**DETERMINAÇÃO DA TRANSPIRAÇÃO MÁXIMA DE UM POMAR JOVEM
DE LIMA ÁCIDA 'TAHITI' (*Citrus latifolia* Tan.) E SUA RELAÇÃO COM A
EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA**

MAURÍCIO ANTONIO COELHO FILHO
Engenheiro Agrônomo

Orientador: Prof. Dr. **LUIZ ROBERTO ANGELOCCI**

Tese apresentada à Escola Superior
de Agricultura "Luiz de Queiroz",
Universidade de São Paulo, para
obtenção do título de Doutor em
Agronomia, Área de Concentração:
Irrigação e Drenagem

PIRACICABA
Estado de São Paulo - Brasil
Julho - 2002

Assinatura

ERRATA

PÁGINA	LOCAL	ONDE SE LÊ	LEIA-SE
15	Linhas 25 e 26	Gravimética ... dos lisímetros de drenagem	Gravimétrica ... dos lisímetros de pesagem
21	Equação 4	$Q_v = AK_{st} \frac{(\Delta T_c + \Delta T_b)}{\Delta z}$	$Q_v = AK_{st} \frac{(\Delta T_b - \Delta T_c)}{\Delta z}$
21	Linha 11	$\frac{(\Delta T_c + \Delta T_b)}{\Delta z}$	$\frac{(\Delta T_b - \Delta T_c)}{\Delta z}$
22	Equação 6	$\Delta T_{seiva} = \frac{\Delta T_c - \Delta T_b}{2}$	$\Delta T_{seiva} = \frac{\Delta T_c + \Delta T_b}{2}$
25	Figura 2	Potencial mátrico KPa	Potencial mátrico kPa
35	Figura 9	Rn (MJ m ² s ⁻¹)	Rn (MJ m ⁻² s ⁻¹)
37	Tabela 3	* Total de energia aplicada (W)	* Potência média aplicada (W)
37	Linha 5	Superestimativa	Subestimativa

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
DIVISÃO DE BIBLIOTECA E DOCUMENTAÇÃO - ESALQ/USP

Coelho Filho, Maurício Antonio

Determinação da transpiração máxima em um pomar jovem de lima ácida 'Tahiti'
(*Citrus latifolia* Tan.) e sua relação com a evapotranspiração de referência / Maurício
Antonio Coelho Filho. - - Piracicaba, 2002.

91 p.

Tese (doutorado) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, 2002.
Bibliografia.

1. Evapotranspiração 2. Irrigação 3. Limão-taiti 4. Transpiração vegetal I. Título

CDD 634.334

"Permitida a cópia total ou parcial deste documento, desde que citada a fonte – O autor"

Data de depósito junto à CPG/ESALQ
26 / 07 / 2002

*A toda minha família e amigos
pelo apoio e compreensão
durante o longo período que
estive distante.*

AGRADEÇO

*A minha companheira **Marilene**
e a minha filha **Lúisa***

DEDICO

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. Luiz Roberto Angelocci, pela valiosa orientação, apoio, compreensão e exemplo de dedicação profissional.

Ao Prof. Dr. Marcos Vinícius Folegatti e Dr. Luis Fernando de Souza Magno Campeche, pela amizade e oportunidade de participar do projeto que viabilizou o desenvolvimento da tese.

Aos Professores Dr. Marcos Bernardes e Dr. Ricardo Ferraz pelo empréstimo de sensores utilizados na execução do projeto.

Aos estudantes Dsabão e Lobo pelo auxílio na instalação e avaliação dos trabalhos de campo.

Aos professores do Curso de Pós-graduação em Irrigação e Drenagem e Ciências Exatas da ESALQ/USP pela amizade e ensinamentos transmitidos durante o curso.

Aos amigos e colegas de curso: Adriana, Tedy, Luisinho, Silvana, Valdemício, Leonardo, Glenda, Parise, Magali, Juan, Ênio, Wellington, Marcos, Ariovaldo, Flávio, Gonzaga, Cubano, Denis, Roberto, Alexandre, Luiz, Nildo, Jarbas, Tim, Santiago, Fábio, Evandro, Renê e demais colegas pela convivência e cooperação.

As secretárias Davilmar, Vanda e Ana sempre prestativas.

Aos funcionários Gilmar, Hélio, César, Antonio, Vanderlino e Edvaldo pelo apoio.

As bibliotecárias Eliana Garcia e Sílvia Zinsly, pela correção das referências bibliográficas.

À Escola superior de Agricultura “Luis de Queiroz” – Universidade de São Paulo, pela oportunidade de realização desse curso.

À CAPES, pela concessão da bolsa de estudo.

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

SUMÁRIO

	Página
RESUMO.....	vii
SUMMARY.....	ix
1 INTRODUÇÃO.....	1
2 REVISÃO DE LITERATURA.....	4
2.1 Aspectos gerais da cultura da lima ácida ‘Tahiti’.....	4
2.2 Irrigação.....	6
2.3 Fluxo de seiva como indicativo da transpiração.....	8
3 AVALIAÇÃO DO MÉTODO DE BALANÇO DE CALOR NO CAULE PARA ESTIMATIVA DA TRANSPIRAÇÃO EM POMAR JOVEM DE LIMA ÁCIDA ‘TAHITI’.....	12
Resumo.....	12
Summary.....	13
3.1 Introdução.....	14
3.2 Material e Métodos.....	18
3.2.1 Local, pomar e época.....	18
3.2.2 Medidas lisimétricas.....	18
3.2.3 Medidas de fluxo de seiva.....	19
3.2.4 Porometria.....	22
3.2.5 Medidas de área foliar.....	23
3.2.6 Análise dos resultados.....	23
3.3 Resultados e Discussão.....	24
3.3.1 Área foliar e condições hídricas no solo dos lisímetros.....	24
3.3.2 Comparação da transpiração determinada por lisimetria, fluxo de seiva e porometria: (fluxo de seiva x transpiração lisimetrica) e (porometria x fluxo de seiva)	25
3.3.3 Desempenho do sensor.....	34
3.4 Conclusões.....	40
4 RELAÇÕES ENTRE TRANSPIRAÇÃO MÁXIMA, ÁREA FOLIAR E EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA EM POMAR JOVEM DE LIMA ÁCIDA ‘TAHITI’.....	42
Resumo.....	42

Summary.....	43
4.1 Introdução	43
4.2 Material e Métodos.....	46
4.2.1 Caracterização da área experimental.....	46
4.2.2 Medidas de elementos meteorológicos.....	47
4.2.3 Determinação da transpiração máxima.....	48
4.2.4 Medidas de área foliar das plantas	49
4.2.5 Determinação da evapotranspiração de referência (ET _o).....	50
4.2.6 Cálculo da transpiração diretamente a partir da evapotranspiração de referência.....	52
4.2.7 Análise estatística.....	52
4.3 Resultados e Discussão.....	52
4.3.1 Condições hídricas do solo do pomar e da estação ao longo do estudo.....	52
4.3.2 Valores dos elementos meteorológicos (pomar e estação).....	54
4.3.3 Relação entre fluxo de seiva, área foliar e demanda atmosférica.....	61
4.3.4 Estimativa da transpiração diretamente a partir da evapotranspiração de referência.....	72
4.4. Conclusões.....	75
5 CONCLUSÕES GERAIS.....	77
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	79

DETERMINAÇÃO DA TRANSPIRAÇÃO MÁXIMA EM UM POMAR JOVEM DE LIMA ÁCIDA ‘TAHITI’ (*Citrus latifolia* Tan.) E SUA RELAÇÃO COM A EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA

Autor: MAURÍCIO ANTONIO COELHO FILHO

Orientador: Prof. Dr. LUIZ ROBERTO ANGELOCCI

Resumo

Este trabalho teve como objetivo avaliar o método do balanço de calor em plantas jovens de lima ácida ‘Tahiti’ em condições de campo e estudar a possibilidade de se estimar a transpiração máxima das plantas com o conhecimento da demanda atmosférica (evapotranspiração de referência) e área foliar. O trabalho foi conduzido no campo experimental de Irrigação e Drenagem da Fazenda Areão - ESALQ/USP, Campus Luiz de “Queiroz”, situada no município de Piracicaba - SP. Foram realizadas medidas diretas da transpiração em lisímetros de pesagem ($0,5 \text{ m}^2$) instalados na área experimental, verificando-se o desempenho do método de balanço de calor (MBC) em escala diária. Foi verificada uma excelente concordância entre os dois tipos de medida com diferença média de 0,05% e r^2 de 0,72. Os valores de fluxo de seiva responderam positivamente às condições de demanda atmosférica ao longo de um dia, sendo o MBC uma alternativa viável em estudos de relações hídricas em pomares jovens de plantas cítricas. Ao se utilizar a transpiração máxima (fluxo de seiva) escalonada (Tr) pela área foliar total, foi possível estudar comparativamente plantas com área foliar variando de $0,17$ a $1,1 \text{ m}^2$ e transpirando em épocas diferentes. A Tr variou de $0,29$ a $2,3 \text{ (L m}^{-2} \text{ d}^{-1}\text{)}$

linearmente com a demanda atmosférica, sendo que os coeficientes angulares variaram dependendo do método utilizado para determinação da evapotranspiração de referência (ET_o) (Penman-Monteith, de Penman, de Priestley-Taylor e do tanque classe A). Foi observado, também, que a transpiração diária estimada pela multiplicação de ET_o/2,88 pela área foliar das plantas, mostrou-se em boa concordância com a transpiração determinada, sendo a maior obtida ao se utilizar o modelo de Penman no cálculo de ET_o, com superestimativa em relação à transpiração medida de 5,6%.

DETERMINATION OF THE MAXIMAL TRANSPIRATION IN A YOUNG 'TAHITI' LIME (*Citrus latifolia* Tan.) ORCHARD AND ITS RELATIONSHIP WITH THE REFERENCE EVAPOTRANSPIRATION

Author: MAURÍCIO ANTONIO COELHO FILHO

Adviser: Prof. Dr. LUIZ ROBERTO ANGELOCCI

Summary

The main purposes of this research were to evaluate the heat balance method on young acid lime 'Tahiti' plants under field conditions and to study the possibility for estimating the maximum crop transpiration from atmospheric demand (evapotranspiration of reference) and leaf area. The studies were conducted in the Irrigation and Drainage experimental field, located at the Areão Farm - ESALQ/USP, Campus "Luiz de Queiroz", in Piracicaba - SP. By weighing lysimeters ($0,5 \text{ m}^2$) placed in the experimental area, direct transpiration measurements were obtained, checking the daily performance of the heat balance method. An excellent correlation was observed between both measurements, with 0,05% of mean difference and a r^2 of 0,72. The sap flow values changed positively with regard to the atmospheric demand conditions along the day. So, the heat balance method is a viable alternative in water relations studies on young citrus orchards. The comparative study of plants with leaf area ranging from $0,17$ to $1,1 \text{ m}^2$ and transpiring in different periods was possible, when the maximum transpiration (sap flow) was scaled (Tr) by the total foliar area. Tr ranged from $0,29$ to $2,3 \text{ (L m}^{-2} \text{ d}^{-1})$ exhibiting a linear relationship with the atmospheric demand. The

angular coefficients ranged accordingly the method (Penman-Monteith, Penman, Priestley-Taylor and class A pan) used for determining the reference evapotranspiration (ET_o). The daily transpiration estimated by the multiplication of the ET_o/2,88 and the leaf area of the plants, showed a good correlation with the determined transpiration, when the Penman-Monteith (underestimating 6,7%) and Penman (overestimating 5,6%) methods were employed. By using the Priestley-Taylor method, the overestimation was 9,5%.

1 INTRODUÇÃO

Os benefícios da irrigação em pomares cítricos são indiscutíveis principalmente em regiões semi-áridas, como a grande parte do Nordeste brasileiro, quando a garantia da sustentabilidade econômica da atividade agrícola depende do suprimento de água pela irrigação. No Estado de São Paulo, maior produtor de frutos cítricos do país, as condições edáficas e climáticas são propícias para a citricultura em praticamente todas as regiões, com exceção daquelas em que a carência térmica limita o desenvolvimento das plantas. Porém, a ocorrência de períodos de estresse hídrico, principalmente na fase de floração e frutificação, pode interferir na produtividade e qualidade dos frutos, havendo, então, necessidade do suprimento de água via irrigação para manutenção da produtividade potencial, o que justifica a grande expansão de pomares irrigados no Estado.

O aumento dos conflitos de setores que utilizam os recursos hídricos disponíveis, a iminente cobrança pelo uso da água e as exigências do mercado por produtos certificados, decorrentes de uma atividade agrícola sustentável, incorporada no sistema de produção integrada de frutas - PIF, tem aumentado a importância da irrigação localizada. Com esse sistema de irrigação, o volume de água aplicado é reduzido e restrito a uma pequena parcela de solo ocupada por um sistema radicular ativo, reduzindo-se as perdas de água por evaporação e drenagem profunda, além de permitir a aplicação localizada de nutrientes via água de irrigação, minimizando o uso de água e nutrientes, garantindo alta produtividade e qualidade do produto.

O conhecimento do volume de água utilizado no processo de transpiração é fundamental no manejo de irrigação localizada e fertirrigação. Porém, a quantificação da transpiração em campo é difícil e depende de uma série de fatores, como a disponibilidade hídrica, as condições de demanda atmosférica e fatores ligados à própria

planta, como área foliar, combinação copa/porta-enxerto e espaçamento de plantio. Essas dificuldades fazem dos coeficientes de cultivo (K_c) a principal opção para o manejo de água em pomares. Porém, a aplicação de água localizada torna insatisfatórias as recomendações de irrigação com base nesses coeficientes, pois, além de embutirem a variabilidade de condições ambientais de crescimento e de plantas, citadas anteriormente, englobam, também, a evapotranspiração da entrelinha que, nesse sistema de irrigação, é menos importante que a transpiração das árvores.

Dentre as alternativas metodológicas para determinação da transpiração, os métodos de fornecimento de calor ao caule, que medem o fluxo de seiva, equivalente em escala diária à transpiração, vêm sendo amplamente empregados em fruteiras. Dentre eles, um dos mais usados é o de balanço de calor, que apresenta as vantagens de ser não destrutivo, de ser absoluto, isto é, sem necessidade de calibração, de ser facilmente instalado e de permitir o monitoramento simultâneo de várias plantas. Pela característica de ser facilmente aplicado em condições de pomares comerciais, sem interferir nas respostas das plantas às condições ambientais, grandes avanços foram conquistados em estudos envolvendo relações hídricas ao se utilizar esse sensor.

Entretanto, uma série de dificuldades, como sua relativa complexidade e os erros inerentes ao método que tornam os resultados de difícil interpretação, tem restringido o seu uso em larga escala. Uma opção é a realização de estudos que relacionam o fluxo de seiva com a demanda atmosférica e a área foliar das plantas, de maneira que a partir das duas últimas, a transpiração seja estimada. Os resultados obtidos com esse procedimento têm sido satisfatórios, mostrando-o como uma boa opção no manejo de água em pomares pois, ao integrar os efeitos das condições de demanda atmosférica e característica das árvores (área foliar), tornam-se menos subjetivos do que os coeficientes de cultivo, pois incorporam em seu modelo as duas principais variáveis que interferem nas trocas de energéticas e de massa.

Diante da importância da irrigação em citros, da necessidade de testar o desempenho do método de balanço de calor em espécies cítricas e da possibilidade de sua substituição por estimativa da transpiração máxima por relações que envolvem a demanda atmosférica e a área foliar, esse trabalho teve como objetivos:

- Testar o desempenho de sensores comerciais com base no balanço de calor no caule, na estimativa do fluxo de seiva de plantas jovens de lima ácida ‘Tahiti’ em condições de campo, comparando o seu desempenho com medidas de transpiração em lisímetros de pesagem e porômetro de equilíbrio dinâmico.

- Estabelecer relações entre a transpiração máxima, a demanda atmosférica e a área foliar que possam ser utilizadas no manejo de irrigação em pomares jovens de lima ácida ‘Tahiti’.

2 Revisão de Literatura

2.1 Aspectos gerais da cultura da lima ácida ‘Tahiti’

A lima ácida ‘Tahiti’ (*Citrus latifolia* Tanaka), mais conhecida como limão ‘Tahiti’ é uma fruteira de origem tropical e exploração econômica relativamente recente. Tornou-se conhecida quando surgiu na Califórnia no ano de 1875. A origem do seu nome deve-se, provavelmente, ao fato de ter sido introduzida através de frutos cítricos importados do Tahiti. Assim como outras espécies cítricas, os plantios comerciais se estendem em ampla distribuição geográfica de áreas tropicais e subtropicais, sendo que as maiores limitações para a sua distribuição são as geadas no inverno, baixas temperaturas, disponibilidade hídrica, problemas com salinidade do solo e água de irrigação e a baixa capacidade de drenagem do solo. O primeiro plantio comercial desta fruteira foi registrado nos Estados Unidos e, de acordo com Campbell (1991), o sul da Flórida é a maior região produtora nesse País, por apresentar clima quente e úmido, permitindo uma boa adaptação das plantas, onde as geadas raramente ocorrem. No Brasil, cerca de 70 % da área colhida (cerca de 33.000 ha) localiza-se no Estado de São Paulo, participando com 81% do total produzido (Agrianual, 2002).

A lima ácida ‘Tahiti’ pode ser caracterizada como uma planta de tamanho médio a grande, vigorosa, expansiva, curvada e sem espinhos. A folhagem é verde densa, com folhas de tamanho médio, lanceoladas e com pecíolos alados (Coelho, 1993). Características como o vigor da planta, produção, tolerância a seca e tolerância a problemas fitossanitários irão variar, dependendo da combinação clone e porta-enxerto. Os principais clones utilizados no Brasil são o Peruano ou IAC 5 e o Quebra-galho.

Dentre o porta-enxerto predominante é o limão ‘Cravo’, que confere à planta características interessantes como a maior tolerância à seca. Entretanto, possui baixa capacidade de tolerar fungos do gênero *Phytophthora* causadores da gomose, que

encurtam muito a vida útil das plantas e estão presentes em todas as regiões produtoras de citros do mundo. Figueiredo et al. (2001) atribuem à gomose uma limitação para o estabelecimento de pomares de ‘Tahiti’ em São Paulo. Segundo Feichtenberger (1996), a incidência é elevada em plantios novos, devido, principalmente, à utilização de mudas contaminadas na implantação de pomares. Em pomares irrigados e estabelecidos em solos argilosos, que propiciam condições melhores de estabelecimento do fungo devido à maior capacidade de retenção de água, a irrigação deve ser manejada com maior cuidado para não aumentar as chances de incidência do fungo ou a disseminação do mesmo no pomar. Segundo Shalhevet & Levy (1990) os problemas são agravados em plantios velhos e estabelecidos em solos “pesados”. Esses autores comentam que, para cultura irrigada, a melhor medida preventiva é manter o solo seco ao redor do tronco e evitar regimes de irrigação que molhem o tronco por um período longo de tempo.

Em estudo realizado por Figueiredo et al. (2001), no qual foram avaliados porta-enxertos para cultura da lima ácida ‘Tahiti’, foi verificado que o citrumelo ‘Swingle’, dentre as espécies estudadas, foi o que apresentou o melhor desempenho, conferindo à planta boas produções, volume médio de copa, que é muito importante para as práticas culturais no pomar, maior tolerância à gomose e razoável tolerância à seca. Esses resultados também indicam uma boa opção para pomares irrigados em regiões que possuam solo argiloso.

Segundo Coelho (1993), no Brasil, o limão ‘Tahiti’ destaca-se entre os frutos cítricos de maior importância comercial. Figueiredo et al. (2001) acrescentam que a cultura vem despertando grande interesse para ampliação dos plantios comerciais, em função do seu bom comportamento em relação às principais doenças e pragas que estão presentes nos pomares de citros e têm causado grandes prejuízos aos produtores de laranja doce. O interesse também cresce, segundo esses autores, pelo incremento dos países importadores de frutos cítricos por essa fruta, que segundo Donadio (1999) ainda é considerada exótica em muitos países. Estanislau et al. (2001) relataram que, nos últimos cinco anos, o Brasil praticamente dobrou suas exportações de limas e limões devido à crescente aceitação dessas frutas pelos consumidores europeus, antes acostumados com o consumo dos limões verdadeiros.

O principal mercado importador de frutos cítricos é o europeu, que engloba cerca de 65% do total, o que favorece os países europeus produtores de citros, como Espanha, Itália, Grécia, e até os africanos mais próximos, como o Marrocos. Aos países menos competitivos como o Brasil, pela distância e custo do frete, a opção é a exportação na entressafra dos países dos principais países exportadores de frutas "in natura", que para lima ácida restringe-se aos meses de julho à setembro (Donadio, 1999), coincidindo com o período de crescimento e picos de preços no mercado interno.

