**Universidade de São Paulo
Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”**

**Irrigação plena e com déficit em pimenta cv. Tabasco em ambiente
protegido**

Lígia Borges Marinho

Tese apresentada para obtenção do título de Doutor em
Ciências. Área de concentração: Irrigação e Drenagem

**Piracicaba
2011**

Lígia Borges Marinho
Engenheiro Agrônomo

Irrigação plena e com déficit em pimenta cv. Tabasco em ambiente protegido

Orientador:
Prof. Dr. **JOSÉ ANTONIO FRIZZONE**

Tese apresentada para obtenção do título de Doutor em
Ciências. Área de concentração: Irrigação e Drenagem

Piracicaba
2011

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
DIVISÃO DE BIBLIOTECA - ESALQ/USP**

Marinho, Lúgia Borges
Irrigação plena e com déficit em pimenta cv. Tabasco em ambiente protegido /
Lúgia Borges Marinho. - - Piracicaba, 2011.
102 p. : il.

Tese (Doutorado) - - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", 2011.

1. Absorção de água pelas plantas 2. Balanço hídrico 3. Crescimento vegetal
4. Cultivo protegido 5. Irrigação 6. Pimenta 7. Transpiração vegetal I. Título

CDD 631.7
M338i

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

*Aos meus pais Raimundo Soares Marinho (em memória) e Maria Izabel Borges Marinho
As minhas irmãs Leiliane Borges Marinho Carvalho e Ligiany Borges Marinho*

A minha sobrinha Isabela Marinho Moreira

Aos meus tios Maria da Glória da Silva Elpídio e Sérgio Rubens Menezes de Elpídio.

Aos cunhados Uellinton Moreira de Carvalho e Ricardo Valério Ribeiro Moreira

Ofereço com amor

A minha sobrinha, a estrela “Victória Beatriz” (em memória).

Dedico com carinho

AGRADECIMENTOS

Ao bom Deus que fez todas as coisas e o Tempo para tudo que há abaixo do céu.

À Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” - USP, especialmente ao Programa de Pós-Graduação em Irrigação e Drenagem, pela oportunidade de continuar a minha formação profissional.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior pela concessão da bolsa de estudos.

Ao Ministério da Ciência e Tecnologia (MCT), ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), pelo apoio financeiro a esta pesquisa, através do Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia em Engenharia da Irrigação (INCTEI).

Ao amigo Prof. José Antonio Frizzone “agradeço pela confiança, orientação, conhecimentos partilhados e, principalmente, conselhos e exemplo de conduta profissional”.

A Dr. José Monteiro Soares, Ênio Farias, Mário Rolim e Lindete Mírian pelo grande incentivo no período de seleção do doutorado.

Aos Professores: Marcos Vinícius Folegatti, Tarlei Arriel Botrel, Paulo Leonel Libardi, Luiz Angelocci, Sérgio Moraes, Rubens Duarte Coelho, Sérgio Nascimento Duarte, Jarbas Honório de Miranda, Iran José da Silva, pelos ensinamentos.

A João Batista Tolentino Jr. pela amizade, companheirismo e valiosa participação no trabalho de tese.

A Lucas Vellame pela oportunidade de tê-lo como amigo e colaborador na pesquisa.

À amiga Janaína Paulino pela fraternidade e grande ajuda na pesquisa.

Aos amigos: Cornélio Zolin, Danílton Flumignan, Francisco Villaça, Pedro Giongo, Adriana Terri (Unesp), Eusímio Fraga, Jussálvia Pimentel pela grandiosa ajuda durante o experimento e excelentes momentos vividos em Piracicaba-SP.

Aos colaboradores Diego Bortoloti e os meninos do GPID, em especial a Felipe, ao trabalhador João, e às meninas Mírian, Andrea, Manoela, e ao Daniel Veloso pela ajuda na pesquisa.

