).

Entre as principais fontes de erro observadas por diversos autores estão a não consideração do valor do calor armazenado no segmento de caule aquecido que se torna importante em plantas lenhosas de grande porte (VALANCOGNE & NASR, 1989; WEIBEL & VOS, 1994); a inadequada colocação dos termopares medidores da variação de temperatura no caule e o contato insuficiente entre o sensor e a superfície do caule (HEILMAN & HAN, 1990; WEIBEL E VOS, 1994). Angelocci (2001) recomenda um bom isolamento térmico para evitar a flutuação de temperatura do ambiente e incidência direta de radiação no tronco próximo ao segmento amostrado.

Weibel & Vos (1994), em macieira, estudaram diferentes intervalos de medida com o fluxo de seiva, medido pelo método de balanço de calor e transpiração. Steinberg et al. (1989), em plantas lenhosas, também determinaram os erros em diferentes tempos de integração. Trejo-Chandia (1997) também comparou esse método com a transpiração obtida por lisímetros de pesagem em três espécies de plantas, tanto em escala diária quanto horária.

Este trabalho teve como objetivo comparar o método de balanço de calor com medidas lisimétricas em plantas jovens de laranja e manga em ambiente protegido e testar o método em condições de baixa disponibilidade hídrica.

## **MATERIAIS E MÉTODOS**

O experimento foi conduzido na EMBRAPA Mandioca e Fruticultura Tropical localizada em Cruz das Almas (12°40'S, 39°30'W; 225m) compreendendo estudos com a cultura da laranja e manga. O clima da região é classificado como úmido a sub-úmido com pluviosidade média anual de 1.143 mm (D'ANGIOLELLA et al., 1998).

Com o objetivo de efetuar medidas de transpiração foram plantadas mudas de laranja e manga em vasos de 15 litros e 50 litros preenchidos com uma camada de brita e sobre esta uma folha de espuma de 5 mm. O sistema de

drenagem foi constituído de uma mangueira de ½ polegada acoplada a parte inferior dos vasos. Os vasos foram instalados sobre plataformas de pesagem de capacidade de 45 e 140 kg, funcionando assim como lisímetros de pesagem. Para que os lisímetros medissem apenas a transpiração a superfície do solo foi coberta com lona plástica evitando perdas de água por evaporação durante as medições

Os erros máximos dos sistemas de pesagem estão apresentados na Tabela 1. Os erros foram obtidos segundo metodologia sugerida por Wheeler & Ganji (1996), e aplicada por Santos et al. (2006) e Vellame et al. (2005). Os erros apresentados estão em valores adequados ao estudo dado sua pequena magnitude e pela redução do erro de repetibilidade quando tomadas às médias horárias.

Tabela 1. Erros dos lisímetros de pesagem.

	Erro (g)	
	Lisímetro 45 kg	Lisímetro 140 kg
Erro máximo absoluto	6,530	44,650
Repetibilidade	10,310	58,360
Linearidade	2,520	17,740
Histerese	8,840	21,460

### Princípio de funcionamento do método do balanço de calor caulinar

A partição de calor no segmento de caule está ilustrado na Figura 1. Por esse método o calor fornecido ao tronco ( $P_{in}$ ) é repartido no segmento de caule amostrado em calor armazenado ( $Q_s$ ) em fluxos de calor conduzidos pelo caule acima e abaixo do volume de controle ( $Q_v$ ) e o fluxo de calor que sai radialmente através do sensor ( $Q_r$ ). Os fluxos axiais ( $Q_v$ ) são estimados considerando-se a condutividade térmica do caule ( $0,42 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ ) e os gradientes térmicos nas extremidades de segmento de caule amostrados, estes são medidos com termopares posicionados acima e abaixo da secção aquecida e em contato com o caule. O calor armazenado no caule das plantas foi desprezado levando-se em consideração que em diâmetros inferiores a 3 cm a desconsideração de seu valor não causa prejuízo na qualidade das estimativas (WEIBEL & VOS, 1994; GRIME

et al., 1995). Os fluxos radiais ( $Q_r$ ) são estimados a partir do conhecimento da condutividade térmica do substrato de cortiça ( $K_{sh}$ ) do qual é constituído o fluxímetro radial e da diferença de temperatura adjacente ao elemento aquecedor e da superfície externa da cortiça, calculada com uma termopilha com junções alternadas (fluxímetro), anexada ao aquecedor. O fluxo de seiva é obtido dividindo-se o calor residual pelo calor específico da seiva ( $c_p = 4,186 \text{ J.g}^{-1}.\text{K}^{-1}$ ) e pela diferença de temperatura da seiva entre o limite superior e inferior do segmento aquecido ( $\Delta T$ ).