2.2 Irrigação

Nos últimos anos, a irrigação vem se expandindo nos pólos citrícolas do país, e segundo Vieira & Ribeiro (1993) é uma realidade no Estado de São Paulo, proporcionando elevados índices de produtividade e qualidade de safras, apesar de se tratar de uma técnica complementar. Machado et al (2001) relatou que a irrigação de pomares com a utilização de microaspersores e gotejadores está se expandindo em todo mundo, sendo que no estado de São Paulo a taxa de implantação de sistemas de irrigação localizada em pomares citrícolas foi de aproximadamente 1590 ha.ano⁻¹ correspondente ao período de 1992-1997 (Faveta, 1998).

Coelho (1993) cita que na Região Nordeste, a irrigação em citros é utilizada principalmente no cultivo de limão 'Tahiti', tendo em vista o crescente interesse de produção de frutos para exportação. Na região semi-árida do Nordeste a irrigação também pode auxiliar a programação de floradas visando a produção de frutas no período de entressafra. Relata, também, que no Vale do São Francisco a prática tem evidenciado que o manejo de irrigação, associado a adubações pesadas e pulverizações com micronutrientes efetuados no primeiro semestre têm permitido produções nesse período.

Os questionamentos básicos relativos ao manejo racional de irrigação são: como irrigar, quando e quanto irrigar. Apesar da resposta para o primeiro questionamento depender de uma série de fatores que devem ser analisados conjuntamente, muito em função das exigências atuais por um produto de alta qualidade, das necessidades do uso racional dos recursos naturais, das necessidades de minimização

na utilização de insumos, dos aumentos dos conflitos de setores que utilizam os recursos hídricos disponíveis e da cobrança pelo uso da água, a irrigação localizada, vem sendo a resposta para grande maioria dos casos, o que vem justificando a expansão da implantação de sistemas localizados de irrigação, principalmente em frutíferas.

Responder o segundo questionamento (quando irrigar?), é um dos principais desafios no manejo da irrigação. Ou seja, é definir um índice de estresse hídrico de qualidade e que ao mesmo tempo apresente facilidade operacional.

Existem vários indicadores do estresse hídrico, podendo se basear em variáveis do solo (potencial mátrico e variação de água disponível) e índices fisiológicos das plantas (potencial da água na folha, diferença entre temperatura da folha e ar, resistência estomática, variação do diâmetro de tronco ou fruto e transpiração relativa) ou ainda por metodologias combinadas. Muitos acreditam serem os índices das plantas os mais confiáveis, considerando que o solo é apenas um indicador indireto. Porém, muitas variáveis medidas diretamente na planta, na folha em sua maioria, mostram-se muito sensíveis a fatores ambientais e a resposta pode ser mal interpretada, indicando apenas um déficit hídrico temporário, resultante entre o desequilíbrio existente entre transpiração e absorção radicular.

Segundo Ameglio et al. (1999), o potencial da água na folha antes do amanhecer (ψ_f) é considerado o melhor indicador para caracterizar o estado hídrico da planta, pois nesse horário não há transpiração, os gradientes do potencial da água na planta são pequenos e ψ_f é representativo das condições hídricas do solo. Esse índice tem, também, demonstrado relação estreita com a transpiração relativa TR (transpiração real/transpiração máxima), sendo que em trabalhos de campo, a transpiração geralmente é estimada com base no fluxo de seiva determinado por um método de fornecimento de calor ao tronco das árvores. Estudos realizados por Valancogne et al (1996) com 6 espécies frutíferas e locais distintos, demonstraram uma relação estreita entre Ψ_f e transpiração relativa (TR), mas que pode variar em função da espécie estudada, intensidade e duração do período de estresse, sendo possível, segundo estes autores, ao normalizar os valores máximos de Ψ_f como uma função de TR versus Ψ_f , utilizar esse indicador de estresse hídrico em manejo da irrigação. Améglio et al (1996)

complementaram os resultados, sugerindo que essa relação pode ser utilizada como uma boa estimativa da TR.

Pesquisas visando a economia de água vêm sendo desenvolvidas com espécies frutíferas, algumas inseridas no que é chamado de regulação do déficit de irrigação, que consiste no manejo da irrigação com défices de irrigação em estádios de desenvolvimento da cultura cujo crescimento e qualidade do fruto têm baixa sensibilidade ao estresse hídrico, realizando uma irrigação sem déficit nos outros períodos do desenvolvimento da cultura, obtendo assim uma redução no volume de água irrigado, sem prejuízos com relação à produtividade e qualidade dos frutos. Necessita-se, então, de um bom conhecimento dos estádios no qual a deficiência de água poderá provocar perdas consideráveis de produtividade e qualidade.

Nesse tipo de trabalho questiona-se quanto deve ser a redução da transpiração para obter-se uma produtividade e qualidade do produto compatíveis, e em que fases do ciclo fenológico da cultura os défices poderão ser promovidos.

Em plantas cítricas, vem sendo demonstrado que a produção e qualidade dos frutos são muito afetadas pela qualidade da irrigação nos períodos de floração e “pegamento” de frutos (Fase I) e de crescimento rápido do fruto (Fase II). Dependendo do nível de estresse promovido na Fase I, os níveis de abscisão de flores e frutos podem ser afetados, na Fase II afetará o tamanho do fruto (Domingo & Sánchez, 1996).

González-Altozano & Castel (1999) trabalharam com tangerinas e aplicando défices hídricos em três estádios diferentes do desenvolvimento dos frutos (I - floração e formação do fruto, II - início de expansão do fruto, III - final do crescimento e maturação) e tratamento com 50% da lâmina em todo ano, concluíram que a fase II é mais apropriada para promover a regulação do déficit de irrigação, sendo que os valores de potencial de água na folha (Ψ_f) não devem ultrapassar de -1,3 MPa, reduzindo assim o volume irrigado de 7 a 14 %. O período mais crítico encontrado foi o de floração e formação inicial do fruto, no qual uma pequena diferença entre os valores de potencial da água da folha entre o tratamentos, corresponderam a uma redução significativa na produtividade. Para o tratamento em que se manteve a irrigação a níveis 50% abaixo do controle, verificou-se uma redução em 17% na produtividade, sem prejuízos na

qualidade dos frutos. Por outro lado, apresentou uma eficiência do uso da água maior que o controle, sendo recomendados pelos autores, como manejo alternativo quando o custo da água for elevado.

Em trabalho de Domingo & Sánchez (1996) em árvores de limão verdadeiro, foi verificado que a irrigação de 25% da ETc em todo ciclo de crescimento e desenvolvimento dos frutos exceto durante a Fase II quando aplicou-se 100% da ETc, não afetou a qualidade química e física dos frutos, com redução de 30% do volume de água aplicado em relação à testemunha (100% da ETc em todo ciclo).

O terceiro questionamento refere-se ao conhecimento do volume de água a ser aplicado em períodos entre duas irrigações (Quanto irrigar?). Como a tendência atual é por um fornecimento localizado de água, quando apenas parte do solo é irrigado, com redução das perdas por evaporação da água do solo e drenagem profunda, a transpiração das árvores passa a ser o principal elemento a ser determinado para o manejo de água em pomares, representando, segundo Angelocci (1996), o consumo mínimo de água para mantê-las em bom estado hídrico.

2.3 Transpiração em citros

A taxa de perda de água pelas folhas é afetada por interação entre fatores do ambiente e da própria planta. Os fatores do ambiente não atuam somente de forma direta sobre a perda de água, mas também podem exercer sua ação indiretamente através do efeito controlador sobre o comportamento estomático, como acontece com a luz, a umidade do ar, o vento, as condições hídricas e térmicas do solo (Angelocci, 2002).

Dentre os fatores ambientais, tem-se verificado, sob boa disponibilidade hídrica do solo, que a umidade relativa é muito importante para o mecanismo estomático e consequentemente a transpiração, visto que os gradientes de pressão de vapor entre folha e ar representam a força motriz para o fluxo de vapor.

Syvertsen & Lloyd (1994) citam que o mecanismo estomático é efetivo em plantas cítricas, observando-se, de maneira geral, que a os estômatos respondem negativamente (diminuindo a sua condutância) com o aumento do déficit de pressão de vapor. Porém, segundo esses autores, o decréscimo da condutância não é drástico, como

acontece com outras espécies, não sendo grande o suficiente para ocorrer a diminuição da transpiração das folhas, portanto não se podendo afirmar de maneira conclusiva que existe um mecanismo de resposta direta (“feedforward”) dos estômatos à variação da umidade relativa do ar. Entretanto, plantas cítricas são capazes de realizar um eficiente controle estomático, sendo esta a característica que as tornam capazes de se adaptarem em condições de clima úmido e árido (Levy, 1980). Resultados de Hall et al. (1975) e Levy (1980) demonstraram que as taxas de transpiração das plantas mantêm-se constantes em ampla faixa de demanda atmosférica por regulação estomática. Característica essa que fazem planta cítricas transpirem igualmente, mesmo estando em ambientes com demanda atmosférica variando do úmido ao árido (Levy, 1980).

Resultados de Sinclair & Allen (1982) verificaram que para ampla faixa de déficit de saturação de vapor, aconteciam os mesmos máximos de transpiração, lançando a hipótese que a planta limita a transpiração das folhas à máxima taxa que o sistema radicular pode suprir de água as folhas.

Segundo Kriedemann & Barrs (1981), as relações hídricas de plantas cítricas são grandemente afetadas pela elevada resistência ao transporte de água pela planta, que estão associados, em parte, à pequena relação entre o sistema radicular e parte aérea da planta (*raiz/copa*) e também ao pobre desenvolvimento dos pelos radiculares. Esses autores também sugerem que a grande sensibilidade dos estômatos em citros à umidade relativa, pode ser associada à essa elevada resistência.

Castle (1978) afirma que a relação *raiz/copa* não é constante, variando em função do desenvolvimento da planta, idade e espécie. Esse autor cita resultados de Cameron & Compton (1945) que escavaram 36 plantas e encontrando uma relação de 0,28, indicando que as raízes de plantas cítricas suportam 4 vezes a seu peso. Castle (1978) complementa afirmando que essa relação diminui com a idade da planta. Esta última característica pode estar ligada ao fato do crescimento do sistema radicular de plantas cítricas preceder a parte aérea.

Apesar da importância da transpiração, principalmente quando se trabalha com a irrigação localizada, a sua determinação no campo para espécies lenhosas tem-se constituído em um desafio. Na atualidade, tem-se utilizado alguns métodos para sua

determinação nessas condições (de campo), como a lisimetria com cobertura do solo para evitar sua evaporação, a porometria de equilíbrio dinâmico no ponto de nulo, a determinação do fluxo de seiva por métodos de fornecimento de calor ao caule e a determinação da transpiração a partir de dados meteorológicos combinados com características da cultura. No caso de citros, pouco se tem realizado quanto à determinação da transpiração à campo. Podem ser citadas pesquisas em que ela foi determinada por método combinando fluxo de seiva e modelo meteorológico em pomelo (Cohen, 1991), por fluxo de seiva usando método de pulso de calor no caule e por modelo meteorológico, também em pomelo (Cohen et al., 1993), por fluxo de seiva usando método de balanço de calor no caule em lima ácida ‘Tahiti’ (Marin et al., 2001 a,b). Nessa última espécie, pode-se citar o uso do método de balanço de calor sob condições de casa de vegetação, em trabalho no qual tal método foi comparado com a transpiração por pesagem em balança, com uso de plantas jovens (Trejo-Chandia et al., 1997).

Nas partes desta tese que se seguem, é feita uma comparação da medida da transpiração de plantas jovens de lima ácida ‘Tahiti’ em pomar irrigado, pelos métodos de lisimetria de pesagem e fluxo de seiva por balanço de calor no caule. Além disso, faz-se uma análise das relações entre o fluxo de seiva (adotado como equivalente à transpiração), a evapotranspiração de referência e a área foliar, sendo essa análise usada para se verificar a possibilidade da determinação da transpiração para plantas jovens da espécie a partir de elementos meteorológicos e área foliar. Dentro de cada um desses dois tópicos encontra-se revisão de literatura pertinente, que completa este item.

3 AVALIAÇÃO DO MÉTODO DE BALANÇO DE CALOR NO CAULE PARA ESTIMATIVA DA TRANSPIRAÇÃO EM POMAR JOVEM DE LIMA ÁCIDA ‘TAHITI’

Resumo

Foram utilizados sensores comerciais (modelo SAG10-ws, Dynamax Inc.) para determinação do fluxo de seiva (FS) pelo método do balanço de calor nos caules (MBC) em plantas jovens de lima ácida ‘Tahiti’ (*Citrus latifolia* Tan.) enxertadas em citrumelo ‘Swingle’ (*Poncirus trifoliata* Raf. x *C. paradisi* Macf.). O trabalho foi desenvolvido em um pomar de 1 ha localizado em área experimental no Campus “Luiz de Queiroz” da USP em Piracicaba (latitude de 22°42’30” S, longitude 47°38’00” W e altitude de 580 m), SP, no período de outubro de 2001 a fevereiro de 2002, 4 meses após o plantio das mudas no campo. As estimativas de FS foram relacionadas com a transpiração determinada com lisímetros de pesagem e com porômetro (Tp). Os valores de fluxo de seiva relativos a um período de 24 h apresentaram uma excelente concordância com os dados lisimétricos, embora com razoável turbulência nos lisímetros, causada pela ação do vento ao longo do experimento, não permitiu o estudo em escala inferior à de 24 h. Ao comparar o fluxo de seiva com a transpiração determinada com porômetro, foi verificada a mesma tendência de variação das curvas ao longo do dia, mas com tendência dos valores serem mais elevados para Tp em horários de maior transpiração. A correlação entre ambas as variáveis revelou uma pequena diferença média (0,38%), mas com dispersão alta dos pontos ($R^2 = 0,48$). Os valores de fluxo de seiva responderam positivamente às condições de demanda atmosférica ao longo de um dia, sendo o MBC

uma alternativa viável em estudos de relações hídricas em pomares jovens de plantas cítricas.

EVALUATION OF THE STEM HEAT BALANCE METHOD FOR ESTIMATING TRANSPIRATION IN A YOUNG ‘TAHITI’ LIME ORCHARD

Summary

Commercial sensors (model SAG10-ws, Dynamax Inc., Huston) were utilized to measure sap flow (SF) by the method of heat balance on wood stem of ‘Tahiti’ lime (*Citrus latifolia* Tan.) on citrumelo ‘Swingle’ (*Poncirus trifoliata* Raf. x *C. paradisi* Macf.). The work was carried out in a 1 ha orchard located in an experimental area of irrigation and drainage of the Department of Agricultural Engineering (ESALQ/USP). Sap flow was correlated to the transpiration determined by weighing lysimeters and by porometer measurements (T_p). Daily sap flow values showed an excellent agreement with the lysimetric ones (0,05%), with a mean difference of 0,05% and r^2 equal to 0,72. The effect of wind turbulence on the lysimeters did not allow the study for periods shorter than 24 h. The comparison between sap flow and transpiration determined by porometer, in a day, showed similar tendency, although the transpiration values were greater than sap flow in hours of high transpiration. The correlation between the variables above mentioned demonstrated a short mean difference (0,38%), but the dispersion of the data was high (r^2 equal to 0,48). It was verified a positive response of sap flow to the changes of microclimate conditions. So, the heat balance method is a viable alternative for studies of water relations in young citrus trees under field conditions.

3.1 Introdução

A lima ácida ‘Tahiti’ é uma fruteira de grande importância no mercado nacional e internacional de suco concentrado e de frutos “in natura”. Segundo Figueiredo et al. (2001) a ampliação de plantios comerciais dessa lima ácida vem despertando interesse, em função do seu bom comportamento diante às principais pragas e doenças que estão presente em pomares cítricos e que tem causado grandes prejuízos aos produtores de laranjas-doces, e do crescente interesse de países da comunidade européia por essa fruta.

Os benefícios da irrigação em pomares cítricos é indiscutível, principalmente em regiões semi-áridas. No Nordeste do país, o incentivo para produção de frutos visando o mercado internacional, que é muito exigente em qualidade, vem estimulando a expansão de pomares irrigados e o surgimento de muitos pólos de fruticultura. A utilização dessa técnica vem crescendo, também, em pomares cítricos no Estado de São Paulo, maior produtor brasileiro, com o incremento da utilização da irrigação localizada (Machado et al., 2001; Favetta, 1998).

Atualmente, em função dos incentivos à fruticultura irrigada e estímulos à produção integrada de frutas cítricas, existe uma tendência da expansão da irrigação localizada, que quando bem executada, garante alta produtividade, uma maior eficiência de uso de água e nutrientes (fertirrigação) e redução das perdas por evaporação da água do solo, drenagem e escoamento superficial. O manejo correto dos recursos hídricos em pomares irrigados, depende do conhecimento de relações água-solo-planta-atmosfera, ou seja, de como a planta responde às condições ambientais. Dessa maneira, a irrigação deve ser realizada no momento correto, evitando-se o estresse por falta de água e repondo-se a quantidade que foi evapotranspirada no período de secamento do solo entre irrigações.

A determinação do consumo de água de fruteiras é complicada, pois além de variar com as condições de disponibilidade hídrica no solo e de demanda atmosférica, sofre influência de fatores ligados a própria árvore e ao sistema de plantio, como por exemplo a área foliar, geometria de copa, espaçamento e orientação de plantio no caso de renques, que afetam a interceptação da radiação solar e a resistência aerodinâmica ao fluxo de vapor.

A técnica lisimétrica é considerada como uma boa referência para determinação do consumo de água das plantas, entretanto, ao se trabalhar com árvores de grande porte, ocorre elevada limitação no seu emprego. Além disso, o seu uso é restringido pelo alto custo do equipamento, principalmente quando se trata de lisímetros de pesagem, dificultando a repetibilidade dos estudos. Estes equipamentos também podem apresentar problemas de representatividade e qualidade das leituras (Jensen et al., 1998; Wright, 1991; Grebet & Cuenca, 1991; Howell et al., 1995; Campeche, 2002).

A determinação do consumo de água pelo balanço hídrico no solo, apresenta problemas. Um deles é a grande heterogeneidade do sistema radicular e a variabilidade espacial, que introduzem dificuldades de amostragem e de representatividade das medidas, principalmente quando o pomar está localizado em zonas com bons regimes de precipitação ou é irrigado por aspersão, quando o sistema radicular se estende em toda área disponível para planta. O outro problema é a determinação da drenagem profunda, quando essa ocorre.

Uma alternativa que pode ser utilizada é a estimativa da evapotranspiração máxima pelo emprego de coeficientes de cultura K_c . Pelas próprias características dos pomares de citros e pelas dificuldades de medida da evapotranspiração, o uso de K_c tem sido recomendado, mas há restrições. Além das aproximações contidas, devido à variabilidade de condições de crescimento e de espaçamento encontradas, o uso dos coeficientes torna-se insatisfatório quando é feita a irrigação localizada, pois a evapotranspiração da entrelinha, embutida no valor de K_c , torna-se menos importante que a transpiração da árvore.

A transpiração pode ser medida por técnica gravimétrica ou por inserção da planta inteira ou folhas em uma câmara gasométrica (Angelocci, 2001). A técnica gravimétrica pode ter alta exatidão e precisão, quando se trabalha com a planta inteira, sendo o princípio, por exemplo, dos lisímetros de ^{pesagem} ~~drenagem~~, mas seu uso no campo pode apresentar problemas já citados anteriormente. A técnica de câmaras gasosas apresenta a desvantagem de causar distúrbios no ambiente aéreo, causando interferência nas medidas. O princípio dessa técnica é utilizada no porômetro de equilíbrio dinâmico de ponto de nulo (LI 1600, LiCor), que permite a determinação da condutância foliar a

difusão de vapor e da transpiração. Embora a porometria seja extensivamente usada atualmente, além da interferência na medida, pela inserção da folhas na câmara gasométrica, ela apresenta outros de ordem prática, como impossibilidade de automação das medidas e problemas relacionados à representatividade das leituras, quando a amostragem de folhas medidas não é representativa numa situação de grande variabilidade de valores (Angelocci, 2001).

A partir da última década do século XX, a determinação da transpiração de espécies herbáceas e arbóreas no campo vem sendo, em grande parte dos estudos, realizada por técnicas de fornecimento de calor ao caule, podendo ser na forma de pulsos (Cohen et al., 1981; Cohen et al., 1993; Green & Clothier, 1999), por sondas de dissipação térmica (Granier, 1985) ou por balanço de calor no caule (Sakuratani, 1981; Baker & van Bavel, 1987). As metodologias que têm por base o fornecimento de calor ao caule, não causam distúrbios no sistema radicular ou parte aérea das plantas, sendo essa uma vantagem em relação à outros métodos. A técnica do balanço de calor apresenta a vantagem em relação às outras duas, pois fornece o valor de fluxo de seiva de forma absoluta, sem necessidade de calibração. Segundo Weibel & Boersman (1995), os pontos mais fortes deste método são que a transpiração das plantas não se modifica com a sua utilização, ele não é uma “caixa preta”, pois os resultados brutos podem ser checados e analisados se são confiáveis e seu potencial de acurácia é elevado (erros inferiores a 5% em 24 horas). Uma desvantagem em relação às outras duas técnicas é que a confecção do sensor é mais complexa.