Aos funcionários do Departamento de Engenharia de Biossistemas em especial: Sr. Antônio, Davilmar, Gilmar, Hélio, Osvaldo, Luis, Sandra, Beatriz, Áureo, pelo grande apoio no desenvolvimento da pesquisa.

Aos colegas e amigos: Acácio, Aérica, Andréa Irigoyen, Aderbal (Cena), Adriano, Allan, Alexssandro, Antônio, Basalto, Carlos, César, Cícero, Cornélio, Danilton, Daniele, Daniel Veloso, Daniel Soares, Dinara, Everaldo, Eusímio, Francisco, Fernando, Janaína, João Tolentino, João Lelis, Jorge, Jéferson, Jussálvia, Kelly, Lucas Vellame e Nita, Marinaldo, Pedro Róbinson, Pedro Giongo, Rafael Maschio, Renato, Ricardo, Róbson, Rochane, Ronaldo, Sérgio, Vanessa, pelas discussões acadêmicas enriquecedoras e bons momentos compartilhados durante o curso de doutorado.

À amiga Aérica Cirqueira Nazareno pela convivência diária em casa e apoio nos difíceis e bons momentos vividos durante o doutorado.

À Amerivan Nazareno pela amizade e convivência em casa.

Ao amigo Magnus Deon pelo acolhimento na fase inicial em Piracicaba.

Aos professores Kátia Siqueira e Calor Alberto Aragão, meus orientadores da iniciação científica, e ao professor José Júlio Vilar Rodrigues, orientador do mestrado os quais me incentivaram a seguir na pesquisa.

Aos meus familiares pela compreensão pela minha ausência ao convívio.

SUMÁRIO

RESUMO.....	11
ABSTRACT	13
LISTA DE FIGURAS.....	15
LISTA DE TABELAS	19
1 INTRODUÇÃO	21
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	23
2.1 A cultura da pimenta ‘Tabasco’ (<i>Capsicum frutescens</i>).....	23
2.2 Manejo da irrigação	25
2.3 Irrigação com déficit e indicadores de estresse hídrico na pimenteira	28
2.4 Transpiração das plantas	32
3 MATERIAL E MÉTODOS	35
3.1 Caracterização do experimento.....	35
3.2 Produção de mudas, transplântio e condução da cultura.....	39
3.3 Delineamento experimental e irrigação	41
3.4 Lisímetros	42
3.5 Sistema de Irrigação.....	42
3.6 Medidas meteorológicas.....	43
3.7 Monitoramento do déficit hídrico no solo	43
3.8 Parâmetros avaliados na planta	43
3.8.1 Crescimento da planta.....	43
3.8.2 Abscisão de flores	44
3.8.3 Potencial da água na folha	44
3.8.4 Temperatura da folha	45
3.8.5 Variáveis de produção e qualidade de frutos	45

3.9 A eficiência de uso de água.....	45
3.10 Transpiração na pimenteira após nova irrigação	46
3.10.1 Calibração das sondas de dissipação térmica ‘Granier’ e determinação de fluxo de seiva	46
3.10.1.1 Princípio de funcionamento, construção e instalação de sondas de dissipação térmica.....	46
3.10.1.2 Gradientes térmicos naturais	49
3.10.1.3 Área da seção condutora.....	50
3.10.1.4 Calibração.....	52
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	53
4.1 Calibração e teste dos lisímetros de pesagem	53
4.2 Evapotranspiração da pimenteira	55
4.3 Irrigação.....	56
4.3.1 Volume de água aplicado	56
4.3.2 Monitoramento do potencial mátrico do solo	57
4.4 Características da cultura	59
4.4.1 Duração do ciclo fenológico.....	59
4.4.2 Índices de estresse na planta	59
4.4.2.1 Altura, diâmetro de caule e a área foliar da planta.....	59
4.4.2.2 Potencial da água e temperatura da folha	64
4.4.3 Parâmetros relacionados ao rendimento da cultura.....	69
4.4.3.1 Massa média de frutos por planta.....	69
4.4.3.2 Número médio de frutos por planta.....	70
4.4.3.3 Abscisão total de flores.....	72
4.4.3.4 Produção total de frutos por planta.....	74
4.4.3.5 Sazonalidade da produção	75