Os valores de  $K_{sh}$  podem ser calculados em condição de fluxo nulo (4:00 às 5:00 hs) e o fluxo de seiva ( $F$ ) é estimado pela equação 1 (SAKURATANI,1981; BAKER & VAN BAVEL, 1987):

$$F = \frac{P_{in} - Q_V - Q_R}{c_p - \Delta T} \quad (1)$$

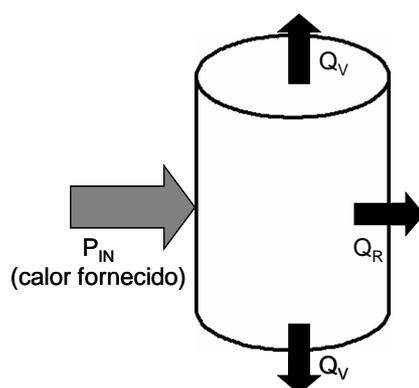


Figura 1. Balanço de calor em um segmento de caule

### Determinação do fluxo de seiva em manga e laranja e transpiração nos lisímetros

Sensores comerciais de balanço de calor (modelos SGB9 e SGA13; Dynamax Inc.) foram instalados em 2 plantas de manga. Os sensores e os lisímetros foram conectados a um sistema de aquisição de dados formado por um “datalogger” CR10X acoplado a um multiplexador AM 416 (Campbell Sci.), programado para realizar leituras a cada 10 segundos e armazenar a média dos dados a cada 10 minutos. As medições foram efetuadas no período de 09 a 13 de novembro de 2004. A Figura 2 mostra a plataforma de pesagem e a instalação de um sensor na planta em vaso de 15 litros.



Figura 2. Plataforma de pesagem de 45kg e instalação de um sensor de balanço de calor caulinar

No período de 07 a 30 de abril de 2005 sensores de balanço de calor (modelos SGB9, SGA16 e SGA13; Dynamax Inc.) foram instalados em 3 plantas de laranja, duas das quais monitoradas por lisímetros de pesagem.

Os valores de fluxo de seiva obtidos foram comparados com a transpiração medida pelos lisímetros em escalas de 10 minutos, 1 h, 2 h, 4 h e 24 h.

### **Determinação do fluxo de seiva em condições de baixa disponibilidade hídrica**

Das plantas de laranja duas foram monitoradas por lisímetros de pesagem e em outra planta manteve-se um lençol freático constante através de acoplamento pelo dreno do vaso a fim de se obter transpiração potencial. O experimento foi conduzido no período de 04 a 10 de maio de 2005.

Monitorou-se a radiação solar global e o potencial matricial do solo. Inicialmente as plantas foram irrigadas buscando-se deixar o solo em capacidade de campo. Depois de um período foi cessada a irrigação para observar o comportamento do sensor em condições de déficit hídrico. Quando o potencial matricial das plantas foi inferior a  $-80$  kPa a irrigação foi retomada.

### **Determinação da área foliar das plantas**

Foram determinadas as áreas foliares (AF) das plantas, medindo-se o maior comprimento (C) e largura (L) de 10% do total das folhas. A área foliar foi calculada de acordo com a equação 2 (COELHO FILHO et al., 2003).

$$AF = 0,72.C.L \quad (2)$$

Nas plantas de manga utilizou-se a mesma metodologia, porém aplicada ao total das folhas. A área foliar foi calculada pela expressão (OLIVEIRA, 2005)

$$AF = 0,5646.C.L + 4,7508 \quad (3)$$

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Figura 3 estão apresentados os cursos da transpiração e do fluxo de seiva ao longo de 5 dias, em plantas de laranja e manga. Observa-se que as duas variáveis apresentam comportamento semelhante ao longo do dia. Tanto as medidas de fluxo de seiva quanto de transpiração são positivas e crescentes até o horário de maior demanda hídrica do dia e redução no período da tarde.