Na década de 90, muitos trabalhos foram realizados objetivando a avaliação do método do balanço de calor e suas limitações. Weibel & Vos (1994) verificaram erros inferiores menores a 10% em períodos de medidas desde 15 minutos até 24 horas em grande número de trabalhos revisados. Em espécies lenhosas de grande porte, o fluxo de seiva representa a transpiração somente em escala diária, porque, em escalas menores, o fluxo de seiva medido à base do tronco representa bem a absorção de água pelo sistema radicular da árvore, não correspondendo necessariamente à transpiração (Steinberg et al., 1989; Valancogne & Nasr, 1993). Nesse caso observa-se a defasagem entre absorção e transpiração relacionada à capacidade de armazenamento de água do tronco

(capacitância hidráulica). Entretanto em macieiras foi demonstrado que o fluxo de seiva determinado na escala de 24 horas representa bem a transpiração diária da árvore (Valancogne & Nasr, 1993).

No Brasil, foram efetuados estudos de comparação entre o fluxo de seiva e a transpiração medida em balanças de precisão em condições controladas (casa de vegetação), destacando-se medidas de fluxo de seiva em mudas de lima ácida ‘Tahiti’ (Trejo-Chandia, 1998) e plantas de girassol, de tomate e de milho utilizando-se sensores não comerciais (Oliveira, 1997), com superestimativas de até 20% do fluxo de seiva em relação à transpiração medida em balança de precisão. Angelocci et al (2000) e Marin et al. (2001c) desenvolveram estudos em árvores adultas de lima ácida ‘Tahiti’ com o método do balanço de calor, no qual o fluxo de seiva foi utilizado como estimativa da transpiração, como parte do consumo de água do pomar.

Muitos trabalhos são desenvolvidos em condições de campo utilizando o método do balanço de calor na modelagem da transpiração de plantas (Zhang et al., 1997; Villa Nova et al., 1999; Trambouze & Voltz, 2001), em estudos de balanço de energia (Marin, 2001c; Daamen et al., 1999), na avaliação de estresse de plantas (Knight et al., 2000; Massai et al., 2000), e em estudos envolvendo problemas fitossanitários (Dal Bosco, 2001; Porten et al., 2000). Entretanto, poucos trabalhos tem avaliado o desempenho do método em campo (Heilman & Ham, 1990; Steinberg et al., 1990), não sendo encontrado na literatura avaliação em espécies cítricas.

Em vista das inúmeras possibilidades de estudos e das perspectivas de solução de problemas básicos em manejo de irrigação que a técnica oferece, este trabalho visou avaliar o desempenho de sensores comerciais na estimativa do fluxo de seiva de plantas jovens de lima ácida ‘Tahiti’ em condições de campo, comparando-as com medidas de transpiração por lisímetros de pesagem e por porômetro de equilíbrio dinâmico.

3.2 Material e Métodos

3.2.1 Local, pomar e época

O trabalho foi desenvolvido nos meses de outubro de 2001 a fevereiro de 2002 em um pomar de lima ácida ‘Tahiti’, copas do clone IAC 5 enxertadas em citrumelo ‘Swingle’, plantado em junho de 2001 e com espaçamento entre plantas de 7,0 m x 4,0 m. O pomar situa-se na área experimental de irrigação e drenagem do Departamento de Engenharia Rural da ESALQ/USP no município de Piracicaba, SP, nas seguintes coordenadas geográficas: 22° 42’ 30’’ de latitude sul, 47° 30’00’’ de longitude oeste e altitude de 546 metros.

O solo na área experimental é classificado como terra roxa estruturada (Alfisol), possuindo uma declividade média de 5%. O clima da região é subtropical úmido, com média total anual de chuvas de 1278 mm (Sentelhas et al., 1998), o verão é chuvoso e o inverno é seco, sendo que a média histórica das chuvas da região mostra que o período de outubro a março contribui com cerca de 80% do total anual (Sentelhas & Pereira, 2000).

O pomar foi irrigado com sistema possuindo gotejadores (quatro por planta) autocompensantes, com vazão de 4 L h⁻¹. A umidade do solo no pomar foi mantida em condições ótimas ao longo do experimento, com manutenção do potencial mátrico com valores acima de - 20 kPa, em média, até a profundidade de 0,5 m. Os potenciais mátricos foram monitorados com tensiômetros a 0,20 m do caule de dez plantas, sendo que para cada uma das plantas foi instalada uma bateria com tensiômetros a 0,10, 0,20, 0,30 e 0,50 m de profundidade.

3.2.2 Medidas lisimétricas

Ao longo do experimento, o fluxo de seiva e a transpiração foram monitorados em duas plantas cultivadas em dois lisímetros de pesagem com 0,8 m de diâmetro (0,5 m²) e 0,6 m de profundidade e em mais três plantas do pomar. Os lisímetros de pesagem posicionavam-se no centro do pomar, sendo que as plantas no interior desses apresentavam desenvolvimento compatível com as demais do pomar. Os lisímetros, que

foram calibrados pouco antes do plantio das mudas, apresentavam uma excelente linearidade (mínima histerese), uma sensibilidade para detectar uma variação de massa de 0,0075 kg e acurácia de 0,019 kg (Campeche, 2002). As condições de umidade do solo a 0,15m de profundidade nos lisímetros foram mantidas sempre em níveis considerados adequados. Tomou-se como referência a umidade na capacidade de campo para solos argilosos (-10 kPa) (Reichardt, 1988).

Um sistema de aquisição de dados (“datalogger” CR23X Campbell Sci) associado a um multiplexador de canais diferenciais (AM 416 Relay Multiplexer, Campbell Sci.) foi utilizado na coleta de dados a cada 3 segundos, com armazenamento de médias a cada 20 min. Foram armazenados também os elementos meteorológicos importantes no processo de transpiração das plantas (radiação líquida, velocidade do vento, temperatura do ar, déficit de saturação de vapor e fluxo de calor no solo).

Para determinação da transpiração, o solo dos lisímetros foi coberto periodicamente com lona plástica, evitando-se a evaporação da água, como garantia de que a única variável a contribuir para a variação de massa no sistema fosse a transpiração das plantas.

3.2.3 Medidas de fluxo de seiva

Para a determinação do fluxo de seiva nas cinco plantas estudadas, foram utilizados sensores comerciais disponíveis no mercado (modelo SAG10-ws, Dynamax Inc.). Os sensores foram conectados a um sistema de aquisição de dados Campbell Sci., mod. CR10 e associado a um multiplexador Campbell Sci, mododelo AM 416, para ampliação dos canais disponíveis. As leituras foram realizadas a cada segundo, sendo as médias armazenadas a cada 20 min.

O fluxo de seiva foi calculado segundo a teoria apresentada por Sakuratani (1981), aperfeiçoada posteriormente por Baker & Van Bavel (1987). Uma secção do ramo da planta foi isolada termicamente do ambiente, de modo a receber apenas o calor fornecido pelo elemento aquecedor do sensor ajustado à superfície do caule. O calor fornecido a taxa constante (P_m) ao volume amostrado pode ser repartido em diferentes fluxos de calor (Figura 1):

$$P_{in} = Q_r + Q_v + Q_s + Q_f \quad (1)$$

sendo Q_r o fluxo de calor radial (W); Q_v o calor transportado axialmente (W), correspondendo ao fluxo de calor transportado acima do elemento aquecedor (Q_c) e abaixo (Q_b) do elemento aquecedor; Q_s o calor armazenado por unidade de tempo na secção aquecida (W); Q_f o calor transportado por convecção pela seiva da planta (W)(Figura 1).

A potência aplicada pelo elemento aquecedor é calculada pela seguinte expressão:

$$P_{in} = \frac{V^2}{R} \quad (2)$$

sendo V (volt) a voltagem fornecida e R (Ω) a resistência do elemento aquecedor.

O fluxo radial de calor foi calculado como:

$$Q_r = K_{sh} \Delta T_r \quad (3)$$

sendo K_{sh} ($W.K^{-1}$) a condutividade térmica do substrato de cortiça que envolve o elemento aquecedor, em ambas as faces da qual estão fixadas junções de pares termoeletrônicos, formando uma termopilha (fluxímetro). O fluxo de calor através da termopilha gera uma diferença de temperatura ΔT_r , proporcional ao fluxo, que pode ser determinada pela força eletromotriz gerada na termopilha.

Os valores de K_{sh} são considerados constantes em 24 h, sendo que os mesmos são calculados em condições de fluxo de seiva nulo ou muito próximo de nulo, geralmente ocorrendo no final da madrugada, sob boas condições de água no solo, conforme recomendação da literatura. No caso em que $Q_f \cong 0$, é possível isolar o valor de Q_r na equação (1) e substituindo na equação (3), estimar o valor de K_{sh} , medindo-se a ΔT_r . Quando a planta está transpirando em condições ótimas de água no solo, esta continua absorvendo água algumas horas após o início do período noturno para repor o que foi perdido durante o dia. Porém, segundo Grime et al. (1995), em plantas que estão sofrendo estresse hídrico a reposição de água pode não cessar, nessa situação o cálculo fica dificultado.

O fluxo de calor transportado axialmente Q_v é calculado como:

$$Q_v = AK_{st} \frac{(\Delta T_c + \Delta T_b)}{\Delta z} \quad (4)$$

sendo A a área da secção transversal do caule aquecido; K_{st} a condutividade térmica do caule, cujo valor é de determinação difícil, mas que, de maneira geral, é adotado como igual a $0,52 \text{ W m}^{-1}\text{K}^{-1}$ para espécies herbáceas e $0,42 \text{ W m}^{-1}\text{K}^{-1}$ para espécies lenhosas (Steinberg et al., 1989). Esse valor sofre variações em função da diminuição do conteúdo de água do caule da planta durante o processo de transpiração. Apesar das pequenas variações que ocorrem no valor de K_{st} ao longo de um dia ou quando a planta sofre estresse hídrico, sabe-se que o reflexo nos valores de fluxo de seiva são pequenos, pois em períodos diurnos, quando o fluxo de seiva se eleva, os fluxos axiais de calor são pequenos comparados aos fluxos radiais e convectivos; $\frac{(\Delta T_c + \Delta T_b)}{\Delta z}$ é a soma dos gradientes de temperatura superior e inferior do segmento de caule aquecido, sendo Δz a distância entre dois pares de junções fixados acima e abaixo da jaqueta térmica.

Figura 1 - Esquema do sensor, dos elementos de medida e dos fluxos envolvidos no método do balanço de calor.

O fluxo de calor transportado convectivamente pela seiva da planta Q_f é estimado como termo residual da equação (1) e está relacionado ao fluxo de seiva F pela equação:

$$Q_f = FC_p \Delta T_{seiva} \quad (5)$$

sendo C_p o calor específico da seiva, considerado igual ao da água pura ($4,186 \text{ kJ kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$); ΔT_{seiva} é a diferença de temperatura da seiva, entre os limites superior e inferior do segmento aquecido, calculada como:

$$\Delta T_{seiva} = \frac{\Delta T_c - \Delta T_b}{2} \quad (6)$$

O fluxo de seiva (F) é calculado, portanto, como:

$$F = \frac{Q_f}{C_p \Delta T_{seiva}} \quad (7)$$

O calor armazenado no caule das plantas (Q_s) foi desprezado. Esse termo cresce em importância com o aumento da relação $Q_s:P_m$ ou $Q_s:Q_f$, do crescimento em diâmetro do ramo da planta e em períodos de análise inferiores a 24 h (Weibel & Boersma, 1995). Trejo-Chandia et al. (1997) verificaram uma pequena contribuição da participação de Q_s na estimativa do fluxo de seiva de mudas de lima ácida ‘Tahiti’, verificando que o calor armazenado pode ser negligenciado. De maneira geral, aceita-se que Q_s pode ser desprezado em plantas com diâmetro de caule inferior a 3 cm sem prejuízos na qualidade das estimativas (Weibel & Vos, 1994; Grime et al., 1995; Weibel & Boersma, 1995).

3.2.4 Porometria

O fluxo de seiva determinado em três plantas, no dia juliano 24 do ano de 2002, foi comparado com medidas de transpiração com porômetro de equilíbrio dinâmico (LI 1600, Li-Cor). As leituras porométricas só foram iniciadas às 8:10 horas da manhã, evitando-se o orvalho depositado sobre as folhas nos horários anteriores, e se estenderam até o final da tarde (19:00 horas), quando a luminosidade já era escassa.

Para comparação com os valores de fluxo de seiva da planta, os valores médios das leituras porométricas ($\mu\text{g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$), foram transformadas em transpiração por planta ($\text{litros} \cdot 20\text{min}^{-1}$), assumindo-se que os valores determinados em cada horário de medida representavam a transpiração relativa ao total foliar da planta (medido) em um período de 20 minutos. Ressalta-se que as medidas de transpiração em cada planta duraram em média 18 minutos, sendo essas comparadas ao valor total de fluxo de seiva do período compreendido pela maior parte das leituras.

3.2.5 Medidas de área foliar

Foram realizadas medidas periódicas da área foliar das plantas nas quais foram instalados os sensores para medida do fluxo de seiva. Foram realizadas medidas do maior comprimento - C e do menor comprimento - L de todas as folhas da planta avaliada. Essas medidas foram utilizadas nos cálculos da área foliar de cada uma das folhas de acordo com a expressão $AF = K \cdot C \cdot L$, sendo que o somatório de AF correspondeu à área foliar total da planta. O valor de K utilizado na equação foi de 0,72, conforme Coelho Filho et al. (2002).

3.2.6 Análise dos resultados

Os valores do fluxo de seiva obtidos foram comparados com a transpiração medidas em cada lisímetro, nas escalas de 20 min, 1 h, 2 h, 4 h, 6 h 8 h e 12 h e 24h.

Os resultados obtidos foram avaliados mediante análise de regressão, na qual foi verificada a concordância das medidas pelos diferentes métodos através do coeficiente angular das equações de regressão e do coeficiente de determinação da regressão (r^2). Quando o coeficiente angular e de determinação tendem para 1, diz-se que a relação é exata e precisa, com excelente concordância.

As diferenças entre as medidas de transpiração no lisímetro e do fluxo de seiva para um período de 24 horas e as diferenças entre o fluxo de seiva e a transpiração determinada com porômetro ($\text{litros } 20\text{min}^{-1}$) também foram quantificadas, calculando-se a média das diferenças relativas absolutas:

$$MDRA = \frac{\sum_{i=1}^n \left| \frac{(T_i - P_i)}{P_i} \right|}{n} 100 \quad (8)$$

em que T_i representou o fluxo de seiva quando no caso da comparação com a transpiração no lisímetro, passando a ser a transpiração determinada com porômetro de equilíbrio dinâmico quando se comparou as leituras porométricas com o fluxo de seiva. P_i é a medida da metodologia padrão, considerada como sendo a transpiração medida em lisímetro de pesagem para relação fluxo de seiva e transpiração no lisímetro, passando a ser o fluxo de seiva quando se estudou a relação entre transpiração pelo porômetro e o fluxo de seiva.

3.3 Resultados e Discussão

3.3.1 Área foliar e condições hídricas no solo dos lisímetros

Os resultados referentes às medidas foliares realizadas ao longo do experimento encontram-se na Tabela 1, com o aumento de 0,18 m² no início a 1,1 m² no final.

Tabela 1. Resultados da área foliar (m²) medida nas plantas estudadas ao longo do experimento. Sendo L1 é a planta do lisímetro identificado como 1, L2 a planta do lisímetro 2, e FS1, FS2 e FS3 as três outras plantas do pomar que foram avaliadas.

Dia Juliano	Plantas estudadas				
	L1	L2	FS1	FS2	FS3
279	0,177				
314	0,407				
322		0,38			
336	0,472				
344		0,623			
21				0,547	
22			0,532		
37					0,85
38			0,862		
39		1,10			

Os valores de potenciais mátricos de água no solo nos dois lisímetros utilizados no estudo mantiveram-se nos níveis pré-estabelecidos (Figura 2). A ocorrência de chuvas ao longo do experimento favoreceu esta condição, mas por outro lado limitou o

número de dias de comparações entre fluxo de seiva (FS) das plantas e transpiração obtida nos lisímetros (T_L), visto que os resultados nestes ficaram restritos aos dias em que não ocorreram chuvas.

Figura 2 -Valores de potenciais mátricos medidos a 0,15 m de profundidade nos lisímetro 1 (L1) e lisímetro 2 (L2) e total diário de chuva ocorrida no pomar de lima ácida 'Tahiti' em Piracicaba - SP entre outubro de 2001 a março de 2002.

3.3.2 Comparação da transpiração determinada por lisimetria, fluxo de seiva e porometria

A Figura 3 mostra a correlação entre a transpiração das plantas medida nos lisímetros de pesagem e o fluxo de seiva obtido pelo método do balanço de calor ao caule das plantas. Observa-se que quanto menor o intervalo de tempo utilizado para as comparações, menor é a concordância entre os dois métodos. Isso pode ser claramente constatado observando-se os valores para amplitude total da transpiração, que é 20 vezes maior que as de fluxo de seiva quando o intervalo entre as medidas é de 20 min e diminuindo para 1,3 e 3,4 quando o intervalo é de 8 e 12 h, respectivamente.

Figura 3 - Relação entre o fluxo de seiva determinado pelo método do balanço de calor em plantas de lima ácida 'Tahiti' e a transpiração medida em lisímetros de pesagem, em períodos de 20 min, 1, 4, 6, 8 e 12 h.

A elevada variabilidade pontual das medidas de transpiração nos dois lisímetros implica em valores grosseiramente diferentes dos determinados com o método do balanço de calor, diferenças que chegam a até 1,4 L em 20 min, o que não representa às vezes, nem o total diário transpirado pelas plantas, na maioria dos dias avaliados, com o agravante de serem em boa parte do dia negativas.

Essa divergência pode ser atribuída ao efeito da ação do vento, devido à elevada rugosidade da cultura e das pequenas dimensões do sistema lisimétrico, o que o torna mais suscetível às rajadas de vento, como discutido por Campeche (2002). Além disso, as plantas eram pequenas (Tabela 1), com reduzidos volumes de água transpirada ($0,73$ a $1,93 \text{ L dia}^{-1}$), com picos de fluxos de seiva de $0,3 \text{ L h}^{-1}$, condição diferente da estudada em lisimetria e fluxo de seiva por Steinberg et al. (1990a). Esses autores mediram a transpiração de árvores de pecan com 5 anos de idade e 43 m^2 de área foliar em lisímetro de pesagem com 2,44 m de diâmetro, determinando os valores de transpiração de 100 a 150 L dia^{-1} e fluxo de seiva com picos de 15 L h^{-1} . Esta condição tornou possível a comparação com base horária entre transpiração e fluxo de seiva. Encontraram médias de $122,8 \text{ L dia}^{-1}$ para o fluxo de seiva e $113,4$ para lisimetria de pesagem.

Na Figura 4 estão apresentadas as leituras lisimétricas e de fluxo de seiva, médias a cada 20 min, nos dias julianos 329, 330 e 331. Nestes dias, o total transpirado pela planta avaliada foi de respectivamente 1,93, 1,02 e $1,11 \text{ L dia}^{-1}$, valores muito próximos aos de fluxo de seiva calculados ($1,89$, $1,01$ e $1,11 \text{ L dia}^{-1}$). Pode ser observado que as medidas de fluxo de seiva apresentam-se coerentes ao longo dos três dias, com valores positivos e crescentes até os horários de maior demanda do dia, com redução no período da tarde, diferentemente dos lisímetros que apresentam grandes oscilações ao longo do dia, inclusive com valores, muitas vezes, altamente negativos.

Os resultados mostram que os lisímetros de pesagem, apesar de sua elevada precisão, alta acurácia ($0,019 \text{ kg}$ no caso presente), e sensibilidade para detectar variações de massa de $0,0075 \text{ kg}$, apresentaram problemas de flutuações drásticas devido à ação do vento, que impossibilitaram a análise comparativa em intervalos de tempo inferiores a 24 horas.

Figura 4 - Curso da transpiração medida em um lisímetro de pesagem e do fluxo de seiva determinado pelo método do balanço de calor no caule de plantas de lima ácida 'Tahiti', nos dias julianos 329, 330 e 331 do ano de 2001 em Piracicaba-SP.

A comparação entre os métodos envolvendo intervalos entre medidas de 24 h proporcionou uma elevada concordância entre o fluxo de seiva e a transpiração das plantas (Figura 5a). Os resultados são referentes a 21 medidas e indicam uma concordância muito boa, como pode ser verificado pelo coeficiente angular igual a 1, embora a dispersão seja relativamente elevada ($r^2 = 0,72$). O desvio padrão da regressão foi de 0,16 L.dia⁻¹ (correspondendo a 14,5% da média dos fluxos de seiva diários) e a média das diferenças relativas absolutas (MDRA) de 9,5%, se considerado o lisímetro como padrão.

O coeficiente de determinação foi inferior aos observados nos trabalhos de Valancogne & Nasr (1989), Steinberg et al. (1990b), Heilman & Han (1990), Kjelgaard et al. (1997) e Trejo-Chandia et al. (1997), talvez refletindo a soma dos erros referentes aos sensores comerciais e os relacionados à lisimetria de pesagem (Figura 5b).