4.4.4 Qualidade física da pimenta ‘Tabasco’	79
4.4.5 Eficiência de uso de água	80
4.4.6 Calibração e determinação de fluxo de seiva por sondas de dissipação térmica...	81
4.4.6.1 Gradientes térmicos naturais.....	81
4.4.6.2 Área da secção condutora do caule e posicionamento do sensor	83
4.4.6.3 Calibração de sonda Granier para pimenta ‘Tabasco’	85
4.4.7 Fluxo de seiva de pimenteira ‘Tabasco’ após nova irrigação	89
5 CONCLUSÕES	93
REFERÊNCIAS	95

RESUMO

Irrigação plena e com déficit em pimenta cv. Tabasco em ambiente protegido

O déficit de irrigação tem sido utilizado como uma das mais vantajosas estratégias de economia de água, redução dos custos com irrigação e custo de oportunidade de água. O objetivo principal deste trabalho foi avaliar o efeito da irrigação plena e com déficits em duas épocas distintas, no crescimento da planta, nas relações hídricas e parâmetros de produção e qualidade da pimenta cv. Tabasco (*Capsicum frutescens*). Como objetivo secundário avaliar o método da sonda de dissipação térmica (SDT) na estimativa da transpiração da pimenta 'Tabasco'. O experimento foi desenvolvido em ambiente protegido, no Departamento de Engenharia de Biosistemas na Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz" – ESALQ-USP, em Piracicaba-SP, de setembro de 2009 a agosto de 2010. O delineamento foi em blocos casualizados, com quatro repetições, lâminas de irrigação de 40, 60, 80 e 100% da evapotranspiração da cultura (Etc), inicializadas aos 39 dias após o transplante - DAT (E1) e aos 59 DAT (E2). Aferiu-se a altura da planta (AP) e o comprimento de fruto (CF), o diâmetro do fruto (DF) e do caule da planta (DCP). Mediu-se a temperatura da folha aos 176 DAT, com termômetro de infravermelho e o potencial da água na folha antes do amanhecer Ψ_{falv} , aos 59, 96 e 110 DAT, com câmara de pressão. O número de frutos (NF), a massa fresca de frutos por planta (MMFP) e a massa total de frutos por planta (MTFP) foram quantificados. Calculou-se a taxa de incremento de crescimento (TMICP) e do diâmetro do caule da planta (TMIDCP). Os dados foram submetidos à análise de variância para testar a significância das lâminas de irrigação (plena e com restrição) diferenciadas na E1 e E2 e, quando significativo, determinou-se a tendência por meio de análise de regressão. Foram instaladas sondas de dissipação térmica - SDT em 29 plantas com 8 meses de idade. A equação para estimativa do fluxo de seiva foi calibrada tendo como padrão medidas lisimétricas em uma planta. Os volumes de irrigação totais aplicados variaram de 160 (E1L40) a 362 L planta⁻¹ (L100), num ciclo de 208 DAT. Houve efeito significativo da irrigação plena e com déficit aplicado a partir da fase vegetativa e de floração sobre a AP, DCP, TMICP, TMIDCP, $\Psi_{\text{folha antes do amanhecer}}$, temperatura média da folha, NFP, sendo o modelo linear o que melhor se ajustou. A MMFP não variou com o déficit, nem com as épocas de inicialização. O déficit de irrigação 40% Etc imposto na E2 permitiu economia de até 49,8% de água no ciclo de 208 DAT. O déficit de irrigação afetou a produção da pimenta, mas o mesmo não foi observado para a sua qualidade física. Há maior influência do déficit de irrigação na relação hídrica da pimenteira quando aplicado a partir da fase de floração. O método da SDT, com ajuste da calibração original, correção das diferenças térmicas naturais e uma correta amostragem na determinação da área do xilema, é eficaz na avaliação da transpiração de pimenta Tabasco.