Observa-se na Figura 3 pequenas variações na resposta dinâmica entre as medidas lisimétricas e de fluxo de seiva. Isto se deve, provavelmente, segundo Coelho Filho (2002), à resposta do mecanismo estomático das plantas, capacitância hídrica do caule acima do sensor e da capacitância calorífica do tronco fazendo com que o método não detecte mudanças rápidas no processo transpiratório. Resultados de pesquisas com plantas herbáceas e lenhosas apontam como sendo entre 5 e 20 min a resposta dinâmica do método do balanço de calor caulinar (BAKER & VAN BAVEL, 1987; STEINBERG et al., 1989; CERMARK et al., 1984, TREJO-CHANDIA et al., 1997).

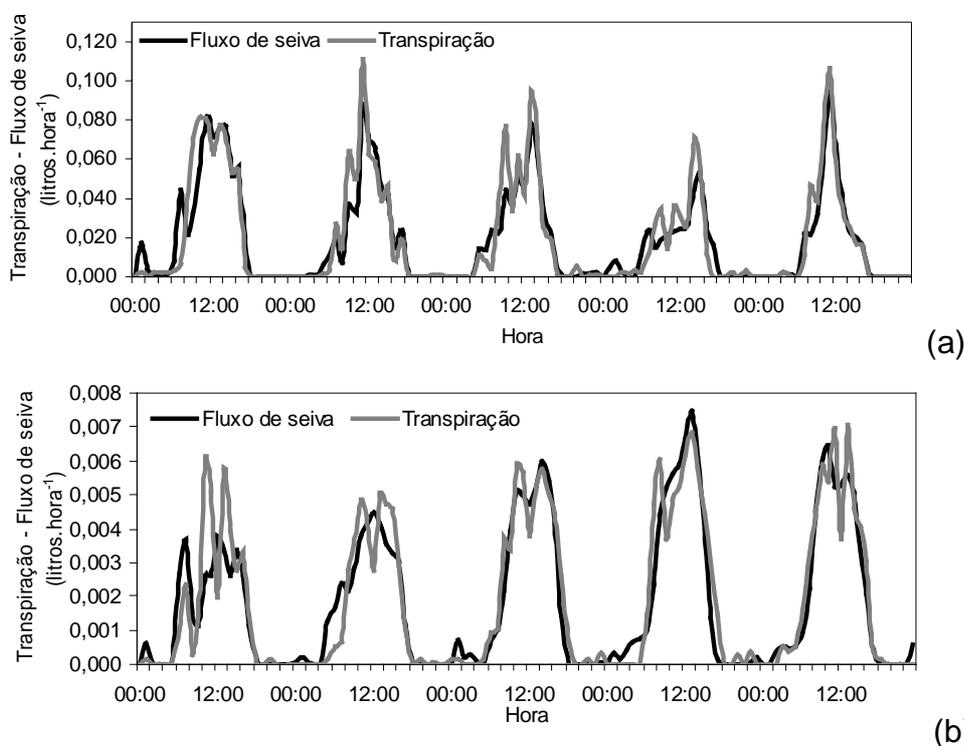


Figura 3. Curso da transpiração medida em lisímetro de pesagem e do fluxo de seiva determinado pelo método do balanço de calor no caule em plantas de laranja (a) e manga (b), em períodos distintos.

A Figura 4 mostra a relação entre a transpiração, por unidade de área foliar, em função da radiação global. A transpiração acompanhou a disponibilidade de energia no sistema. Entretanto, diversos fatores além da área foliar, da demanda atmosférica e disponibilidade de água afetam o processo transpiratório. Coelho Filho (2002) cita, além dessas variáveis, a geometria de plantio, espaçamento da cultura e porta-enxerto. Sendo assim esses resultados não devem ser usados em condições diferentes do estudo, já que o trabalho teve como objetivo testar o método do balanço de calor caulinar e não apresentar modelos de estimativa de evapotranspiração.