Figura 5 - Relação entre o fluxo de seiva (FS) determinado pelo método do balanço de calor ($L \text{ dia}^{-1}$) em plantas de lima ácida 'Tahiti' e a transpiração medida em lisímetros de pesagem T_L ($L \text{ dia}^{-1}$) (a) e as diferenças relativas (b) calculadas como: $DR = ((FS - T_L)/T_L) * 100$.

Efetuuou-se a comparação desses resultados com a transpiração determinada com porômetro (T_p) na escala de 20 min (Figura 6a). A correlação entre fluxo de seiva e T_p , em que cada ponto corresponde em média a 28 leituras porométricas (aproximadamente 0,3 e 0,5 % da área foliar total), apresentou pequena diferença média (0,38%) e grande dispersão dos pontos ($r^2 = 0,48$), com erro padrão da regressão de 0,014 L por 20 min e MDRA de 45%. Observa-se (Figura 6b) que boa parte das leituras de porômetros (T_p) é superior ao do fluxo de seiva, sendo esta tendência suavizada mediante a regressão. Essas diferenças refletem as limitações das duas metodologias avaliadas, principalmente no que se refere à representatividade das leituras de T_p e à possível defasagem entre transpiração e fluxo de seiva, relacionada à capacidade de armazenamento de água do caule da planta. Deve-se ressaltar que as medidas porométricas apresentam dois problemas, conforme discutido por Angeloci (2001). Primeiro, o fato de que a inserção de parte da folha dentro da câmara de medida altera a condição microclimática a que fica exposta em relação à condição natural, principalmente quanto à velocidade do vento. Segundo, a variabilidade espacial das medidas é muito grande, o que pode aumentar a dispersão e o erro.

Figura 6 – (a) Relação entre a transpiração estimada por média de 28 leituras porométricas ($T_p - L\ 20\ min^{-1}$) e o fluxo de seiva determinado pelo método do balanço de calor ($FS - L\ 20\ min^{-1}$) em três plantas de lima ácida ‘Tahiti’; (b) diferenças relativas entre os métodos calculadas como: $DR = ((T_p - F_s)/F_s) \cdot 100$.

Na Figura 7a observa-se que o fluxo de seiva teve o seu curso diário típico, concordando com os resultados de T_p , sendo que ao longo do dia ocorreram sub e superestimativas. Resultados semelhantes foram obtidos por Steinberg et al. (1990a), comparando o fluxo de seiva determinado em árvores de pecan com 43 m² de área foliar com a transpiração medida com porômetro (LiCor LI-1600). Tomando-se o valor médio de fluxo de seiva de 6 da manhã até 18:30 e comparando-se com a média obtida das leituras porométricas diárias no dia Juliano 55, foram encontrados diferenças de -6, 13 e 4% em relação ao fluxo de seiva para as plantas 1, 2 e 3, respectivamente. São diferenças pequenas, sabendo-se das limitações da utilização de porômetros para determinação da transpiração, relacionados à variabilidade espaço-temporal da transpiração, da representatividade das leituras, da necessidade de conhecimento da área foliar total da planta e do próprio fato de que as condições microclimáticas dentro da câmara porométrica podem interferir na resposta da planta.

O total transpirado de 8 h a 18 h (fluxo de seiva), correspondeu, em média, a 90% da transpiração total de 24 h para as plantas FS1, FS2 e FS3. Conforme observado na Figura 7b, o transporte de água no caule dessas plantas apresentou o mesmo padrão

ao longo do dia, existindo a viabilidade de utilização de leituras porométricas em estimativas da transpiração diária de plantas de lima ácida em campo, porém tomando-se o cuidado de corrigi-la para um período de 24 h.

Ansley et al. (1994) evidenciaram a importância dos porômetros para medidas da transpiração em locais nos quais a utilização de metodologias como a do balanço de calor no ramo é dificultada. Esses autores, trabalhando com árvores de *Prosopis glandulosa* no campo e em condições semi-áridas, verificaram a viabilidade de utilização das medidas porométricas na determinação da transpiração de toda planta ao comparar com resultados do método do balanço de calor, encontrando em dois períodos de análise (junho e outubro) grau de concordância variável, com “acurácia” maior em junho ($b = 0,99$; $r^2=0,79$) e a “precisão” maior em outubro ($b=1,31$; $r^2 = 0,91$). Verificaram, também, assim como observado no presente estudo, que a transpiração determinada no período da tarde tendeu a superestimar os valores de fluxo de seiva. Esses autores sugeriram que estes resultados poderiam estar ligados à maior suscetibilidade ao aquecimento da câmara de inserção da folhas do porômetro às variações do ambiente, já que as leituras foram realizadas em local no qual o equipamento ficava continuamente exposto às condições ambientais.

Figura 7 - (a) Curso do fluxo de seiva e da transpiração obtidas a partir de medidas porométricas (Tp) em três plantas de lima ácida ‘Tahiti com diferentes áreas foliares; (b) fluxo de seiva acumulado de três plantas, no dia juliano 24 do ano de 2002.

As maiores diferenças entre as metodologias testadas ocorreram nos momentos de elevada transpiração, corroborando Ansley et al. (1994) e Steinberg et al. (1990a). Como observado na Figura 8, existe uma tendência de assimetria da distribuição nos horários de maior transpiração, assim como uma maior amplitude dos valores e tendência de aumento do coeficiente de variação, com pico entre 13:00 e 14:30 h (Tabela 2). Isso implica em menor representatividade do valor médio determinado, além de indicar necessidade de uma maior amostragem, em função do aumento da variabilidade. Em função da assimetria das distribuições nos horários críticos, optou-se por utilizar os valores das medianas na Figura 7a e análises discutidas, em função da maior resistência desse parâmetro (Berquó et al., 1981).

Figura 8 - Gráficos tipo Box-plots da transpiração ($\mu\text{g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$) das plantas FS 2 e FS 3 de lima ácida 'Tahiti' determinadas ao longo do dia Juliano 24, por porometria.

Pode ser observado que, no início e final do dia, quando as distribuições tendem à simetria, valores de assimetria próximos de zero, as médias e medianas se aproximam, sendo que elas se afastam com o aumento da transpiração. Com relação ao aumento da variabilidade e assimetria para o horário de 18:48 h, pode já estar refletindo uma menor amostragem realizada ($n = 10$) e a falta de equilíbrio em função dos baixos valores de transpiração. Salienta-se que erros nesse horário não têm grande peso no resultado final em função de sua pequena magnitude.

Pela análise da Figura 7a, não foi possível concluir que existiu a defasagem entre o fluxo de seiva e T_p , característica que está relacionada à capacitância dos ramos das plantas. Trejo-Chandia et al. (1998), trabalhando com mudas de limão em condições controladas, determinaram o fluxo de seiva e compararam com a transpiração determinada em balança de precisão. Estes autores verificaram uma defasagem na escala horária entre os métodos testados, porém o padrão de defasagem foi invertido. No período da manhã, no qual a transpiração deveria ser maior, em função da capacitância do tronco, foi menor, permanecendo essa tendência em boa parte do dia. Esses autores atribuíram a superestimativa das medidas de fluxo de seiva aos erros inerentes ao método do balanço de calor.

Tabela 2. Resumo estatístico das medidas de transpiração ($\mu\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$) em um dia, em duas plantas de lima ácida ‘Tahiti’ (FS 2 e FS 3), utilizando porômetro de equilíbrio dinâmico no ponto de nulo, sendo DP o desvio padrão e CV o coeficiente de variação.

H	Nº de Amostras	Média	Mediana	Mínimo	Máximo	Amplitude	DP	CV	Assimetria	Curtose
08:16	35	3,16	2,95	0,85	6,50	5,66	1,34	45,33	0,73	0,40
08:40	42	3,14	3,04	0,53	6,30	5,77	1,51	49,78	0,26	-0,71
10:06	41	7,05	6,67	3,26	14,20	10,94	3,07	46,09	0,74	-0,54
10:32	44	6,28	5,87	2,02	12,39	10,37	2,43	41,33	0,42	-0,25
12:35	36	7,12	6,39	2,21	13,90	11,70	2,86	44,69	0,77	0,12
12:57	34	6,95	5,71	2,32	19,68	17,36	3,91	68,49	1,15	1,74
14:01	35	5,77	4,75	2,21	12,93	10,72	2,68	56,50	0,97	0,22
14:24	33	6,14	4,74	1,67	17,40	15,73	3,93	83,03	1,16	0,65
15:55	23	8,79	7,97	4,12	17,91	13,79	3,02	37,94	1,20	2,56
16:09	26	6,07	5,35	3,29	12,12	8,83	2,37	44,25	1,27	1,02
17:04	26	3,11	3,01	1,51	5,39	3,88	0,97	32,42	0,64	0,23
17:17	17	3,30	3,29	2,18	4,49	2,31	0,73	22,06	0,32	-0,87
17:45	19	2,18	2,14	1,52	3,19	1,67	0,51	23,97	0,60	-0,59
17:54	14	2,30	2,15	1,04	4,05	3,01	0,91	42,14	0,76	-0,26
18:38	14	0,51	0,55	0,20	0,74	0,53	0,17	30,82	-0,41	-1,08
18:48	10	0,21	0,18	0,10	0,39	0,29	0,10	56,04	0,83	-0,18

3.3.3 Desempenho do sensor

Observa-se na Figura 9, que o fluxo de seiva determinado nos dias julianos de 337 ao 341, acompanharam a disponibilidade de energia (radiação líquida). Pode ser verificada a existência de respostas dinâmicas ao longo de um dia e também quando é comparada a disponibilidade de energia (R_n) entre os dias avaliados. Esses resultados evidenciam que o método, além de ser importante em estudos que visam quantificar a perda de água da cultura, possui, também, resposta dinâmica às variações das condições ambientais, compatíveis com os anseios de pesquisadores que trabalham com relações hídricas em estudos envolvendo a fisiologia vegetal e agrometeorologia em nível de campo.

Resultados de pesquisa apontam como sendo entre 5 min e 20 min a resposta dinâmica do método em espécies herbáceas (Baker & van Bavel, 1987) e lenhosas (Steinberg et al., 1989; Cermak, 1984). Para mudas de lima ácida ‘Tahiti’ com área foliar de $0,3 \text{ m}^2$, Trejo-Chandia et al. (1997) verificaram tempo de resposta entre 8 e 20 min. Oliveira (1998) verificou que o tempo de resposta dinâmica das espécies herbáceas (tomate, milho e girassol) foi praticamente a metade dos obtidos em lima ácida ‘Tahiti’, atribuindo os resultados às diferenças na distribuição dos vasos de xilema do caule e à proporção em volume dos componentes (madeira, água e ar). Steinberg et al. (1989) concluíram que a resposta dinâmica dos sensores não é um ponto crítico para utilização do método na estimativa de transpiração em plantas. No entanto, há necessidade da conscientização de que o método não detecta mudanças rápidas no processo transpiratório das plantas quando ocorre respostas do mecanismo estomático às variações repentinas na incidência de radiação solar, porque as resistências internas ao fluxo de água não permitem que o fluxo de seiva responda rapidamente à variação da demanda atmosférica. As respostas dinâmicas irão depender da capacitância hídrica do tronco acima do sensor e da capacitância de calorífica do tronco.

Quando se compara as curvas de variação do fluxo de seiva e de radiação líquida (R_n) (Figura 9), verifica-se uma certa defasagem entre ambas. Essa defasagem pode ser explicada pelo fato de que na parte da manhã há uma tendência do fluxo de seiva não acompanhar a variação da transpiração, conforme detectado em vários

trabalhos (Weibel & Vos, 1994; Heilman & Han, 1990; Shackel et al. 1992; Valancogne & Nasr, 1993). Nessa parte do dia, a transpiração tende a acompanhar mais a variação de R_n sendo que esse processo (Transpiratório) ocorre nesse período parcialmente às expensas da água armazenada em tecidos. Já no final do dia, quando a transpiração tende a cessar, o fluxo de seiva continua a ocorrer em taxa que tende a repor a água do tecido perdida durante o dia, processo que pode ocorrer também durante parte do período noturno.

Figura 9 - Variação do fluxo de seiva de planta de lima ácida 'Tahiti' e da radiação líquida medida sobre uma das plantas do pomar, dos dias julianos 337 ao 341.

As fontes de erro no método de balanço de calor no caule podem ser discutidos analisando-se a partição da energia aplicada à seção de caule da planta (L1) ao longo dos dias julianos 332 e 333 de 2001 (Figura 10). O comportamento verificado se assemelhou ao padrão de comportamento que vem sendo observando com relação a estudos de partição de energia do método do balanço de calor, em condição de boa disponibilidade hídrica no solo para planta (Steinberg et al., 1989; Kjelgaard et al., 1997; Trejo-Chandia

et al., 1997). Durante o período de luz, os maiores fluxos alternam-se entre o radial Q_r e o convectivo pela seiva Q_f , sendo que nos horários de maior demanda o Q_f passa a ser o fluxo de calor predominante. Para períodos de baixa demanda ou noturno, quando o fluxo de seiva é pequeno, o Q_f fica próximo de zero e o Q_r predomina. A contribuição do Q_v é sempre pequena, diminuindo ainda mais no período diurno.

Figura 10 - Partição do balanço de calor no caule de plantas de lima ácida ‘Tahiti’ ao longo dos dias julianos 332 e 333. Figura construída com dados médios a cada 20 minutos.

A análise apresentada na Tabela 3, sobre a partição do calor fornecido nos diferentes fluxos do balanço no caule, evidencia que o Q_r foi o fluxo que mais contribuiu no balanço ao se considerar o período de 24 horas. Isso ocorre pois o fluxo radial pesou significativamente tanto no período noturno como de luz, enquanto o transporte de calor pela seiva teve uma contribuição significativa no período de luz e próxima de zero no noturno, quando se considerou o período de luz do dia de 6 a 19h. A importância aumenta no dia quando os seus valores superam o de Q_r , principalmente ao considerar um período com maior (8-18h) quando passam a ser o fluxo representam 55% do total de calor aplicado dissipando 55,5% do total aplicado.

Tabela 3. Fluxos médios de calor (W) no balanço de energia em caule de plantas de lima ácida 'Tahiti' e valores de K_{sh} ($W K^{-1}$).

PLANTA L1						PLANTA L2				
DJ	Pin*	Qv	Qf	Qr	Ksh	Ksh	Pin	Qv	Qf	Qr
332	0,106	0,012	0,025	0,069	0,81	0,72	0,106	0,01	0,018	0,078
333	0,105	0,01	0,03	0,065	0,84	0,76	0,105	0,022	0,027	0,069
Período	Qv**		Qf	Qr			Qv	Qf	Qr	
Total (%)	9,6		28,9	61,6			8,7	21,6	71,1	
Dia (6-19h)	6,1		50,2	43,8			5,2	43,9	50,9	
Noite	14,6		1,9	83,5			11,5	-0,4	88,9	
Dia (8-18h)	5,3		53,3	41,4			4,5	46,4	49,0	
Noite	13,1		6,1	74,5			10,9	2,3	80,5	
Dia (8-16h)	4,3		59,1	36,7			3,7	51,9	44,4	
Noite	13,4		9,3	77,3			11,1	5,3	83,6	

* total de energia aplicado (W)

**média da contribuição percentual dos fluxos no balanço de energia para vários períodos dos dias 332 e 333.

Apesar da pequena importância dos valores de Q_v , principalmente quando a transpiração é elevada, estes têm grande importância nos cálculos de K_{sh} e, conseqüentemente, nos valores de Q_r , que pesam bastante no balanço, principalmente ao considerar os fluxos noturnos (Tabela 3). Steinberg et al. (1989) verificaram que, ao se eliminar o fluxo axial da análise, ocorreu uma superestimativa de 17% do fluxo de seiva em relação à transpiração, medida em balança de precisão, em *Ficus benjamina* com 6,2 m² de área foliar e diâmetro de tronco de 0,45m cultivada em vaso, enquanto a superestimativa era de 4% ao se computar o Q_v , ou seja um erro de 13%.

Fazendo-se uma análise similar de simulação da eliminação do Q_v para os dias julianos 332 e 333 (L1 e L2), encontrou-se variações nos valores de K_{sh} para L1 e L2, com um acréscimo de 17 % nos seus valores, em média. Porém, no que refere ao fluxo de seiva, ocorreu uma redução de apenas 3%. Os erros advindos do aumento no valor de K_{sh} foram compensados pelo valor de Q_v , que nesse estudo foi de 10% (Tabela 3), em

média. Ou seja, se os valores de Q_v fossem desprezíveis, o erro seria de 13%, muito próximo aos verificados por Steinberg et al. (1989).

Além do efeito do Q_v nos valores de K_{sh} , estes podem variar em função dos valores das diferenças de temperatura registradas pelo fluxímetro, podendo ser por algum defeito no fluxímetro, deformidades do sensor ou mau contato com o ramo da planta. Gerdes et al. (1994) estudou a sensibilidade do método às variações de K_{sh} com o aumento e diminuição dos valores em 10%, verificando erros de -8,2 a +37,5% nas estimativas do fluxo de seiva. Fazendo uma análise similar com os resultados da planta L1 nos dias julianos 332 e 333, quando o fluxo de seiva calculado para planta foi de 0,79 L dia⁻¹ e 0,84 L dia⁻¹, respectivamente, foi verificado uma variação de -12% a +27% do fluxo de seiva, evidenciando a importância dessa variável para o método.

Podem ocorrer, também, erros nas medidas de Q_v em função do mau contato dos termopares no tronco da planta e em função da introdução de calor pelo ambiente conseqüente do isolamento inadequado do sensor, resultando em não representatividade dos gradientes de temperatura superior e inferior da secção aquecida. Weibel & Vos (1994) verificaram erros de 25% em função do mau contato entre o sensor comercial (SGB35-ws) e o tronco irregular de macieiras. Estes autores tentaram minimizar as irregularidades preenchendo as depressões entre sensor e tronco com silicone, porém sem sucesso. Medidas inadequadas dos gradientes de temperatura afetam também os valores de ΔT_{seiva} . Em períodos de alto fluxo de seiva, quando estes valores tendem a diminuir, as medidas ficam suscetíveis a grandes erros. Como discutido por Ham & Heilman (1990) e Shackel et al. (1992), ΔT_{seiva} é o denominador da expressão utilizada para o cálculo de fluxo de massa (Eq. 7). Quando ele se torna muito pequeno, pequenas mudanças nos valores podem resultar em grandes erros no fluxo de massa calculado. Senock & Ham (1993), trabalhando com pequenos sensores para determinação do fluxo de seiva em plantas de soja, verificaram, para condições de fluxo de seiva superior a 50 g.h⁻¹, que um erro de 0,1°C na estimativa de ΔT_{seiva} conduziu a erro de 15% na estimativa de F.

A adoção de potências (P_{in}) muito baixas pode aumentar a suscetibilidade das medidas aos valores baixos de ΔT_{seiva} (<0,5 °C) em horários de alta demanda

atmosférica. Uma das recomendações para minimizar os problemas nos horários de pico no fluxo de seiva, é o monitoramento dos valores de ΔT_{seiva} e manutenção destes não muito próximos de zero, com potências em níveis que não causem danos nos caules das plantas. Van Bavel et al. (1994) recomendam que os valores de ΔT_{seiva} não atinjam 8°C pela manhã e permaneçam acima de $0,3^{\circ}\text{C}$ nos horários de pico de fluxo de seiva. Como se observa na Figura 11, quanto a esse aspecto os sensores funcionaram como recomendado. Os cuidados tomados durante o experimento para manutenção dos valores de ΔT_{seiva} nos limites ideais foram adequados, conforme se verifica pelos valores mínimos observados nos horário de pico de fluxo de seiva (abaixo de $0,5^{\circ}\text{C}$) e, pela manhã, ao redor de $2,5^{\circ}\text{C}$, muito abaixo de valores críticos que pudessem causar danos ao caule da planta.

Figura 11 - Variação da ΔT_{seiva} e do fluxo de seiva em planta de lima ácida 'Tahiti'(L1) dos dias julianos 331 ao 334 do ano de 2001.

A discussão sobre as fontes de erro do MBC permitem assumir que a dispersão dos dados de comparação pode ter se originado não somente do método mas também dos métodos tomados para comparação.

Os resultados obtidos evidenciam que o método do balanço de calor é uma alternativa metodológica em estudos de campo envolvendo transpiração de plantas jovens de lima ácida ‘Tahiti’, sendo que os sensores comerciais utilizados neste estudo são adequados e de fácil instalação. Por outro lado, é importante ressaltar que os bons resultados somente são obtidos tomando-se os devidos cuidados com as fontes de erros do método de balanço de calor, principalmente com relação ao isolamento dos sensores, evitando-se o fornecimento externo de calor ao segmento de caule monitorado, e com relação ao bom contato entre o sensor e o caule das plantas, evitando grandes discrepâncias de resultados como discutido por Shackel et al.(1992).

Um ponto importante discutido por Weibel & Vos (1994) é a não percepção dos erros quando se analisa os dados brutos. Este fato é muito preocupante, principalmente quando se deseja trabalhar com o método no campo. Por isso, é aconselhável a realização de testes para verificação do perfeito funcionamento do sensor, comparando-os com medidas padrão antes de qualquer estudo, quando for possível. E após a implantação, aconselha-se também, a realização de análises da resposta dos sensores, na tentativa de verificar discrepâncias que possam inviabilizar as análises. Essa atitude, associada à minimização dos erros relacionados à escolha de plantas com caules regulares e o perfeito isolamento do sensor, tornará as medidas dos sensores comerciais confiáveis quando não se dispuser de um método padrão para comparações.

3.4 Conclusões

O método de balanço de calor permitiu obter valores diários de fluxo de seiva de plantas jovens de lima ácida ‘Thaiti’ em excelente concordância com os valores de transpiração medidas por lisímetros nos quais elas estavam crescendo . As comparações em escala de tempo inferiores a 12 h mostraram grande discrepância, possivelmente em função dos erros introduzidos pelas medidas lisimétricas. Erros nessas escalas podem

ocorrer, também por defasagem temporal entre a transpiração das folhas e o fluxo de seiva, mas não foi possível comprovar essa defasagem nas condições de estudo.

Na comparação de fluxo de seiva com a transpiração medida por porometria, na escala de 20 minutos, encontrou-se uma relação de 1:1, mas com elevada dispersão dos dados ($R^2=0,48$), que pode ser decorrente tanto de defasagem como de erros introduzidos pela porometria.

Os resultados obtidos indicam que o método de balanço de calor mostrou-se adequado para a determinação no campo da transpiração diária de plantas jovens (com área foliar de até $1,5 \text{ m}^2$) de lima ácida 'Tahiti', mostrando as vantagens de não ser destrutivo, não perturbar o sistema e de ser relativamente prático, quando comparados com os outros métodos, constituindo-se uma boa alternativa a estes.

4 RELAÇÕES ENTRE TRANSPIRAÇÃO MÁXIMA, ÁREA FOLIAR E EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA EM POMAR JOVEM DE LIMA ÁCIDA ‘TAHITI’

Resumo

O trabalho teve o objetivo de avaliar a resposta da transpiração máxima (fluxo de seiva) à demanda atmosférica de plantas jovens de lima ácida ‘Tahiti’ com área foliar variando de 0,17 a 1,1 m². O estudo foi desenvolvido em um pomar de 1 ha localizado no campus “Luiz de Queiroz” da USP, em Piracicaba, SP, entre os meses de outubro de 2001 a março de 2002, iniciando-se quatro meses após o plantio. A demanda atmosférica representada pela evapotranspiração de referência, determinada com os dados obtidos em uma estação agrometeorológica situada ao lado do pomar. Os resultados indicaram que a transpiração das plantas aumentou com o incremento da superfície foliar e respondeu linearmente com a evapotranspiração de referência. Obteve-se uma relação linear entre a transpiração diária por unidade de área foliar e a evapotranspiração de referência estimada pelos métodos de Penman-Monteith com padronização da FAO, de Penman, de Priestley-Taylor e do tanque classe A, sendo possível a estimativa da transpiração máxima de plantas jovens de lima ácida ‘Tahiti’ a partir do conhecimento da área foliar e ETo. A transpiração diária estimada pela multiplicação de ETo/2,88 pela área foliar das plantas, mostrou-se em boa concordância com a transpiração expressa pelo fluxo de seiva, quando se usou o método de Penman-Monteith (subestimando em média 6,7%) e de Penman (superestimativa de 5,6%). Com o uso do método de Priestley-Taylor, a superestimativa foi de 9,5%.

RELATIONSHIP AMONG MAXIMAL TRANSPIRATION, LEAF AREA AND REFERENCE EVAPOTRANSPIRATION IN A YOUNG 'TAHITI' LIME ORCHARD

Summary

The evaluation of the maximal transpiration (sap flow) response from atmospheric demand of young 'Tahiti' lime plants with leaf areas ranging from 0,17 to 1,1 m² was the aim of the present study. The research was conducted in a 1 ha orchard at "Luiz de Queiroz" campus-USP, in Piracicaba, SP, during October 2001 and March 2002, four months after planting. The atmospheric demand indicated by the reference evapotranspiration was determined from the data obtained in a agrometeorological station beside the orchard. The transpiration of the plants increased as the leaf area increased and showed a linear response with the reference evapotranspiration. It was obtained a linear relationship between the daily transpiration per leaf area unity and the reference evapotranspiration estimated by the Penman-Monteith, with FAO standardization, Penman, Priestley-Taylor and class A pan methods. Besides, from the leaf area and ETo data, the maximal transpiration estimation of young 'Tahiti' lime plants was possible. The daily transpiration estimated by the multiplication of the Eto/2,88 and leaf area of the plants showed a good correlation with the transpiration indicated by the sap flow, when the Penman-Monteith (underestimating on the average 6,7%) and Penman (overestimating 5,6%) methods were employed. By using the Priestley- Taylor method, the overestimation was 9,5%.

4.1 Introdução

A água é o principal elemento constituinte das plantas, tendo, entre outras funções, grande importância na manutenção da turgescência, da atividade fisiológica normal, da expansão celular, do transporte de nutrientes e na regulação de temperatura

do vegetal. Por isso, o crescimento e o desenvolvimento das plantas está condicionado ao suprimento adequado de água ao longo do ciclo produtivo, seja naturalmente pela precipitação, como mediante a técnica de irrigação, indispensável para a estabilidade da produção, manutenção da produtividade em nível econômico e garantia da qualidade do produto em regiões que sofrem secas regulares. Em regiões semi-áridas, como em grande parte do Nordeste brasileiro, a importância é ainda maior, pois a garantia da sustentabilidade econômica de qualquer atividade agrícola depende do suprimento de água por esta técnica.

Devido à participação da água como principal constituinte dos frutos, Jones & Tardieu (1998) evidenciaram a importância do seu suprimento adequado para frutíferas, pois o produto é vendido com base no peso. Esses benefícios são importantes no contexto atual da fruticultura irrigada, devido à elevada competitividade do mercado interno e, principalmente, do externo, com exigências crescentes por um produto que resulte de uma atividade agrícola sustentável, incorporada em sistemas de produção integrada de frutas - PIF.

O conhecimento do volume de água utilizado no processo de transpiração é fundamental no manejo de irrigação localizada e fertirrigação, resultando em uma maior eficiência de uso de água e fertilizantes, com redução das perdas por evaporação e por drenagem, garantindo produtividade e redução no risco ambiental. Porém, a quantificação da transpiração de fruteiras em campo é difícil e depende de uma série de fatores, como a disponibilidade hídrica, as condições de demanda atmosférica e fatores ligados à própria planta, como área foliar, geometria de copa e de plantio, que afetam a capacidade de interceptação da radiação solar e a interação com o vento (Angelocci, 1996; Valancogne et al., 2000). A utilização de equipamentos padrões, como lisímetros, para determinação da transpiração é limitada pelo alto custo, principalmente no caso de lisímetros de pesagem, o que dificulta a repetição dos estudos. Estes equipamentos também podem apresentar problemas de representatividade e qualidade das leituras, (Jensen et al., 1998; Wright, 1991; Grebet & Cuenca, 1991; Howell et al. 1995; Campeche et al., 2002), além de não permitir avaliações em intervalos de tempo

inferiores a 24 horas, em função da grande sensibilidade, principalmente em fruteiras com elevada rugosidade, como verificado no capítulo anterior.

Dentre as alternativas para determinação da transpiração de árvores em campo, as câmaras gasosas, nas quais se incluem os porômetros de equilíbrio dinâmico de ponto nulo, 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, da representatividade e impossibilidade de automação das medidas (Angelocci, 2001). O método do balanço de calor no caule (MBC), que mede o fluxo de seiva em escala diária (transpiração) equivalente à transpiração quando se trabalha na escala de 24 horas em espécies arbóreas, tem as vantagens de não necessitar calibração, de ser não-destrutivo e de possibilitar o monitoramento simultâneo da transpiração em muitas plantas. Porém como desvantagens, podem ser citados o custo dos sensores comerciais e uma certa complexidade do seu manejo que dificulta seu uso na grande prática. Portanto, segundo Pereira et al (1997), em termos operacionais, em condições de campo, a alternativa mais viável ainda é a estimativa da transpiração utilizando modelos empíricos, porém com certa confiabilidade.

As variáveis que interferem nas respostas das plantas aos fatores ambientais dificultam a generalização de modelos de estimativas da transpiração, principalmente para culturas perenes. São necessários, para tal propósito, estudos básicos visando a quantificação do consumo de água pelas plantas em sistemas de cultivos variáveis e regiões edafoclimáticas diferenciadas. O método de Penman-Monteith, considerado padrão pela FAO para medidas de evapotranspiração de referência (Allen et al. 1998), vem sendo adaptado para estimativa da transpiração em fruteiras. Considera-se, nesse caso, que a planta pode ser representada por uma única folha hipoestomática, sendo necessário o conhecimento do saldo de radiação da copa da planta expresso em energia por unidade de área foliar e as resistências à difusão de vapor da folha e da sua camada limite (Thorpe, 1978). Resultados experimentais evidenciam a concordância das estimativas com medidas de fluxo de seiva em kiwi (Green et al., 1989), macieiras (Green et al., 1995; Angelocci et al., 1997a; Green & Clothier, 1999), pêra (Caspari et

al., 1993) e videira (Yunusa et al., 2000). Esse método, por incluir em seu modelo as resistências à difusão de vapor é, teoricamente, apropriado para determinação da transpiração em qualquer situação. Porém, a difícil determinação do saldo de radiação da planta e das resistências à difusão de vapor em cada condição específica de cultivo, espécie e idade da cultura, limitam a aplicação desse modelo.

Tem-se tentado estimar a transpiração de frutíferas com o uso de modelos climatológicos de evapotranspiração de referência, que não exigem a determinação direta das duas resistências (Villa Nova et al., 1999) ou com a adoção de coeficientes lineares que expressam a relação entre a transpiração escalonada (pela área foliar, cobertura de copa ou radiação absorvida) e a evapotranspiração de referência (Angelocci et al., 1997b; Braun et al., 2000; Valancogne et al., 2000). Esses modelos permitem uma simplificação na estimativa de transpiração, que fica dependente apenas do conhecimento da área foliar da cultura e da evapotranspiração de referência, mas a aplicação das relações é específica para a espécie estudada.

O presente estudo teve como objetivo estudar a transpiração de plantas jovens de lima ácida ‘Tahiti’ nas condições de Piracicaba (SP), relacionar as medidas de fluxo de seiva com a demanda atmosférica e a área foliar e a partir desse conhecimento, estabelecer equações que possam ser utilizadas no manejo de irrigação em pomares jovens de citros.

4.2 Material e Métodos

4.2.1 Caracterização da área experimental

O trabalho foi desenvolvido nos meses de outubro de 2001 a março de 2002 em um pomar com 1 ha de lima ácida ‘Tahiti’, plantado na primeira quinzena de junho de 2001, com espaçamento entre plantas de 7 x 4 metros, sendo as copas do clone IAC 5 enxertadas em citrumelo ‘Swingle’. O pomar situa-se no campo experimental de irrigação do Departamento de Engenharia Rural, localizado na Fazenda Areão, Campus “Luiz de Queiroz” da USP, no município de Piracicaba, SP, nas seguintes coordenadas geográficas: 22° 42’ 30” de latitude sul, 47° 30’00” de longitude oeste e altitude de 546 metros de altitude. O solo na área experimental é classificado como terra roxa

estruturada (Alfisol), possuindo uma declividade média de 5%, segundo levantamento planialtimétrico realizado antes da implantação do pomar. O clima da região é o subtropical úmido, com média do total anual de chuva de 1278 mm (Sentelhas et al., 1998). O verão é caracterizado como chuvoso e o inverno é seco, sendo que a média histórica das chuvas da região mostra que o período de outubro a março contribui com cerca de 80% do total anual (Sentelhas & Pereira, 2000).

Durante o experimento o pomar foi irrigado com sistema possuindo gotejadores (quatro por planta) autocompensável, com vazão de 4 litros hora⁻¹. A aplicação de nitrogênio foi realizada via água de irrigação (fertirrigação) utilizando um sistema de injeção tipo “venturi”.

4.2.2 Medidas de elementos meteorológicos

Ao longo do experimento, monitorou-se os elementos meteorológicos para o cálculo da evapotranspiração de referência na estação agrometeorológica da fazenda Areão. A temperatura do ar foi determinada com termistor e a umidade relativa do ar com um sensor Vaisala, modelo HMP35C em microabrigo a 2 metros da acima da grama. A velocidade de vento foi determinada a 2 metros da superfície da grama com sensor marca Met-One, modelo O14A e a radiação líquida (R_n) com sensor da marca REBS, modelo Q7.1 a 1,2 m acima da grama. Esses elementos também foram determinados no pomar de lima ácida, com os mesmos tipos de sensores para medida da velocidade do vento e radiação líquida, apenas a temperatura do ar e o déficit de saturação foi obtido por meio de um psicrômetro aspirado, conforme Marin et al. (2001b).

Os elementos meteorológicos na estação foram coletados a cada segundo, em “datalogger” (CR10X Campbell Sci.), com armazenamento de médias a cada 20 minutos. No pomar foi utilizado um “datalogger” (Campbell Sci.), modelo CR23X associado a um multiplexador de canais diferenciais (AM 416 Relay Multiplexer, Campbell Sci.), coletando dados a cada três segundos e armazenando médias a cada 20 minutos.

4.2.3 Determinação da transpiração máxima

Com base nos resultados do capítulo anterior, assumiu-se que o fluxo de seiva integrado em 24 horas correspondeu à transpiração máxima diária da planta. O fluxo de seiva foi determinado utilizando-se sensores comerciais da marca Dynamax Inc., modelo SAG10-~~ws~~, em seis plantas, três delas em lisímetros de pesagem. Os sensores foram conectados a um “datalogger” CR10 (Campbell Sci.) e associados a um multiplexador da mesma marca (AM 416 Relay Multiplexer) para ampliação dos canais disponíveis. As leituras foram realizadas a cada segundo e com médias armazenadas a cada 20 minutos.

Os dados obtidos com os sensores permitem estimar o fluxo de seiva segundo o método do balanço de calor (Sakuratani, 1981; Baker & Van Bavel, 1987), detalhado no capítulo anterior, pela expressão:

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

na qual o total de calor fornecido (P_{in}) é repartido no volume de tronco amostrado em fluxos de calor (W) 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) foram 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 foram medidos com termopares posicionados acima e abaixo da secção aquecida e em contato com o caule. Os fluxos radiais foram estimados a partir do conhecimento da condutividade térmica do substrato de cortiça 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 foi 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 os limites inferior e superior do segmento aquecido (ΔT).

A transpiração máxima é a que ocorre sob condições de ótima disponibilidade hídrica no solo, isto é, a planta é capaz de expressar todo seu potencial de transpiração nas condições de demanda atmosférica reinantes no local da avaliação. Por isso, a umidade do solo, no presente experimento, foi mantida em condições ótimas ao longo do experimento (lisímetros e plantas do pomar), com manutenção do potencial mátrico do solo com valores maiores que -20 kPa. Os potenciais mátricos foram monitorados com tensiômetros instalados no solo dos lisímetros e a 0,20 m de distância do caule de dez plantas do pomar. Em cada lisímetro, foi instalado um tensiômetro a 0,15 m de profundidade do solo e em cada planta do pomar escolhida, foi instalada uma bateria com quatro tensiômetros a 0,10, 0,20, 0,30 e 0,50 m de profundidade. Da mesma maneira, monitorou-se a umidade do solo no gramado da estação a 0,15 m de profundidade, mantendo o solo sempre úmido, possibilitando a existência de condições para ocorrência de evapotranspiração de referência.

Com os valores de transpiração máxima, foi realizado um estudo no qual foram ajustadas equações de regressão entre a transpiração máxima por unidade área foliar ($L\ m^{-2}\ dia^{-1}$) e evapotranspiração de referência (ET_o). Foram testadas, também, relações envolvendo a radiação líquida (R_n grama) e a evaporação do tanque Classe A (ECA).

4.2.4 Medidas de área foliar das plantas estudadas

As medidas de fluxo de seiva foram acompanhadas de medidas periódicas de área foliar total da planta (AFT). O procedimento utilizado no cálculo de AFT partiu da escolha de um dia Juliano representativo de um período de medidas da transpiração máxima e que também fosse representativo de um total foliar da planta pois, como as plantas eram jovens, o crescimento era intenso. No dia escolhido, foram realizadas medidas lineares de todas as folhas da planta avaliada (maior comprimento - C e menor comprimento - L). Essas medidas foram utilizadas nos cálculos da área foliar de cada uma das folhas de acordo com a expressão $AF = K \cdot C \cdot L$, sendo que o somatório de AF correspondeu à área foliar total da planta. O valor de K utilizado na equação foi de 0,72, conforme Coelho Filho et al. (2002).

4.2.5 Determinação da evapotranspiração de referência (ET_o)

Os elementos determinados na estação agrometeorológica, foram utilizados nos métodos de estimativa da evapotranspiração de referência de Penman-Monteith (ET_o P-M), Penman (ET_o PEN), Priestley-Taylor (ET_o P-T) e base no tanque Classe A (ET_o TCA).

Os valores de ET_o (mm d⁻¹) foram calculados pelo método de Penman-Monteith empregando a parametrização proposta pelo boletim FAO-56 (Allen et al., 1998) no cálculo da evapotranspiração de referência:

$$ET_o = \frac{0,408s(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T_{med}} u_2 (e_s - e_a)}{s + \gamma(1 + 0,34u_2)} \quad (2)$$

sendo R_n a radiação líquida na superfície gramada (MJ m⁻² dia⁻¹), G a densidade de fluxo de calor no solo (MJ m⁻² dia⁻¹) assumida igual a zero, T_{med} a temperatura média do ar a 2 metros de altura (°C), u₂ a velocidade média do vento a 2 metros do solo (m s⁻¹), e_s-e_a o déficit de saturação de vapor (kPa), s a declividade da curva de pressão de vapor na T_{med} (kPa °C⁻¹) e γ o coeficiente psicrométrico de 0,0633 kPa °C⁻¹.

Os cálculos referentes ao método de Penman foram realizados com base na equação (Pereira et al., 1997):

$$ET_o = W \frac{(R_n - G)}{\lambda} + (1 - W) 86400 \rho C_p \frac{e_s - e_a}{\gamma \lambda r_a} \quad (3)$$

em que λ é o calor latente de evaporação (2,45 MJ m⁻² dia⁻¹), ρ é a massa específica do ar, C_p é o calor específico do ar (1,005 KJ Kg⁻¹ K⁻¹) e W é o fator de ponderação dependente da temperatura do ar e do coeficiente psicrométrico (Wilson & Rose, 1971; Viswanadham et al., 1991):

$$W = 0,407 + 0,0145T, \quad 0 < T < 16^\circ\text{C} \quad (4)$$

$$W = 0,483 + 0,01T, \quad 16,1 < T < 32^\circ\text{C} \quad (5)$$

Os cálculos da evapotranspiração segundo o método de Priestley-Taylor foram realizados com base na equação a seguir (Pereira et al., 1997), em que o parâmetro de Priestley-Taylor (α) utilizado foi de 1,26:

$$ET = \alpha(Rn - G) \quad (6)$$

Para o cálculo da evapotranspiração a partir das medidas de evaporação do tanque classe A, utilizou-se a seguinte equação (Doorenbos e Pruitt, 1977):

$$ET_o = K_p ECA \quad (7)$$

sendo K_p o coeficiente que reduz a evaporação do tanque classe A (ECA) para estimativa da ET_o . Adotou-se o valor de 0,72, que foi considerado adequado para as condições da estação agrometeorológica da Fazenda Areão (Sentelhas et al., 1999).

Apenas para fins comparativos, nas estimativas de evapotranspiração descritas anteriormente, foram utilizados, de forma alternativa, os valores de R_n , velocidade de vento e déficit de saturação, também determinados nas condições do pomar de lima ácida 'Tahiti'. É importante salientar que os valores de evapotranspiração calculados a partir dessa modificação não podem ser considerados como de referência, principalmente para o modelo de Penman-Monteith, que possui valores padronizados pela FAO para uma condição de cobertura e de resistências à difusão de vapor de um gramado.

Outro ponto a ser esclarecido, é que a FAO recomenda a estimativa do saldo de radiação ($R_n = BOC + BOL$) a partir da radiação global medida ou estimada. Como esclarecido por Santiago (2001), as medidas de saldo radiação em postos agrometeorológicos não são rotineiras, e essas podem ser problemáticas em virtude da fragilidade do sensor, que possui uma cúpula plástica que se polimeriza com os raios solares e se fragmenta, causando erros sistemáticos nas medidas, requerendo inspeção e troca freqüente. Evita-se, também, problemas nas medidas de R_n em períodos secos, ao se adotar o coeficiente de reflexão de 0,23 para o gramado no cálculo do balanço de ondas curtas (BOC), sendo o balanço de ondas longas (BOL) calculado pela equação de Brunt.