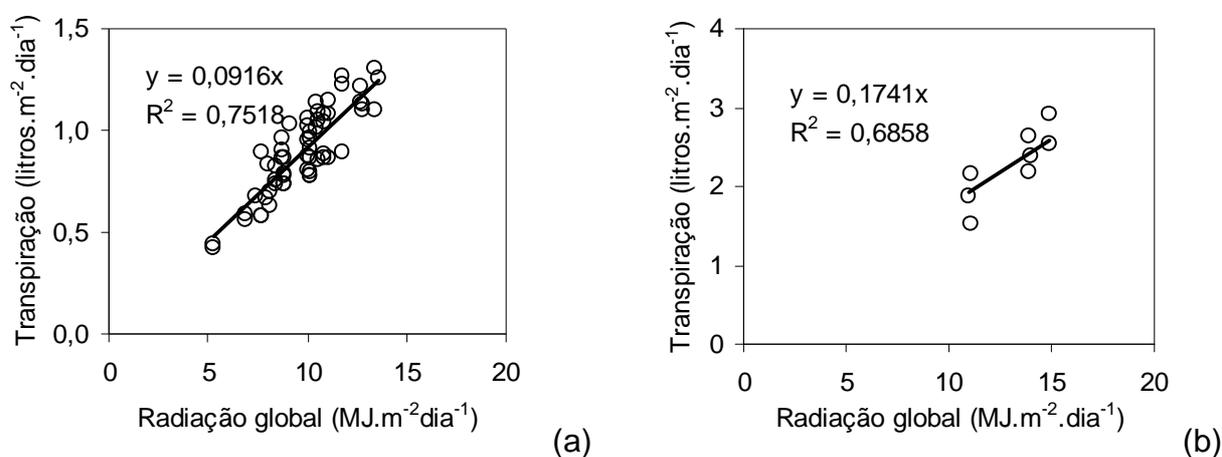


Figura 4. Relação entre a transpiração diária determinado pelo método do balanço de calor por unidade de área foliar ( $\text{litros. m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$ ) e radiação global em plantas de laranja (a) e manga (b).

A Tabela 2 apresenta os valores dos coeficientes angulares (a) e de determinação ( $R^2$ ) obtidos por regressões lineares com intercepto forçado para medidas de fluxo de seiva e transpiração (lisímetro) das plantas. Observa-se que quanto maior o intervalo de tempo utilizado para as comparações maior é a concordância entre os dois métodos. Tendência esta também verificada por Coelho Filho et al. (2005) com plantas de lima ácida 'Tahiti' em nível de campo. O autor atribuiu esta tendência à elevada variabilidade pontual das medidas de transpiração nos lisímetros, devido à ação do vento e a rugosidade da planta. No caso do presente estudo não se observou este comportamento em medidas na escala de 1 hora (Figura 3). Uma possível explicação do aumento da correlação

com o intervalo de tempo utilizado é a anulação da variabilidade das medidas de ambas variáveis em torno de um ponto médio quando se faz a integração dos dados com maior número de pontos. Na Figura 5 são apresentadas as medidas em intervalos de 1 e 24 horas. Existiu a tendência do método do balanço de calor subestimar (4,6%) os valores de transpiração diária em plantas de laranja e de superestimar (0,3%) no caso das plantas de manga.

Weibel & Vos (1994), em estudo de fluxo de seiva em macieira pelo método do balanço de calor, observaram em intervalos curtos de medida erros consideráveis entre o fluxo de seiva, medido pelo método de balanço de calor e transpiração. Os autores afirmam que em intervalos maiores que 24 horas o erro é de 4 % enquanto que a curto intervalo de tempo (30 minutos) o erro alcança 20%. Steinberg et al. (1989) observaram em plantas lenhosas que quando as medidas foram integradas em mais de 24 horas o erro pode ser menor que 4 %. Entretanto, Trejo-Chandia (1997), comparando esse método com a transpiração obtida por lisímetros de pesagem em milho, tomate e limoeiros jovens, encontrou boa concordância com cerca de 10% de erro tanto em escala diária quanto como horária.

Tabela 2. Coeficiente linear (a), coeficiente de determinação ( $R^2$ ) e número de observações (n) de regressões lineares com coeficiente da regressão forçado em zero ( $y = a.x$ ) das medidas de fluxo de seiva estimado pelo método de balanço de calor em função de medidas lisimétricas em plantas jovens de laranja e manga em intervalos de 1, 2, 4, 6 e 24 horas.