No presente estudo, optou-se pelas medidas de R_n em função da disponibilidade de saldo-radiômetro e do gramado da estação ser irrigado sempre que necessário, com manutenção da condição de umidade do solo em níveis adequados durante o experimento, portanto, com condições apropriadas de cobertura vegetal.

4.2.6 Cálculo da transpiração diretamente a partir da evapotranspiração de referência

Villa Nova et al (1999) verificaram que a transpiração de macieiras pode ser estimada a partir da evapotranspiração de referência multiplicada por um fator igual a área foliar da árvore/2,88. Este ajuste significa adotar a aproximação de que a perda de água por unidade de área foliar é igual na árvore e na cobertura padrão definida pela FAO, que para a qual adotou-se o índice de área foliar igual a 2,88. Dessa maneira, o valor assim calculado a partir de ETo em $mm\ d^{-1}$ representa o volume de água transpirada $L\ d^{-1}$.

Esse procedimento foi adotado neste trabalho e seu desempenho testado por comparação com o fluxo de seiva.

4.2.7 Análise estatística

A transpiração estimada pelo método adaptado (item 4.2.6) foi comparada com a transpiração determinada e avaliada mediante análise regressão, por meio dos coeficientes angulares (b) e de determinação (r^2).

Os estudos comparativos entre os elementos determinados na estação e pomar também foram realizados por análise de regressão. Quando o coeficiente angular da regressão foi significativamente diferente de zero, as diferenças entre os elementos medidos nos dois ambientes foram quantificadas pela diferença relativa média (DM).

4.3 Resultados e Discussão

4.3.1 Condições hídricas do solo do pomar e da estação ao longo do estudo

Durante o estudo, foram necessários poucos dias de irrigação do pomar de lima ácida, sendo que a manutenção dos valores de umidade do solo nos níveis estabelecidos exigiu uma maior frequência de irrigação nos lisímetros e na estação agrometeorológica.

Conforme observado, a umidade do solo do pomar ficou nos patamares preestabelecidos, com poucos dias em que os valores médios registrados atingiram valores inferiores ao estabelecidos (Figura 1). Os dias em que os valores médios de umidade do solo atingiram níveis inferiores ao estabelecido ($-20\ kPa$) podem refletir

tanto o tempo de resposta dos tensiômetros à irrigação como a lenta redistribuição da água no solo.

Figura 1 - Distribuição de chuvas (colunas) e médias dos valores de potenciais mátricos da água do solo no pomar de lima ácida 'Tahiti', lisímetros de pesagem e estação agrometeorológica (a); médias dos potenciais mátricos em cada profundidade do solo (0,1 (T10), 0,2 (T20), 0,3 (T30) e 0,5 m (T50)) estudada no pomar (b).

Na estação agrometeorológica, em alguns dias, os valores de potencial mátrico ficaram abaixo do patamar estabelecido, não representando necessariamente um déficit de água no gramado mas sim o rápido decréscimo nos valores de potenciais mátricos. Essa mesma tendência pode ser observada nos resultados encontrados para os tensiômetros instalados a 0,10 m de profundidade no pomar. Apesar de serem registradas médias próximas a - 60 KPa em dois dos dias avaliados, refletindo a maior absorção de água nessa camada pelas plantas, a média do potencial mátrico do solo até a profundidade de 0,50 m ficou pouco abaixo de -20 KPa, indicando necessidade de irrigação (Figura 1).

4.3.2 Valores dos elementos meteorológicos (pomar e estação)

Analisando separadamente os valores médios dos elementos meteorológicos determinados na estação nos dois anos de estudo, verifica-se que as condições de tempo não variaram muito entre os períodos (Tabela 1). Apenas com relação ao déficit de pressão de vapor (DPV), é verificada uma diminuição dos valores no ano de 2002, decorrente do elevado volume de chuva bem distribuído nesse período.

Observa-se que os elementos meteorológicos determinados (pomar e estação agrometeorológica) apresentaram a mesma tendência ao longo do período avaliado. A proximidade dos locais, e por ser o pomar muito jovem, com quase a totalidade do solo ocupada por ervas daninhas (roçadas periodicamente), fizeram com que a maioria desses elementos pouco diferissem entre os locais (Figura 2).

Ao comparar os resultados em cada ambiente (pomar e estação), observa-se que o déficit de saturação de vapor apresentou maiores discrepâncias (Figura 3b), ocorrendo diferença relativa média (DM) de 44% maior para os valores determinados no pomar, considerando o período integral de análise, conforme Tabela 2.

As diferenças foram menores para o ano de 2001, como pode ser observado na Figura 3b, sendo a diferença relativa média (DM) de 37%. No ano de 2002, ocorreu uma tendência a um distanciamento entre os resultados em cada ambiente avaliado, especialmente no período final de análise, a partir do dia Juliano 65 (Figura 2a). Essa maior discrepância a partir deste dia decorre do manejo de ervas daninhas no pomar.

Nesse dia Juliano, foi realizada a passagem de herbicida na linha de plantio e de roçadeira na entrelinha, o que promoveu a redução da superfície foliar no pomar (linhas e entrelinhas) e, conseqüentemente, do fluxo de vapor, favorecendo também, como será visto posteriormente, o aumento da temperatura, que é determinante, também, para a elevação do DPV no pomar.

As diferenças encontradas ao longo do trabalho para esse elemento (DPV) podem estar ligadas às características de cobertura de cada ambiente, ao manejo de água, que no pomar foi localizado, bem como ao método utilizado na determinação do déficit de saturação (psicrômetro no pomar e sensor capacitivo na estação).

Tabela 1. Médias diárias do saldo de radiação (Rn), temperatura do ar (T), umidade relativa (UR), déficit de pressão de vapor (DPV), velocidade do vento (V) e chuva monitorados na estação agrometeorológica da Fazenda Areão, Piracicaba, SP.

	Rn (MJm ⁻² d ⁻¹)	T (°C)	UR (%)	DPV (kPa)	Vento (ms ⁻¹)	Chuva* (mm)
2001						
Média	12,45	23,58	76,20	0,71	1,36	406,9
Máximo	17,66	26,92	97,27	1,67	3,01	
Mínimo	3,95	20,27	51,90	0,07	0,38	
2002						
Média	11,28	23,48	84,77	0,45	1,20	925,97
Máximo	16,44	26,92	97,90	1,04	2,73	
Mínimo	4,33	20,66	68,67	0,06	0,06	
Período integral						
Média	11,77	23,52	81,21	0,56	1,27	1332,87

* total de chuva no período

Com relação ao saldo de radiação (Rn), pode ser observado que os valores foram cerca de 9% em média mais elevados no pomar ao longo do ano de 2001, conforme pode-se verificar na Figura 2 e na Tabela 2. Esse comportamento também pode ser confirmado analisando-se pela Figura 3a a correlação entre o saldo de radiação do pomar (Rnp), que reflete a pequena fração de solo coberta pela copa das plantas de lima ácida, determinante para que o balanço de energia fosse modificado em relação ao gramado. A elevada porosidade das copas e a menor parcela de solo sem ervas daninhas sob a copa, contribuíram para o aumento do balanço de ondas curtas, já que o albedo do solo é menor do que o de coberturas foliares.

(a)

(b)

(c)

Figura 2 - Variação temporal do déficit de saturação de vapor e da temperatura do ar no pomar de lima ácida (DPV-P e TP) e estação agrometeorológica (DPV-E e TE) (a); variação da radiação líquida sobre pomar e estação (Rn-P e Rn-E) (b); variação da velocidade do vento a 2 metros de altura no pomar e estação (VP e VE) (c).

Tabela 2. Relação entre os elementos meteorológicos utilizados na estimativa da evapotranspiração do pomar de lima ácida ‘Tahiti’ e no gramado da estação agrometeorológica da fazenda Areão. Sendo DM (%) a diferença relativa média: (média do elemento medido no pomar- média do elemento medido na estação)* 100/ média do elemento medido na estação.

Equação: $y = bx$	R^2	Equação: $y = a + bx$	r^2	DM
2001				
$R_{np} = 1,088R_{ng}$	0,95	$R_{np} = 10,299 + 1,0213R_{ng}$	0,96	
$a \neq 0$	-	$V_p = 0,5448 + 0,8195V_g$	0,93	22
$DPV_p = 1,276DPV_g$	0,97	$DPV_p = 0,0868 + 0,9165DPV_g$	0,99	
$T_p = 0,999T_g$	0,99	$T_p = -0,565 + 1,023T_g$	0,99	
2002				
$R_{np} = 1,0245R_{ng}$	0,96	$R_{np} = 8,1826 + 0,967R_{ng}$	0,96	
$a \neq 0$	-	$V_p = 0,4603 + 0,7913V_g$	0,88	17
$a \neq 0$	-	$DPV_p = 0,1338 + 1,2698DPV_g$	0,86	57
$T_p = 1,0043T_g$	0,95	$T_p = -1,5893 + 1,0718T_g$	0,96	
Período integral				
$R_{np} = 1,0525R_{ng}$	0,95	$R_{np} = 7,0596 + 1,0045R_{ng}$	0,95	
$a \neq 0$	-	$V_p = 0,4761 + 0,8168V_g$	0,89	19
$a \neq 0$	-	$DPV_p = 0,1523 + 1,1424DPV_g$	0,93	44
$T_p = 1,0022T_g$	0,97	$T_p = -1,0561 + 1,047T_g$	0,97	

Para o ano de 2002, as diferenças entre o saldo de radiação no pomar e na estação diminuíram, refletindo o crescimento das plantas de lima ácida. Observa-se, no final do estudo, valores similares entre o R_{np} e R_{ng} (Figura 2b). Essa similaridade pode ser comprovada pela correlação (Figura 3a) entre as variáveis estudadas, na qual ocorre um bom ajuste dos pontos à reta 1:1, com diferença média de 2,4% (Tabela 2).

Estudos realizados em pomar adulto de lima ácida ‘Tahiti’ por Marin (2000) revelaram que os valores de saldo de radiação determinado sobre planta foram 20% e 13% maiores para o período de inverno e verão, respectivamente. No presente estudo, a proximidade encontrada entre o balanço de energia nos dois ambientes estudados pode refletir as condições hídricas adequadas ao longo do experimento, conforme pode ser

verificado pela boa distribuição de chuvas (Figura 1), e a manutenção de ervas na linha e entrelinha de plantio (gramínea).

Eram esperados valores próximos de velocidade do vento nos ambientes estudados, em função da pequena rugosidade do pomar. No entanto, como mostra a variação dos valores médios diários da velocidade do vento ao longo do experimento (Figura 2c), foram verificadas discrepâncias entre os valores obtidos em cada ambiente.

Ressalta-se o fato de que a velocidade do vento foi superior no pomar, ao longo de todo o estudo. Esses resultados podem ser atribuídos ao atrito causado ao deslocamento de ar próximo à superfície do solo no pomar, chegando na estação com velocidade inferior a registrada no mesmo. Essa hipótese parece a mais lógica, estando a declividade do pomar na direção predominante do vento e a estação posicionada logo atrás do pomar em uma cota mais elevada. Esse resultado é um indicativo que a velocidade do vento registrada na estação será muito afetada pela rugosidade do pomar quando as plantas estiverem com as copas bem formadas, sendo um futuro problema para as observações na estação.

Foi verificado também, que acima de um determinado limite de velocidade do vento na estação ($\approx 2 \text{ m.s}^{-1}$), ocorreu uma tendência de aproximação dos valores determinados em cada ambiente (Figura 2c), quando o efeito do atrito deve tornar-se proporcionalmente menos importante. Esta tendência, também pode ser observada nas correlações lineares (Figura 3d), com a aproximação da relação 1:1 quando a velocidade do vento na estação atinge aquele limite. As diferenças encontradas foram próximas para os dois anos de estudo, sendo a DM para o período integral de 19% (Tabela 2).

Praticamente não ocorreram diferenças entre as temperaturas da estação e do pomar a 2 metros de altura. Como observado na Figura 2a, os valores para temperatura são coincidentes ao longo dos dois anos, ocorrendo apenas uma pequena dispersão ($\approx 0,5 \text{ }^{\circ}\text{C}$) no final do período de estudo, a partir do dia Juliano 65, relacionada, também, às práticas culturais citadas anteriormente. Pode ser notado, pelas correlações, a aderência dos pontos à reta 1:1 em todo o período avaliado, sendo as diferenças médias com base nos coeficientes angulares de $-0,1$, $0,4$ e $0,2\%$ para os anos de 2001, 2002 e o período integral, respectivamente (Tabela 2).

Figura 3 - Relações entre os elementos meteorológicos medidos no pomar de lima ácida 'Tahiti' e na estação agrometeorológica, sendo: radiação líquida R_n (a), déficit de saturação de vapor DPV (b), temperatura do ar (c) e velocidade do vento V (d).

A maior disponibilidade energética (R_n) e o maior poder evaporante do ar ($f(u)DPV$) determinados no pomar favoreceram o aumento da demanda atmosférica em relação às condições da estação agrometeorológica. As diferenças encontradas no balanço de energia, velocidade do vento e déficit de saturação fizeram com que a evapotranspiração estimada com os dados do pomar fosse superior à estimada com os dados da estação, em todo período analisado (Figura 4).

Figura 4 - Variação da evapotranspiração de referência (ETo P-M), da evapotranspiração pelo modelo de Penman-Monteith modificada com os dados do pomar (ET P-M) e da evaporação do tanque Classe A ao longo do experimento, Piracicaba, SP.

Como esperado, os valores de evaporação do tanque Classe A foram superiores aos de evapotranspiração de referência, sendo que o coeficiente do tanque (K_p) calculado a partir das duas medidas (0,714) ficou muito próximo do K_p médio encontrado por Sentelhas et al. (1999) na mesma estação agrometeorológica (0,72). A Figura 5 mostra a relação, corroborando a recomendação de K_p apresentada por esses autores para as condições de Piracicaba.

Figura 5 - Relação entre ETo P-M e evaporação do tanque Classe A (ECA) na estação agrometeorológica da fazenda Areão.

4.3.3 Relação entre fluxo de seiva, área foliar e demanda atmosférica

Os resultados referentes às medidas foliares realizadas ao longo do experimento encontram-se na Tabela 3. Pode ser verificado o intenso crescimento das plantas, sendo que, para as avaliadas, a área foliar variou, em pouco mais de 4 meses, de 0,17 a 1,1 m².

Observa-se que existiu uma tendência de aumento do fluxo de seiva com a evolução do tempo de estudo (Figura 6), evidentemente com as variações devido a oscilações dos elementos meteorológicos entre os dias ao longo do estudo. Esse aumento não pode ser explicado pelas variações nas condições de demanda atmosférica, mesmo porque existiu uma diminuição dos valores médios, do ano de 2001 para 2002, de 4,08 para 3,48 mm, mas sim pelo aumento da área foliar e, consequentemente, do potencial transpiratório. Espera-se, que para uma mesma condição de demanda atmosférica, plantas com maior área foliar transpirem proporcionalmente mais. Seguindo esse raciocínio, na Figura 7, os valores de transpiração apresentados na Figura 6 foram separados por classe, cada uma correspondendo a um valor de área foliar total da planta (AFT) e relacionados à evapotranspiração de referência (ETo P-M).

Tabela 3. Medidas de área foliar (m^2) das plantas estudadas ao longo do experimento. Sendo DJ o dia juliano, P a plnata estudada e L o lisímero.

PLANTAS ESTUDADAS						
DJ	P1-L1	P2-L2	P3-L3	P4	P5	P6
279	0,177					
298	0,201		0,38			
306	0,402					
314	0,407					
322			0,45			
336	0,472					
344		0,623				
21					0,547	
22			0,532			0,532
37				0,85		
38					0,862	
39		1,1				
80					1,16	0,883

Observa-se, para uma mesma ETo, o aumento da transpiração com o acréscimo da AFT, sendo constatada uma tendência linear entre transpiração e demanda atmosférica, esta última expressa pela ETo, conforme observado por Nasr et al. (1999), em árvores de maçã cultivadas em condições semi-áridas. Muitos fatores são determinantes na taxa de transpiração de uma planta, dentre os quais citam-se a área foliar, geometria de plantio, espaçamento da cultura, espécie, porta-enxertos, demanda atmosférica e disponibilidade de água. Em função da gama de variáveis interferindo no processo, espera-se que a angulação das retas mudem com os diferentes fatores. Valancogne et al. (2000) verificaram que a transpiração máxima por unidade de evapotranspiração de referência (Tr/ETo) foi melhor correlacionada com o índice de área foliar (IAF) do que com outros parâmetros (fração de cobertura do solo, fração de solo sombreada ao meio dia, radiação global absorvida, radiação líquida absorvida). Observaram também, que a relação entre Tr/ETo e LAI para os pomares de pêssego, maçã e ameixa pode ser generalizada. Para a videira, deve ser analisada separadamente, pois a relação foi diferente (menor), atribuindo-se essa diferença à maior resistência aerodinâmica das folhas, por serem maiores do que as das outras fruteiras, ou pela característica de menor rugosidade da cultura.

Figura 6 - Fluxo de seiva (transpiração máxima) determinado em seis plantas do pomar de lima ácida ‘Tahiti’ no período compreendido de outubro de 2001 a março de 2002, Piracicaba, SP.

Os resultados verificados por Angelocci & Valancogne (1993), Angelocci et al. (1997b) e Braun et al. (2000), para árvores de maçã, e por Marin et al. (2001c), em árvores de lima ácida ‘Tahiti’, indicaram que a transpiração por unidade área foliar (Tr) foi independente do porte das plantas, para uma mesma demanda atmosférica. Esse escalonamento da transpiração utilizando a área foliar facilita a comparação de resultados, pois reduz a variação causada pelo tamanho das árvores e variedades, mesmo para estudos realizados em locais distintos. Dessa forma, a transpiração fica padronizada pela área foliar e, se a mesma relacionar-se linearmente com a demanda atmosférica, poderá ser estimada com base em um modelo climatológico.

Ao escalonar as medidas de transpiração apresentadas na Figura 7, verifica-se a tendência de linearização das medidas (Figura 8). Porém, pode ser observada uma dispersão grande dos pontos e alguns agrupamentos pertencentes à mesma classe de AFT. Isso deve decorrer em função das variáveis (ambiente e planta) citadas anteriormente pois, além das plantas serem diferentes e das medidas realizadas em épocas distintas, existem os possíveis erros inerentes ao MBC, como discutido no capítulo anterior. Somada à dispersão, verifica-se uma leve tendência de mudança da relação Tr versus ETo P-M para o grupo de dados superior a ETo P-M > 2,5 mm, em comparação com o grupo de dados abaixo desse valor.

Para melhor compreensão da dispersão e dessa pequena mudança na relação, são apresentadas as equações lineares da relação entre Tr e ET_o P-M da análise individualizada de cada planta avaliada (Tabela 4). Os resultados indicaram correlação linear e um bom ajuste dos pontos à reta, mesmo quando se forçou a passagem da reta pelo zero, salvo os resultados relativos à planta 6, que possuiu o coeficiente de determinação inferior aos demais. Os resultados para esta planta relacionam-se ao menor número de medidas realizadas com valores de ET_o abaixo de 2,5 mm (3 pontos), sendo esses pontos responsáveis pelo baixo R^2 . Verifica-se que o ajuste à reta aumenta ao se adotar o coeficiente linear (Tabela 4).

Figura 7 - Relação entre transpiração de plantas de lima ácida 'Tahiti', separadas por classes com mesma AFT, com a evapotranspiração de referência ET_o P-M.

Figura 8 - Relação entre transpiração por unidade área foliar de plantas de lima ácida 'Tahiti' e a evapotranspiração de referência (ETo P-M).

O que pode ser discutido, mediante os resultados, é que, mesmo com as inúmeras variáveis que interferem na transpiração, ocorreu variação do coeficiente angular entre 0,34 a 0,39, portanto, um indicativo de que, para plantas jovens de lima ácida 'Tahiti' com AFT variando de 0,17 a 1,1 m², poderá ser adotada uma única equação de estimativa da transpiração máxima, com base no conhecimento de AFT e ETo, como sugerido por Villa Nova et al. (1999).

A mudança de relação entre Tr versus ETo P-M, anteriormente citada, é confirmada pelos coeficientes lineares significativamente diferentes de zero. Como discutido por Angelocci (1996), que também constatou esse problema, a adoção da regressão linear sem o coeficiente linear pode incrementar o erro na estimativa, mas revela-se interessante, pois facilita as comparações entre os diferentes meses e formas de cálculo da ETo, por trabalhar apenas com um coeficiente de ajuste, representado pelo coeficiente angular das retas de regressão.

Tabela 4. Relação entre a transpiração diária das plantas por unidade de área foliar (Tr) e a evapotranspiração de referência (ETo P-M) e os erros absolutos (EA) obtidos a partir das estimativas de transpiração, utilizando regressões lineares contendo ou não o coeficiente linear.