Tempo de integração (horas)	Laranja			Manga		
	a	$R^2$	n	a	$R^2$	n
1	0,8572	0,8746	1104	0,9161	0,7503	240
2	0,8839	0,9193	552	0,9421	0,8622	120
4	0,8914	0,9422	276	0,9755	0,9136	60
6	0,9189	0,9349	184	0,9759	0,9313	40
24	0,9542	0,9582	46	1,0299	0,8990	10

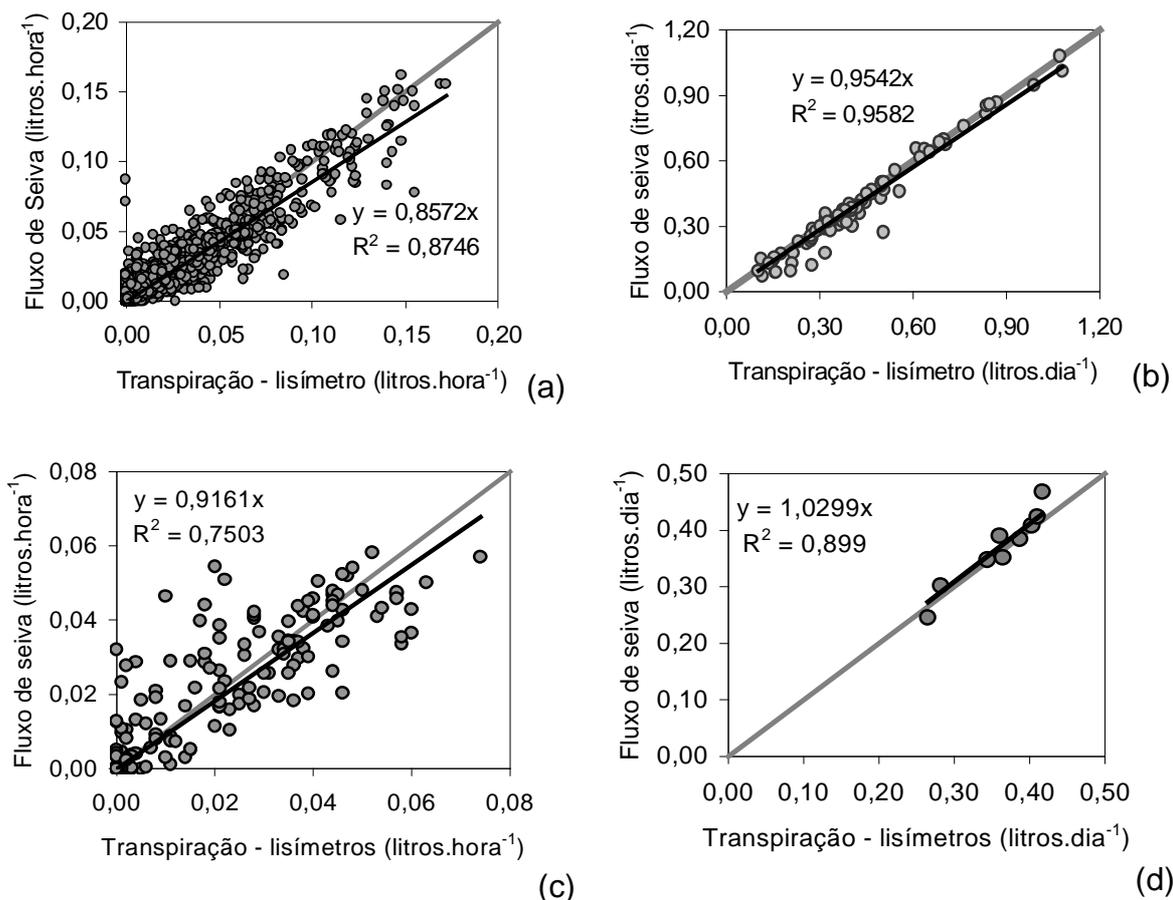


Figura 5. Relação entre transpiração medida em dois lisímetros de pesagem (litros) e fluxo de seiva determinado pelo método do balanço de calor (litros) em plantas de laranja (a, b) e manga (c, d) em períodos de 1 e 24 horas.

A Figura 6 mostra a relação entre transpiração e fluxo de seiva em condições de baixa disponibilidade hídrica. Nessas condições, acentua-se a tendência do método do balanço de calor em subestimar a transpiração em laranja (16%). Os erros absolutos, entretanto são pequenos nesse caso, visto que nessas condições a transpiração não é potencial. A precisão do método não sofreu grandes alterações já que o coeficiente de determinação foi de 0,9256 enquanto que em condições de transpiração potencial apresentado na Figura 4 foi de 0,9582.