	Equação: $y = bx$	R^2	Equação: $y = a + bx^*$	R^2
P1	$Tr = 0,3934 \text{ ETo P-M}$	0,65	$Tr = 0,4213 + 0,3007 \text{ ETo P-M}$	0,72
P2	$Tr = 0,3566 \text{ ETo P-M}$	0,64	$Tr = 0,416 + 0,2578 \text{ ETo P-M}$	0,76
P3	$Tr = 0,3752 \text{ ETo P-M}$	0,57	$Tr = 0,3772 + 0,2931 \text{ ETo P-M}$	0,63
P4	$Tr = 0,3374 \text{ ETo P-M}$	0,71	$Tr = 0,2756 + 0,2367 \text{ ETo P-M}$	0,75
P5	$Tr = 0,3676 \text{ ETo P-M}$	0,67	$Tr = 0,208 + 0,3106 \text{ ETo P-M}$	0,67
P6	$Tr = 0,3909 \text{ ETo P-M}$	0,25	$Tr = 0,6497 + 0,228 \text{ ETo P-M}$	0,55

* coeficientes lineares diferentes de zero, ao nível de 1% de probabilidade.

Ao se agrupar e relacionar todos os valores de Tr com os de evapotranspiração, verifica-se a manutenção do comportamento discutido anteriormente quando se analisou, separadamente, as plantas (Tabela 5). Com os dados agrupados, foram utilizadas outras formas de expressar a demanda atmosférica (Figuras 9 e 10).

Comparando os resultados das Tabelas 4 e 5, verifica-se que o agrupamento melhorou um pouco o ajuste dos pontos à reta, verificando-se que o coeficiente de determinação da relação entre Tr e ETo P-M é levemente superior à maioria dos encontrados na Tabela 4. É interessante ressaltar que o coeficiente angular encontrado para a relação com ETo P-M foi de 0,38 quando se usa o ajuste passando pelo zero (Tabela 5), muito próximo ao obtido por Angelocci et al. (1997b) para macieiras adultas. O ajuste dos pontos à reta continuou sendo melhor quando utilizada a equação composta pelo coeficiente angular e linear.

Os coeficientes angulares das equações variaram em função do método de estimativa da evapotranspiração Figura 9. As desigualdades entre ETo (estação) e a evapotranspiração calculada para as condições do pomar (ET) foram refletidas nos coeficientes angulares encontrados para cada ambiente estudado (Figura 10). Contudo, existiu uma similaridade interessante dos valores quando a equação é composta por ETo

PEN e ETo P-T para estação ou pela ET P-M para o pomar, nas quais o coeficiente angular tende para o valor de 0,328, podendo o mesmo ser utilizado tanto em condições padrões (estação agrometeorológica) como a partir de elementos meteorológicos determinados sobre o pomar. Deve-se levar em consideração que, na primeira condição, a evapotranspiração poderá ser calculada por Penman e Priestley-Taylor e, na segunda, apenas por Penman-Monteith.

Salienta-se que as relações encontradas com os dados do pomar são muito específicas para a condição e época em que se desenvolveu o estudo, já que não se trata de um local de referência. As relações devem mudar, por exemplo, com o manejo da cultura, conforme verificado anteriormente ao se analisar os elementos medidos nesse ambiente em comparação com os determinados da estação (referência).

Foi observado também que o coeficiente angular para a equação composta por ETo P-M e ETo TCA foram similares, tendendo para 0,377. O ajuste de um coeficiente angular, expressando a relação entre Tr e ETo TCA, mesmo ocorrendo uma dispersão grande dos pontos ($r^2=0,12$), é muito importante na prática agrícola em função da grande utilidade do tanque Classe A no manejo de irrigação e pelas dificuldades inerentes aos custos e manutenção dos equipamentos utilizados para determinar os elementos meteorológicos necessários para o cálculo da evapotranspiração com modelos climatológicos apresentados. Como pode ser analisado na Figura 9e e 9f existem pontos isolados, quando em baixa demanda atmosférica, combinado com uma Tr relativamente alta para esta demanda, refletindo, possivelmente, a mudança da relação Tr versus ETo P-M discutida anteriormente.

Ao utilizar apenas o valor de água evaporada pelo tanque Classe A, ganha-se um pouco na qualidade do ajuste comparada ao termo composto por $K_p \cdot ECA$ (ETo TCA).

Tabela 5. Relação entre a transpiração diária por unidade de área foliar (Tr , $L\ m^{-2}dia^{-1}$) e a evapotranspiração referência (ET_o , $mm\ dia^{-1}$) determinada por três modelos climatológicos diferentes (Penman Monteith (P-M), Penman (PEN) e Priestley e Taylor (P-T)) na estação agrometeorológica e pomar de lima ácida 'Tahiti'.

Equação: $y = bx$	r^2	Equação: $y = a + bx^*$	r^2
Estação			
$Tr = 0,3764\ ET_o\ P-M$	0,66	$Tr = 0,355 + 0,291\ ET_o\ P-M$	0,72
$Tr = 0,3287\ ET_o\ PEN$	0,62	$Tr = 0,401 + 0,245\ ET_o\ PEN$	0,72
$Tr = 0,3272\ ET_o\ P-T$	0,63	$Tr = 0,292 + 0,266\ ET_o\ P-T$	0,67
$Tr = 0,3777\ ET_o\ TCA$	0,12	$Tr = 0,718 + 0,214\ ET_o\ TCA$	0,32
$Tr = 0,273\ ECA$	0,19	$Tr = 0,6809 + 0,1602\ ECA$	0,41
Pomar			
$Tr = 0,3271\ ET\ P-M$	0,60	$Tr = 0,3524 + 0,25\ ET\ P-M$	0,67
$Tr = 0,2937\ ET\ PEN$	0,56	$Tr = 0,374 + 0,2196\ ET\ PEN$	0,65
$Tr = 0,2953\ ET\ P-T$	0,55	$Tr = 0,323 + 0,2305\ ET\ P-T$	0,60
Pomar/Estação			
$Tr = 0,121\ Rn\ grama$	0,59	$Tr = 0,3 + 0,0975\ Rn\ grama$	0,63
$Tr = 0,112\ Rn\ pomar$	0,49	$Tr = 0,334 + 0,0868\ Rn\ pomar$	0,54

* coeficientes lineares diferentes de zero, ao nível de significância de 1%.

** evapotranspiração de referência $ET_o\ P-M$

** * radiação líquida $MJm^{-2}dia^{-1}$

Ao se considerar apenas o termo energético (Rn), também foi encontrada uma relação linear, fato este também observado por Marin et al. (2001c) ao estudar a transpiração em duas árvores de lima ácida 'Tahiti'. Esses autores encontraram um coeficiente de ajuste (0,089) menor que o encontrado no presente estudo (0,121) para um período úmido do estudo, quando a radiação líquida medida sobre o gramado ($Rn\ grama$) variou de 5 a $18,5\ MJ\ m^{-2}\ dia^{-1}$ e a temperatura de $21,8$ a $26,1^\circ C$, dentro da faixa encontrada no presente trabalho. Ao comparar os resultados de Tr relacionados ao período úmido, acima citado, com um seco e frio, sob mesma condição energética, aqueles autores verificaram que a Tr foi inferior neste último período, atribuindo o fato ao regime térmico diferenciado nos dois períodos, baseando-se em Kriedmann & Barrs (1981), que apontam a temperatura do solo como um eficiente regulador da condutividade hidráulica, e portanto da transpiração em plantas cítricas.

Marin et al. (2001c) verificaram, também, que a Tr atingiu um valor máximo de $1,31 \text{ L m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ quando os valores de Rn grama estavam em torno de $16 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$, diminuindo acima deste limite. Sugeriram, então, que em dias com picos de Rn grama, a absorção energética da árvore foi elevada, mas a capacidade de suprimento de água pelo sistema radicular não foi suficiente para atender a demanda atmosférica.

O primeiro ponto verificado pelos autores, relacionado às reduções da Tr em período frios, não pode ser comparado com os resultados obtidos no presente estudo, visto que o regime térmico registrado foi relativamente constante (Tabela 1). Mas, os valores mínimos de Tr ($0,29 \text{ litros m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$), se aproximam dos observados em árvores adultas por esses autores ($0,2 \text{ litros m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$), mesmo não ocorrendo os valores mínimos de temperatura registrados no estudo citado.

Com relação ao segundo aspecto, não foi verificada a redução clara nos valores de Tr com o aumento da demanda atmosférica. Observou-se, como discutido anteriormente, uma variação na relação Tr versus ETo P-M, que ocorre a partir de um valor inferior ao encontrado por Marin et al. (2001c), que não pode ser explicada pela incapacidade do sistema radicular em suprir adequadamente água à parte aérea, pois, como observa-se na Figura 9a, existiu uma tendência de crescimento da transpiração com o aumento de Rn grama, mesmo em condições de elevada disponibilidade energética, acima de $16 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$. A maior relação *raiz:copa* em plantas jovens (Castel, 1978) pode explicar a razão de não ter ocorrido a queda da Tr sob elevada disponibilidade energética.

Outro ponto a se destacar no estudo, são os valores máximos de Tr, que atingiram picos de $2,3 \text{ litros m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$, bem superior aos observados por Marin et al. (2001c). Essas diferenças são plenamente justificáveis, pois plantas adultas de citros possuem um elevado índice de área foliar relativo à parcela de solo na projeção da copa, podendo atingir valores de 9 a 11 dependendo do porta-enxerto utilizado (Syvertsen & Lloyd, 1994). Essa característica origina uma grande quantidade de folhas posicionadas na parte interna da copa, que recebem uma menor quantidade de radiação solar devido ao auto-sombreamento e transpiram menos que as mais expostas, contribuindo para redução da Tr. De maneira semelhante, existe o sombreamento entre diferentes árvores

do pomar, quando a elevação solar é baixa, que varia com o crescimento das plantas e diminuição do espaçamento de plantio. Essas características justificam o maior valor do coeficiente angular da equação que envolve R_n grama (0,121) para o pomar jovem em comparação ao encontrado por Marin et al. (2001c) no período úmido do estudo (0.089).

Dentre os muitos fatores ambientais que interferem no mecanismo de abertura estomática da planta, que também poderiam explicar queda dos valores de Tr discutidos, destaca-se o déficit de pressão de vapor (DPV), que correlaciona-se com a R_n . Em condições de elevada DPV (baixa umidade relativa e alta temperatura), tem-se verificado um eficiente controle estomático em citros (Syvertsen & Lloyd, 1994).

Porém segundo esses autores, não se pode afirmar de maneira conclusiva que existe um mecanismo de resposta direta (“feedforward”) dos estômatos à variação da umidade relativa do ar, pois o decréscimo da condutância estomática em folhas cítricas com o aumento de do DPV não é grande suficiente para ocorrer a diminuição da transpiração em condições não limitantes de água no solo. A sensibilidade dos estômatos à umidade do ar pode estar associada às elevadas resistências ao transporte de água em plantas cítricas (Kriedmann & Barrs, 1981). Observou-se (Hall et al., 1975; Levy, 1980), no entanto, que existe uma tendência de estabilização da transpiração por regulação estomática em uma ampla faixa de gradiente de vapor entre folha e atmosfera. Esse mecanismo de controle estomático faz, em alguns casos, plantas cítricas transpirarem similarmente mesmo sob condições distintas de demanda atmosférica, como relatado por Levy (1980) para as condições da Flórida e Arizona nos EUA. Shalhevet & Levy (1990) relataram, também, que o volume de água aplicado em plantas cítricas em Israel é o mesmo, independente se o pomar está na costa úmida ou no deserto.

Apesar de não ter sido verificado, no presente estudo, a redução da Tr com o aumento da demanda atmosférica, a regulação estomática pode explicar a leve queda na taxa de transpiração por unidade área foliar (Tr versus ET P-M) com o aumento da demanda atmosférica.

É importante salientar, que em se tratando de plantas jovens, em pleno crescimento, grande parte das folhas eram novas ou estavam em expansão, apresentando, portanto, menor capacidade de regulação da perda de água,

comparativamente a folhas adultas, pois carecem da rigidez estrutural (cutinização) e não possuem tanta cera cuticular como em folhas maduras (Syvertsen, 1982), sendo essa característica, mais um elemento que pode explicar, também, as diferenças das respostas entre as plantas novas e adultas.

Figura 9 – Relação entre a transpiração por unidade área foliar (Tr) de plantas de lima ácida ‘Tahiti’ com as medidas de radiação líquida sobre gramado (Rn grama) (a), com a evapotranspiração de referência, calculada segundo Penman-Monteith (ETo P-M) (b), Penman (ETo PEN) (c), Priestley-Taylor (ETo P-T) (d) e tanque Classe A (ETo TCA) (e), e com a evaporação do tanque Classe A (f).

Figura 10 - Relação entre a transpiração por unidade área foliar (Tr) de plantas de lima ácida ‘Tahiti’ com as medidas de Radiação líquida sobre pomar (Rn pomar) (a) e evapotranspiração, calculada segundo Penman-Monteith (ET P-M) (b), Penman (ET PEN) (c), Priestley-Taylor (ET P-T) (d).

4.3.4 Estimativa da transpiração diretamente a partir da evapotranspiração de referência

Uma outra maneira de se estimar a transpiração em fruteiras foi apresentado por Villa Nova et al. (1999), encontrando excelente concordância entre os valores de transpiração estimados e o fluxo de seiva de macieiras determinado com o MBC, com vantagens em relação à adaptação do modelo de Penman-Monteith por não necessitar das resistências à difusão de vapor da folha e da camada limite.

O mesmo procedimento foi realizado no presente estudo, comparando-se as estimativas transpiração utilizando os modelos adaptados de Penman, Priestley-Taylor e Penman-Monteith para as condições do pomar e estação com a transpiração máxima

determinada (Figura 11), mostrando bons ajustes lineares em todos os casos. A comparação dos resultados para os dois ambientes (estação e pomar), revelou uma maior concordância, em média, ao se utilizar os elementos determinados na estação, quando a diferença máxima foi de 9% utilizando o método de Priestley-Taylor (ETo P-T). De maneira geral, existiu a tendência dos coeficientes angulares serem maiores quando se utilizou os elementos medidos no pomar, com superestimativas da ordem de 18% quando foram utilizados os modelos de Penman e Priestley-Taylor, justificados nas condições do presente estudo, pois a demanda hídrica atmosférica foi superior no pomar, como discutido anteriormente. Os coeficientes angulares encontrados foram sempre maiores, comparando cada ambiente separadamente, do que os observados por Angelocci et al (2000) ao trabalharem com esse mesmo procedimento em árvores adultas de lima ácida ‘Tahiti’ (áreas foliares de 36 m² e 56 m²), refletindo mais uma vez a maior Tr das plantas jovens. Esses autores encontraram concordâncias variáveis com o valor diário de fluxo de seiva, em função do método de estimativa de ETo e local de observação do dado meteorológico (pomar e estação), sendo a maior concordância obtida com os dados do pomar, sendo que com os dados da estação ocorreu tendência de subestimativa da ordem de 17% em média. Foi verificada a maior concordância genérica com o uso de P-T e P-M.

A análise conjunta dos resultados relativos à estação e o pomar, no presente estudo, revelou maior concordância ao se utilizar o modelo de Penman (ETo PEN), para as condições da estação, com superestimativa em relação à transpiração medida de 5,6% e o modelo de Penman-Monteith (ET P-M) a partir dos elementos meteorológicos medidos no pomar, com superestimativa de 5,7%.

Ressalta-se que esse procedimento metodológico realizado em plantas adultas de lima ácida ‘Tahiti’ (Angelocci et al., 2000) não conduziu à concordâncias tão boas como as do presente estudo com os dados da estação (referência), sugerindo, para o caso de lima ácida, que esse procedimento não deve ser generalizado para pomares com plantas com áreas foliares diferenciadas.

Figura 11 – Relação entre a transpiração de plantas de lima ácida ‘Tahiti’ obtidos a partir de modelos de estimativas de evapotranspiração (Penman-Monteith, Penman e Priestley-Taylor) e a transpiração de plantas obtidas a partir do fluxo de seiva integrado (método do balanço de calor).

Os coeficientes de determinação (Figura 11) foram maiores que os encontrados para relação $Tr \times ETo$ no estudo anterior. Esse resultado está de acordo com os de Angelocci et al. (1997b), que observaram uma melhora no ajuste dos pontos à reta quando a transpiração foi relacionada à variável composta $AF \cdot ETo$, comparativamente a relação Tr com ETo .

A utilização das metodologias aqui apresentadas (itens 4.3.3 e 4.3.4), são boas alternativas para o manejo de irrigação localizada em plantas jovens de citros, pois eliminam a subjetividade da utilização dos coeficientes de cultura (Kc) e da parcela do terreno coberta pela copa das plantas, como variável de entrada para estimativa da evapotranspiração, na metodologia recomendada pela FAO-56 (Allen et al., 1998). Na

metodologia aqui estudada, estima-se a transpiração de plantas individualmente, a partir de valores de evapotranspiração de referência e de área foliar da planta (AFT). A maior dificuldade pode estar ligada à AFT, uma variável de difícil medida, principalmente em citros, cuja ordem de grandeza varia de poucos m^2 podendo chegar a centenas. É importante, em função dos problemas que possam surgir relacionados à generalização de resultados, a continuidade dos estudos nessa linha de pesquisa, avaliando-se plantas com tamanhos variados. Paralelamente, é necessário a realização de estudos que facilitem a determinação, com qualidade, da AFT de plantas, pois, essa é uma variável de entrada para o cálculo da transpiração, afetando diretamente os valores calculados.

4.4 Conclusões

O aumento da transpiração ao longo do período de estudo esteve mais relacionado ao aumento de área foliar do que da demanda atmosférica.

A utilização da transpiração escalonada (Tr) pela área foliar total, permitiu o estudo comparativo de plantas com diferentes tamanhos e transpirando em épocas diferentes.

Obteve-se uma relação linear entre a transpiração diária por unidade de área foliar e a evapotranspiração de referência estimada pelos métodos de Penman-Monteith com padronização da FAO, de Penman, de Priestley-Taylor e do tanque classe A, sendo o pior ajuste com a utilização deste último.

A utilização da ET_o estimada pelos métodos de Penman-Monteith e do tanque classe A pelo fator 0,377 permitiu a estimativa da transpiração expressa pelo fluxo de seiva. Para o método de Penman e Priestley-Taylor, o fator de multiplicação encontrado foi 0,328.

O uso de dados meteorológicos medidos no pomar na estimativa da evapotranspiração levou a relações diferentes das encontradas com os medidos na estação.

A transpiração diária estimada pela multiplicação de $ET_o/2,88$ pela área foliar das plantas, mostrou-se em boa concordância com a transpiração expressa pelo fluxo de seiva, quando se usou o método de Penman-Monteith e de Penman com os dados

meteorológicos da estação, sendo menos concordante com o uso do método de Priestley-Taylor. Pelo uso dos dados meteorológicos do pomar, somente com a evapotranspiração calculada por Penman-Monteith encontrou-se boa concordância.

5 CONCLUSÕES GERAIS

O método de balanço de calor permitiu obter valores diários de fluxo de seiva de plantas jovens de lima ácida ‘Thaiti’ em excelente concordância com os valores de transpiração medidas por lisímetros nos quais elas estavam crescendo . As comparações em escala de tempo inferiores a 12 h mostraram grande discrepância, possivelmente em função dos erros introduzidos pelas medidas lisimétricas. Erros nessas escalas podem ocorrer, também por defasagem temporal entre a transpiração das folhas e o fluxo de seiva, mas não foi possível comprovar essa defasagem nas condições de estudo.

Na comparação de fluxo de seiva com a transpiração medida por porometria, na escala de 20 minutos, encontrou-se uma relação de 1:1, mas com elevada dispersão dos dados ($R^2=0,48$), que pode ser decorrente tanto de defasagem como de erros introduzidos pela porometria.

Os resultados obtidos indicam que o método de balanço de calor mostrou-se adequado para a determinação no campo da transpiração diária de plantas jovens (com área foliar de até $1,5 \text{ m}^2$) de lima ácida ‘Tahiti’, mostrando as vantagens de não ser destrutivo, não perturbar o sistema e de ser relativamente prático, quando comparados com os outros métodos, constituindo-se uma boa alternativa a estes.

O aumento da transpiração ao longo do período de estudo esteve mais relacionado ao aumento de área foliar do que da demanda atmosférica.

A utilização da transpiração escalonada (Tr) pela área foliar total, permitiu o estudo comparativo de plantas com diferentes tamanhos e transpirando em épocas diferentes.

Obteve-se uma relação linear entre a transpiração diária por unidade de área foliar e a evapotranspiração de referência estimada pelos métodos de Penman-Monteith

com padronização da FAO, de Penman, de Priestley-Taylor e do tanque classe A, sendo o pior ajuste com a utilização deste último.

A utilização da ETo estimada pelos métodos de Penman-Monteith e do tanque classe A pelo fator 0,377 permitiu a estimativa da transpiração expressa pelo fluxo de seiva. Para o método de Penman e Priestley-Taylor, o fator de multiplicação encontrado foi 0,328.

O uso de dados meteorológicos medidos no pomar na estimativa da evapotranspiração levou a relações diferentes das encontradas com os medidos na estação.

A transpiração diária estimada pela multiplicação de $ETo/2,88$ pela área foliar das plantas, mostrou-se em boa concordância com a transpiração expressa pelo fluxo de seiva, quando se usou o método de Penman-Monteith e de Penman com os dados meteorológicos da estação, sendo menos concordante com o uso do método de Priestley-Taylor. Pelo uso dos dados meteorológicos do pomar, somente com a evapotranspiração calculada por Penman-Monteith encontrou-se boa concordância.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALLEN, R. G.; PRUITT, W., O .; JENSEN, M. E. Environmental requirements of lysimeters. In: ALLEN, R. G.; HOWELL, T. A.; PRUITT, W. O. et al. (Ed.) **Lysimeter for Evapotranspiration and Environmental Measurements**. New York: American Society of Civil Engineers, 1991. p. 170-181.
- AMEGLIO, T.; ARCHER, P.; COHEN, M.; VALANCOGNE, C.; DAUDET, F.; DAYAU, S.; CRUIZIAT. Significance and limits in the use of predawn leaf water potential for tree irrigation. *Pant and Soil*, v.207, p.155-167, 1999.
- AMEGLIO, T.; ARCHER, P.; DAUDET, F.A.; VALANCOGNE, C.; DAYAU, S.; GAMA, M.I.F.; COHEN, M. Relations between relative transpiration and predawn leaf water potential in different fruit tree species. **Acta horticulturae**, v.2, n.449, p.431-437, 1996.
- ANGELOCCI, L.R. Estimativa da transpiração máxima de macieiras (*Malus spp*) em pomares pelo modelo de Penmen-Monteith. Piracicaba, 1996. 75p. Tese (Livre-Docência) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo.
- ANGELOCCI, L.R. **Água na planta e trocas gasosas/energéticas com a atmosfera**. Piracicaba: Edição pessoal, 2002, 268p.

- ANGELOCCI, L.R. **Métodos e técnicas de estudo das relações água-planta-atmosfera**. Departamento de Ciências Exatas, ESALQ-USP, Piracicaba 104p. 2001.
- ANGELOCCI, L.R.; VALANCOGNE, C. Leaf area and water flux in apple trees. **Journal of Horticultural Science**, v.67, n.2, p.299-307, 1993.
- ANGELOCCI, L.R.; VALANCOGNE, C.; VILLA NOVA, N.A.; PEREIRA, A.R. Estimativa da transpiração máxima de macieiras em pomares pelo modelo de Penman-Monteith e comparação com o fluxo de seiva medido pelo método de balanço de calor. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, 10. Piracicaba, 1997a. **Anais**. Piracicaba: SBA, 1997. p. 719-721.
- ANGELOCCI, L.R.; VALANCOGNE, C.; VILLA NOVA, N.A.; PEREIRA, A.R. Relações entre fluxo de seiva de macieiras em pomar irrigado, área foliar e evapotranspiração de referência. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, 10. Piracicaba, 1997b. **Anais**. Piracicaba: SBA, 1997. p. 716-718.
- ANGELOCCI, L.R.; VILLA NOVA, N.A.; MARIN, F.R.; PEREIRA, A.R.; SENTELHAS, P.C. Estimativa da transpiração de lima ácida 'Tahiti' por modelos climatológicos e comparação com o fluxo de seiva determinado pelo método do balanço de calor. (compact disc) In: REUNION ARGENTINA DE AGROMETEOROLOGIA, 8. Mendoza, 2000. **Anais**. Mendoza: SAA, 2000. (CD-Rom).
- ANSLEY, R.J.; DUGAS, W.A.; HEUER, M.L.; TREVINO, B.A. Sten flow and porometer measurements of transpiration from honey mesquite (*Prosopis glandulosa*). **Journal of experimental botany**, v.45, n.275, p.847-856, June, 1994.

ARRUDA, F.B.; FUJIWARA, M.; CALHEIROS, R. de O.; PIRES, R.C. de M.; SAKAI, E. A agricultura irrigada ante a administração dos recursos hídricos do Estado de São Paulo. **Laranja**, v.15, n.2, p.243-364, 1994.

BAKER, J.M.; NIEBER, J.L. An analysis of the steady-state heat balance method for measuring sap flow in plants. **Agricultural and Forest Meteorology**, v.48, p.93-109. 1989.

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.777-782, 1987.

BERQUÓ, E.S.; SOUZA, J.M.P. de; GOTLIEB, S.L.D. **Bioestatística**. 2ed. São Paulo: Editora Pedagógica e Universitária, 1981. 350p.

BRAUN, P.; MAURER, B.; HEINEMANN, G. Scaling transpiration in apple orchards – meteorological versus plant based physiological measurements. **Acta Horticultural**, v. 537, p. 45-51, Oct. 2000.

CAMPBELL, C.W. Rootstocks for the ‘Tahiti’ lime. **Proceedings of the Florida State Horticultural Society**, v.104, p.28-30, 1991.

CAMPECHE, L.F.S.M. Construção, calibração e análise de funcionamento de lisímetros de pesagem para determinação da evapotranspiração da cultura da lima ácida ‘Tahiti’ (*Citrus latifolia* Tan.). Piracicaba, 2001. 67p. Tese (Doutorado) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo.

CASTEL, W.A. Citrus root systems: their structure, function, growth, and relationship to tree performance. **Proceedings of the international society of citriculture** , v.62 p.62-69, 1996.

- CERMAK, J.; KUCERA, J.; ZIDECK, V. Xylem water flow in crack willow tree (*Salix fragillis* L.) in relation to diurnal changes of environment. **Oecologia**, v.64, p.145-151, 1984.
- COELHO FILHO, M.A.; ANGELOCCI, L.R.; VILLA NOVA, N.A. Avaliação de métodos diretos e indiretos na estimativa de área foliar em árvores de lima ácida 'Tahiti'. (compact disc) In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 31, Salvador, 2002, **Anais**. Salvador: SBEA, 2002. (CD-Rom).
- COELHO, Y.S. **Lima ácida 'Tahiti' para exportação: aspectos técnicos da produção**. Brasília: MAARA; SDR, 1993. 35 p. (Série Publicações Técnicas Frupep, 1).
- COHEN, Y. Determination of orchard water requirement by a combined trunk sap flow and meteorological approach. **Irrigation Science**, v.12, p.93-98, 1991.
- COHEN, Y.; FUCHS, M.; MORESHET, S. Estimating citrus orchard canopy resistance from measurement of actual and potential transpiration. In: BORGHETTI, M., GRACE, J., RASCHI, A. **Water transport in plants under climatic stress**. Cambridge: Cambridge University Press, p.228-237, 1993.
- COHEN, Y.; FUCHS, M.; GREEN, G.C. Improvement of the heat pulse method for determining sap flow in trees. **Plant, Cell and Environment**, v.4, p.391-397, 1981.
- DAAMEN, C.C.; DUGAS, W.A.; PRENDERGAST, P.T.; JUDD, M.J.; McNAUGHTON, K.G. Energy flux measurements in sheltered lemon orchard. **Agricultural and Forest Meteorology**, v.93, p.171-183, 1999.

- DAL BOSCO , A. Fluxo de seiva em laranjeira (*Citrus sinensis* L. Osb.) “Pêra” infectada com *Xylella fastidiosa* Wells. Piracicaba, 2001. 53p. Dissertação (Mestrado) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo.
- DAUM, C.R. A method for determining water transport in trees. **Ecology**, v.48, n.3, p.425-431, 1967.
- DOMINGO, R.; RUIZ-SÁNCHEZ, M.C.; SÁNCHEZ-BLANCO, M.J.; TORRECILLAS, A. Water relations, growth and yield of Fino lemon trees under regulated deficit irrigation. *Irrigation Science*, v.16, p.115-123, 1996.
- DONADIO, L.C. Exigências para exportação de citros. In: SIMPOSIO INTERNACIONAL DE FRUTICULTURA; 1. PRODUÇÃO E QUALIDADE DE FRUTOS CÍTRICOS, 1, Botucatu, 1994. **Anais**. Botucatu: FAPESP, 1999. p.33-45.
- DOORENBOS, J. PRUITT, J.O. **Necessidades hídricas das culturas**. Trad. de H. Gheye, J.E.C. Metri e F.A.V. Damasceno. Campina Grande: UFPB, 1997. 202p. (Estudos FAO. Irrigação e Drenagem, 24).
- ESTANISLAU, M.L.L.; BOTEON, M.; JÚNIOR, F.L.C.; PAIVA, B.M. Laranjas e sucos: aspectos econômicos. **Informe Agropecuário**, v.22, p.8-20, mar/abr. 2001.
- FAVETTA, G.M. A escolha do equipamento de irrigação mais apropriado para os citros. **Laranja**, v.19, n.2, p. 321-330, 1998.

FIGUEIREDO, J.O.; STUCHI, E.S.; LARANJEIRA, F.F.; DONADIO, L.C.; SOBRINHO, J.T.; SEMPIONATO, O.R.; MULLER, G.W. Porta-enxertos para lima ácida 'Tahiti' em duas regiões do Estado de São Paulo. **Laranja**, v.22, n.1, p.203-213, 2001.

FNP CONSULTORIA & COMÉRCIO. **Anuário Estatístico da Agricultura Brasileira**. São Paulo, 2002. p. 315-325: Citros.

GERDS, G.; ALLISON, B.E.; PEREIRA, S.L. Over estimation of soybean crop transpiration by sap flow measurement under field conditions in central Portugal. **Irrigation Science**, v.14, p. 135-139, 1994.

GONZÁLEZ-ALTOZANO, P.; CASTEL, J.R. Regulated deficit irrigation in 'Clementin a Nules' citrus tree. I Yield nad fruit quality effects. **Journal of Horticultural Science & Biotechnology**, v. 74, n.6, p.706-713, 1999.

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

GREBET, P.; CUENCA, R.H. History of lysimeter design and effects of environmental disturbances. In: ALLEN, R.G.; HOWELL, T.A.; PRUITT, W.O. et al. (Ed.) **Lysimeter for Evapotranspiration and Environmental Measurements**. New York: American Society of Civil Engineers, 1991. p. 11-18.

GREEN, S.; COLTHIER, B. The root zone dynamics of water uptake by a mature apple tree. **Plant and Soil**, v.206, p.61-77, 1999.

GREEN, S.R. Radiation balance, transpiration and photosynthesis of na isolated tree. **Agricultural and Forest Meteorology**, v.64, p.201-221, 1993.

- GREEN, S.R.; McNAUGHTON, K.G.; GREER, D.H.; McLEOD, D.J. Measurement of the increase par and net all-wave radiation absorption na apple tree caused by applying a reflective ground covering. **Agricultural and Forest Meteorology**, v.76, p.163-183, 1995.
- GRIME, V.L.; MORISON, J.I.L.; SIMMONDS, L.P. Sap flow Measurements from stem heat balance: a comparison of constant with variable power methods. **Agricultural and Forest Meteorology**, v.74, p. 27-40, 1995.
- HALL, A.E.; CAMACHO-B, S.E.; KAUFMANN, M.R. Regulation of water loss by citrus leaves. **Physiologia Plantarum**, v. 33, p. 62-65, 1975.
- 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.
- HOWELL, T. A.; SCHNEIDER, A. D.; DUSEK, D. A.; MAREK, T. H.; STEINER, J. L. Calibration and scale performance of Bushland weighing lysimeters. **Transactions of the ASAE**, v 38, n.4, p.1019-1024. 1995.
- JENSEN, M.E.; BURMAN, R.D.; ALLEN, R.G. **Evapotranspiration and irrigation water requirements**. New York: ASCE, 1990. 332p.
- JONES, H.G.; TARDIEU, F. Modelling water relations of horticultural crops: a review. **Scientia Horticulturae**, v.74, p.21-46, 1998.
- KJELGAARD, J.F.; STOCKLE, C.O.; BLACK, R.A.; CAMPBELL, G.S. Measuring sap flow with the heat balance approach using constant and variable heat inputs. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 85, p.239-250, 1997.

- KNIGHT, P.R.; HARRIS, J.R.; FANELLI, J.K. Root severance at harvest increases embolism and decreases sap flow of field-grown *Acer rubrum* L. **Hortscience**, v.35, n.8, p.833-836, Aug. 2000.
- KRIEDEMANN, P.E.; BARRS, H.D. Citrus orchards. In: KOZLOWSKI, T.T. (Ed). Water deficits and plant growth, London: Academic Press, v. VI, 1981. p. 325-417.
- LEVY, Y. Effect of evaporative demand on water relations of *Citrus limon*. **Annual Botany**. v.46, p.695-700, 1980.
- MACHADO, C.C.; COELHO, R.D., COELHO FILHO, M.A. Adaptação radicular do porta-enxerto limão ‘Cravo’ à irrigação localizada. **Laranja**, v.22, n.1, p. 215-230, 2001.
- MARIN, F.R. ANGELOCCI, L.R.; PEREIRA, A.R.; VILLA NOVA, N.A. e SENTELHAS, P.C Relação entre a evapotranspiração e transpiração máxima num pequeno pomar de lima ácida ‘Tahiti’. XII Congresso Brasileiro de Agrometeorologia, Fortaleza. *Anais*, v.2, 667-668.2001.
- MARIN, F.R. Evapotranspiração, transpiração e balanço de energia em pomar de lima ácida ‘Tahiti’ Piracicaba, 2000. 74p. Dissertação (Mestrado) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo.
- MARIN, F.R.; ANGELOCCI, L.R.; COELHO FILHO, M.A.; VILLA NOVA, N.A. Construção e avaliação de psicrômetro aspirado de termopar. **Scientia Agricola**, v.58, n.4, p. 839-844, 2001.
- MARIN, F.R.; ANGELOCCI, L.R.; PEREIRA, A.R.; VILLA NOVA, N.A.; SENTELHAS, P.C. Sap flow and evapotranspiration in an irrigated citrus orchard. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v.9, n.2, p.219-226, 2001.

MASSAI, R.; REMORINI, D.; FERREIRA, M.I.; PAÇO, T.A. Sap flow in peach trees during water stress and recovery in two environmental conditions. **Acta Horticultural**, v. 537, p. 351-358, Oct. 2000.

OLIVEIRA, R.F. de. Desenvolvimento e análise de desempenho de um sensor de fluxo para avaliação de transpiração vegetal pelo método de balanço de calor. Piracicaba, 1997. 73p. Tese (Livre-Docência) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo.

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

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

REICHARDT, K. Capacidade de campo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.12, p. 211-216, 1988.

SAKURATANI, T. A heat balance method for measuring water flux in the stem of intact plants. **Journal of Agricultural Meteorology**, v.37, n.1, p.9-17, 1981.

SANTIAGO, A.V. Evapotranspiração de referência medida por lisímetro de pesagem e estimada por Penman-Monteith (FAO-56), nas escalas mensal e decendial. Piracicaba, 2001. 37p. Dissertação (Mestrado) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo.

- SENTELHAS, P. C., COELHO FILHO, M. A., NOVA, N. A. V., PEREIRA, A. R., FOLEGATTI, M. V. Coeficiente do tanque Classe A (Kp) para a estimativa diária da evapotranspiração de referência. (compact disc) In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, 11, Florianópolis. **Anais**. Campinas: Sociedade Brasileira de Agrometeorologia, 1999. (CD-Rom)
- SENTELHAS, P.C.; MARIN, F.R.; ANGELOCCI, A.R.; VILLA NOVA, N.A.; BARBIERE, V. **Análise dos dados climáticos e do balanço hídrico climatológico de Piracicaba (1917-1997)**. Piracicaba: DFM/ESALQ/USP. 1998. 81p.
- SENTELHAS, P.C.; PEREIRA, A.R. A maior estiagem do século? **Notícias Piracena**, v.6, n.50, p.1, 2000.
- SERRANO, F.R.L.; CASTILLEJOS, T.L.; MILLÁN, J.M. LAI estimation of natural pine forest using a non-standard sampling technique. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 101, p.95-111, 2000.
- 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.
- SHALHEVET, J.; LEVY, Y. Citrus trees. In: STEWART, B.A.; NIELSEN, D.R. (Ed.). **Irrigation of agricultural crops**, Madisom: Wisconsin USA, 1990. p. 951-986.
- STEINBERG, S.; BAVEL, C.H.M. van; CORNELIUS, H.M. A gauge to measure mass flow rate of sap in stems and trunks of wood plants. **Journal of the American Society for Horticultural Science**, v.114, n.3, p.466-472, 1989.

- STEINBERG, S.I.; BAVEL, C.H.M.van; McFARLAND, M.J. Improved sap flow gauge for woody and herbaceous plants, **Agronomy Journal**, v.82, p.851-854, 1990b.
- STEINBERG, S.L.; McFARLAND, M.J.; WORTHINGTON, J.W. Comparison of trunk and branch sap flow with canopy transpiration in pecan. **Journal of Experimental Botany**, v.41, n.227, p.653-659, June, 1990a.
- 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.
- SYVERTSEN, J.P. Minimum leaf water potential and stomatal closure in citrus leaves of different ages. **Annual Botany**. v49, p. 827-834, 1982.
- SYVERTSEN, J.P.; LLOYD, J.J. Citrus. In: SCHAFFER, B.; ANDERSEN, P.C. (Ed). **Handbook of environmental physiology of fruit crops volume II: sub-tropical and tropical crops**. Boca Raton: CRC Press, 1994. cap.4 , p.65-101.
- TRAMBOUZE, W.; VOLTZ, M. Measurement and modelling of the transpiration of a mediterranean vineyard. **Agricultural and Forest Meteorology**, v.107, p.153-166, 2001.
- TREJO-CHANDIA, J.E., ANGELOCCI, L.R., OLIVEIRA, R.F. Aplicação do método de balanço de calor na determinação da transpiração de mudas de limoeiro. **Scientia Agricola**, v.54, n.3, p.221-231, 1997.
- TURNER, N. C. Measurement and influence of environmental and plant factors on stomatal conductance in the field. **Agricultural and Forest Meteorology**, v.54, p.137-154, 1991.

- VALANCOGNE, C.; DAYAU, S.; AMEGLIO, T.; ARCHER, P.; DAUDET, F.A.; GAMA, M.I.F.; COHEN, M. Relations between relative transpiration and predawn leaf water potential in different fruit tree species. **Acta horticulturae**, v.2, n.449, p.423-429, 1996.
- VALANCOGNE, C.; NASR, Z. A heat balance method for measuring sap flow in small trees. In: BORGHETTI, M., GRACE, J., RASCHI, A. **Water transport in plants under climatic stress**. Cambridge: Cambridge University Press, p.166-173, 1993.
- VALANCOGNE, C.; NASR, Z. Measuring sap flow in the stem of small trees by a heat balance method. **Hortscience**, v.24, n.2, p.383-385, 1989.
- VALANCOGNE, C.; FERREIRA, M.I.; SILVESTRE, J.; ANGELOCCI, L.R. Influence of orchard and vineyard characteristics on maximal plant transpiration. **Acta Horticultural**, v. 537, p. 61-68, Oct. 2000.
- VAN BAVEL, M.G. **Flow32tm installation and operation manual version 2.11 software**. Houston: Dynamax , 1994.
- VIEIRA, D.B.; RIBEIRO, T.A.P. Estudo de parâmetros básicos de irrigação do limão Tahiti (*Citrus limonia*. Osbeck) sob microaspersão. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 22, Ilhéus, 1993. **Anais**. Ilhéus: Sociedade Brasileira de Engenharia Agrícola, 1993. p.2329-2338.
- VILLA NOVA, N.A.; ANGELOCCI, L.R.; VALANCOGNE, C.; PEREIRA, A.R.; SENTELHAS, P.C. Estimativa da transpiração máxima de macieiras em pomares irrigados pelo método da advecção-aridez adaptado. (compact disc) In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, 11, 1999, **Anais**. Florianópolis: SBA, 1999. (CD-Rom).

VISWANADHAM, Y.; SILVA FILHO, V.P.; ANDRE, R.G.B. The Priestley-Taylor parameter α for the Amazon forest. **Forest Ecology and Management**, v.38, P.211-225, 1991.

WEIBEL, F.; BOERSMA, K. An improved stem heat balance method. **Agricultural and Forest Meteorology**, v.75, p.191-208, 1995.

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

WILSON, R.G.; ROUSE, W.R. Moisture and temperature limits of the equilibrium evapotranspiration model. **Journal of Applied Meteorology**, v.11, p.436-442, 1972.

WRIGHT, J. L. Using weighing lysimeters to develop evapotranspiration crop coefficients. In: ALLEN, R. G.; HOWELL, T. A.; PRUITT, W. O. et al. (Ed.) **Lysimeter for Evapotranspiration and Environmental Measurements**. New York: American Society of Civil Engineers, 1991. p. 191-199.

ZHANG, H.; SIMMONDS, L.P.; MORISON, J.I.L.; PAYNE, D. Estimation of transpiration by single trees: comparison of sap flow measurements with a combination equation. **Agricultural and Forest Meteorology**, v.87, p.155-169, 1997.