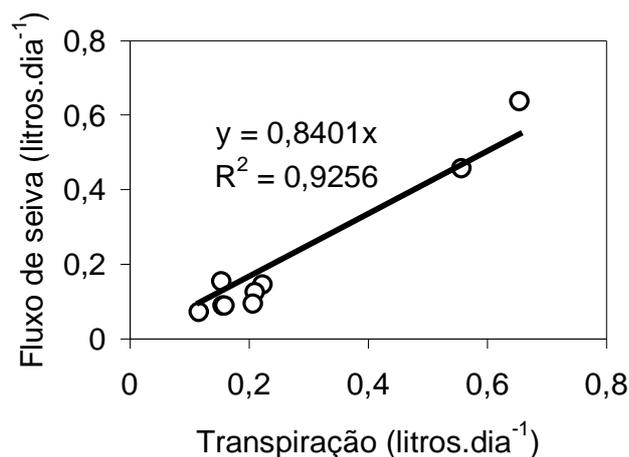
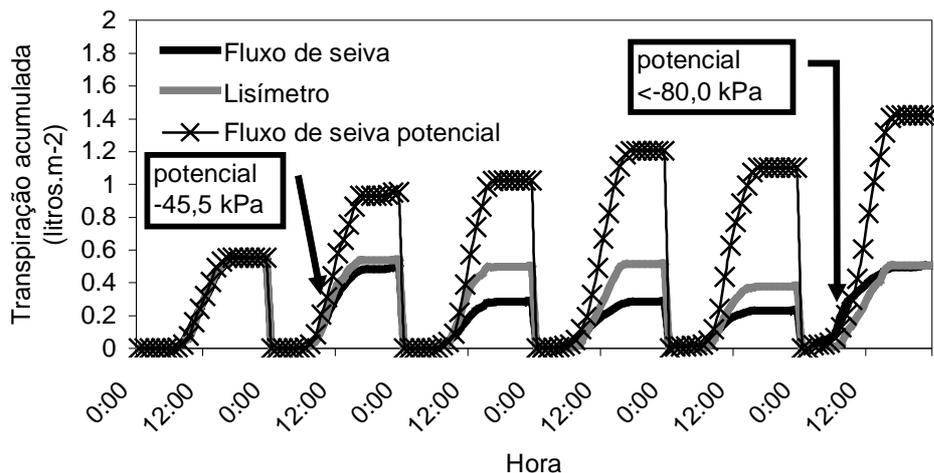


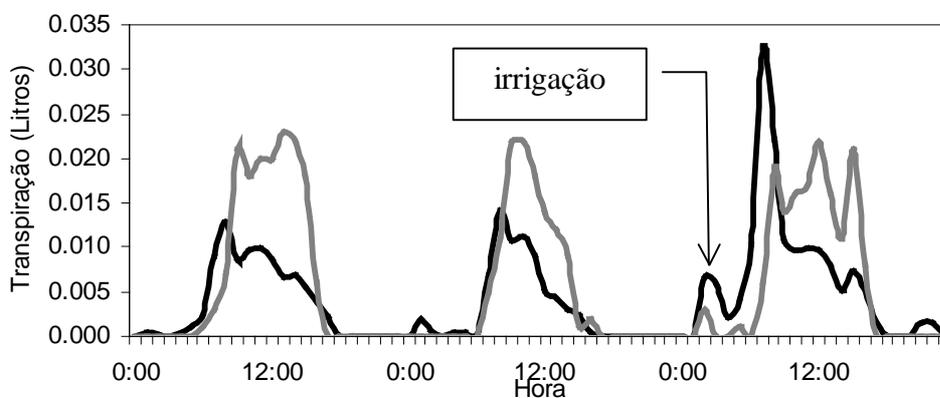
Figura 6. Relação entre transpiração medida por dois lisímetros de pesagem e fluxo de seiva determinado pelo método do balanço de calor em plantas de laranja em condições de baixa disponibilidade hídrica.

A tendência do fluxo de seiva subestimar a transpiração, nos casos de elevados déficits hídricos no solo, pode ser explicada em função da ocorrência de perda de água da planta para a atmosfera sem a devida reposição pelo solo (balanço negativo de água na planta). Isso promove a redução da massa medida pelo lisímetro, porém, sem fluxo de seiva no caule. David et al. (1997), comparando o método de dissipação de calor em cultura de eucalipto com a evapotranspiração pelo método de Pennan-Monteith observaram uma tendência similar de variação entre o fluxo de seiva e evapotranspiração sob boas condições hídricas do solo. Entretanto, à medida que o solo secava a evapotranspiração passava a ser proporcionalmente superior.

A Figura 7a apresenta a transpiração acumulada por unidade de área foliar em planta de laranja com suprimento adequado de água e com solo em processo de secamento. Foram realizadas medidas de fluxo de seiva pelo método do balanço de calor e transpiração por lisímetro de pesagem. O potencial matricial foi monitorado e ao atingir o valor de -80 kPa procedeu-se a irrigação da planta. Verifica-se na Figura 7a que as transpirações acumuladas (litros.m<sup>-2</sup>) são mais elevadas quando determinadas pela lisimetria. Observa-se na figura 7 a e 7b que após o evento de irrigação a transpiração foi inferior no começo do dia comparada aos valores de fluxo de seiva, provavelmente, devido à reposição da água para os tecidos vegetais. Ao final do dia as transpirações acumuladas foram parecidas, o que não ocorria anteriormente.



(a)



(b)

Figura 7. Transpiração acumulada por unidade de área foliar em planta de laranja com suprimento adequado de água e com solo em processo de secamento medidas por fluxo de seiva e lisímetro de pesagem (a). Curso da transpiração medida em lisímetro de pesagem e do fluxo de seiva determinado pelo método do balanço de calor no caule após irrigação (b).

## CONCLUSÕES

1. O método do balanço de calor mostrou-se preciso na estimativa da transpiração diária subestimando em média 4,6% a transpiração diária em plantas de laranja e superestimando em média 0,3% no caso das plantas de manga quando em condições de boa disponibilidade de água no solo. Em condições de

baixa disponibilidade hídrica o método do balanço de calor em subestimou em 16% a transpiração em laranja.

2. A transpiração diária, por unidade área foliar, apresentou boa correlação com a radiação global.

3. Em condições de déficit hídrico acentua-se a tendência do método do balanço de calor em subestimar a transpiração em laranja (16%).

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANGELOCCI, L.R. **Métodos e técnicas de estudo das relações água-planta-atmosfera**. Piracicaba: ESALQ/USP, Departamento de Ciências Exatas, 2001. 104p.

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

BAKER, J.M.; VAN BAVEL, C.H.M. Measurement of mass flow of water in the stems of herbaceous plants. **Plant, Cell and Environment**, v.10, p.77-782, 1987.

CERMAK, J.; KUCERA, L.; ZIDECK, V. Xylem water flow in crack willow tree (*Salix fragillis* L.) in relation to do diurnal changes of environment. **Oecologia**, v.64, p.145-151, 1984

COELHO FILHO, M.A.. **Determinação da transpiração máxima em um pomar jovem de lima ácida 'Tahiti1 (Citrus latifolia Tan,) e sua relação com a evapotranspiração de referência**. 2002. 91f.. Tese – Doutorado- ESALQ/USP, 2002..

COELHO FILHO, M.A. et al. Field determination of young acid lime plants transpiration by the stem heat balance method. **Scientia Agrícola**, Piracicaba, v.62, n.3, p.240-247, 2005.

COELHO FILHO, M.A. et al. Avaliação de métodos diretos e indiretos na estimativa de área foliar em árvores de lima ácida 'Tahiti'. (compact disc) In: CONGRESSO NACIONAL DE IRRIGAÇÃO E DRENAGEM, 13., 2003, Juazeiro, **Anais**. Juazeiro: ABID, 2003. 1CD-Rom.

COHEN, Y., FUCHS, M. ; GREEN, G.C.. Improvement of the heat-pulse method for determining sap flow in trees. **Plant Cell Environment**, v.4, p.391-397, 1981.

D'ANGIOLELLA, G.L.B., CASTRO NETO, M.T.; COELHO, E.F. Tendências climáticas para os tabuleiros costeiros da região de Cruz das Almas, BA. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 27., 1998, Poços de Caldas, MG. **Anais...** Lavras, MG: Sociedade Brasileira de Engenharia Agrícola, 1998. v.1, p.43-45.

DAVID, T.S. et al. Transpiration from a mature Eucalyptus globules plantation in Portugal during a spring-summer period of progressively higher water deficit. **Oecologia**, v.110, p.153-159, 1997

GRANIER, A. Une nouvelle méthode pour la mesure du flux de sève brute dans le tronc des arbres. **Annales des Sciences Forestières**, v. 42, p. 193-200, 1985.

GRIME, V. L.; MORISON, J. I. L.; SIMMONDS, L. P. Sap flow measurements from stem heat balance: a comparison of constante with variable powers methods. **Agricultural and Forest Meteorology**, v.74, p.27-40, 1995.

HEILMAN, J.L.; HAM, J.M. Measurement of mass flow rate of sap in *Ligustrum japonicum*. **Hortscience**, v.25, n.4, p.465-467, 1990

MARIN, F.R.. **Evapotranspiração, transpiração e balanço de energia em um pomar de lima ácida 'Tahiti'**. 2000 74f. Dissertação ( Mestrado) – ESALQ/USP, Piracicaba, 2000..

OLIVEIRA, G. X. S. **Determinação da transpiração em mangueiras (*Mangifera indica L.*), através do fluxo de seiva, sua relação com a evapotranspiração e**

**área foliar.** Dissertação (Mestrado) – Escola de Agronomia, UFBA, Cruz das Almas, BA, 2005.

ROJAS, J.S.D. **Avaliação do uso do fluxo de seiva e da variação do diâmetro do caule e de ramos na determinação das condições hídricas de citrus, como base para o manejo de irrigação.** 2003. 110f.. Tese (Doutorado) – ESALQ/USP, Piracicaba, 2003..

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

SANTOS, R. M.et al. Montagem e acurácia de um sistema experimental de pesagem para calibração de sensores de umidade do solo. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 30, n. 6, p. 1162-1169, 2006.

STEINBERG, S.; BAVEL, C.H.M.; CORNELIUS, H.M. van. A gauge to measure mass flow rate sap in steams and trunks of wood plants. **Journal of the American Society for Horticultural Science**, v.114, n.3, p.466-472, 1989.

SWANSON, R.H. Significant historical developments in thermal methods for measuring sap flow in trees. **Agricultural and Forest Meteorology**, v.72, p.113-132, 1994.

TREJO-CHANDIA, J.E. **Avaliação do método de balanço de calor na estimativa da transpiração de tomateiros, plantas de milho e mudas de limoeiro.** 1997. 75f. Tese (Doutorado) – ESALQ/USP, Piracicaba, 1997..

VALANCOGNE, C.; NASR, Z. Measuring sap flow in the steam of small trees. In: BORGHETTI, M.; GRACE, J.; RASCHI, A. **Water transport in plants under climatic stress.** Cambridge: Cambridge University Press, 1993. p.166-173.

VELLAME, L. M.; COELHO FILHO, M. A.; COELHO, E. F. Lisímetro de pesagem e de lençol freático de nível constante para uso em condições de ambiente protegido. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, 14.

2005, Campinas. **Anais...** Campinas: Sociedade Brasileira de Agrometeorologia, 2005. 1 CD ROM.

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

## CONSIDERAÇÕES FINAIS

A quantificação do fluxo hídrico das plantas é de interesse não só nos estudos das relações hídricas no sistema solo-planta-atmosfera, mas também para o monitoramento e manejo da irrigação.

O método do balanço de calor caulinar permitiu obter valores diários da transpiração de forma precisa em plantas jovens de laranja e manga em condições de boa disponibilidade hídrica do solo. O método por não necessitar de calibração pode ser usado de forma confiável nessas culturas nos diâmetros de caule estudados.

O método da sonda de dissipação térmica permite pelas suas características um maior número de medidas em campo sem as limitações quanto ao diâmetro de caule apresentado pelos sensores do método do balanço de calor. Entretanto, para sua aplicação em manga fez-se necessário:

1º. Ajuste da equação geral de Granier

2º Caracterização da seção de caule quanto à condução de seiva bruta, para determinação da área efetiva do xilema e correto posicionamento das sondas.

3º Correção do gradiente térmico natural no caule, sendo necessário, portanto, a estimativa das diferenças térmicas naturais de forma individualizada.

Tendo em vista os resultados apresentados nesse trabalho, sugerem-se novas pesquisas para o estudo de fluxo de seiva utilizando sonda de dissipação, para caracterização radial do fluxo, gradientes térmicos no caule em plantas de idades e condições ambientais diferentes. Novos estudos com base em medidas lisimétricas em plantas mais velhas de manga e laranja são importante a para validação dos métodos térmicos avaliados.