Palavras-chave: *Capsicum frutescens*; Restrição de irrigação; Estresse hídrico; Sonda de dissipação de calor

ABSTRACT

Full and deficit irrigation on pepper cv. Tabasco under greenhouse

The deficit irrigation has been used as one of the most advantageous strategies for saving water, reducing costs with irrigation and the opportunity cost of water. The main objective of this study was to evaluate the effect of full irrigation and with deficits in two different periods in plant growth, water relations, production parameters and quality of pepper cv. Tabasco (*Capsicum frutescens*). As a secondary objective method to evaluate the thermal dissipation probe (SDT) in the estimation of transpiration pepper 'Tabasco'. The experiment was conducted in a greenhouse at the Biosystems Engineering Department at the Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz" - ESALQ-USP, Piracicaba-SP, from September 2009 to August 2010. The experiment was conducted as randomized block design with four replications and irrigation levels of 40, 60, 80 and 100% of crop evapotranspiration (Etc), beginning 39 days after transplanting - DAT (E1) and 59 DAT (E2). The plant height (PH), fruit length (FL), fruit diameter (FD) and the stem diameter (SD) were measured. Leaf temperature was measured upon 176 DAT, with infrared thermometer, also the pre-dawn leaf water $\Psi_{f \text{ pre-dawn}}$, at 59, 96 and 110 DAT, pressure chamber was measured. The fruit number (FN), average mass fruit per plant (AMFP) and the total mass of fruits per plant were (TMFP) are quantified. The rate growth increment (RGI) and the plant stem diameter (PSD), considering the current and previous evaluation were calculated. Data were subjected to analysis of variance to test the significance of irrigation (full and restricted) differentiated in E1 and E2, and when significant, the trend was determined by regression analysis. A heat dissipation probe - HDP were installed in 29 plants 8 months old. The equation to estimate the sap flow was calibrated using a lysimeter as a standard measure in a plant. The total volume of irrigation applied ranged from 160 (E1L40) to 362 L plant⁻¹ (L100), in a cycle of 208 days from transplanting. There was a significant deficit and full irrigation started at vegetative stage and flowering on the PH, SD, RGI, PSD, $\Psi_{f \text{ pre-dawn}}$, average leaf temperature, FN been the linear model that best fitted. The average fruit plant mass did not vary with deficit neither with beginning time. The deficit irrigation 40% Etc in E2 allowed savings of up to 49.8% water consumption in a cycle 208 DAT. The deficit irrigation affected the pepper production which was not observed for the physical quality of the fruits. There is greater influence of deficit irrigation on pepper water relation when applied from the flowering stage. It can be concluded the method of HDP, adjusting the original calibration, correction of the natural thermal differences and a correct sampling in determining the area of the xylem, is effective in evaluating the transpiration of pepper Tabasco.

Keywords: *Capsicum frutescens*; Irrigation restrict; Water stress; Heat dissipation probe

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Desenho esquemático relativo à distribuição dos tratamentos na área experimental, em ambiente protegido, Piracicaba-SP.	36
Figura 2 - Lisímetros de pesagem em ambiente protegido e detalhe da plataforma lisimétrica, Piracicaba-SP.	36
Figura 3 - Inserção de plásticos às margens dos canteiros para controle do fluxo de água entre as parcelas e entre as linhas.	37
Figura 4 - Vista da área experimental com as plantas em diversos estádios de crescimento.	37
Figura 5 - Esquema de medição do sensor de dissipação térmica (Fonte:Delgado-Rojas, 2003).	47
Figura 6 - Diagrama eletrônico da fonte de corrente constante ajustável (Fonte:Vellame, 2011).	47
Figura 7 - Procedimento de instalação de sondas de dissipação térmica em pimenteira 'Tabasco', furos no caule (A) inserção da cápsula de aço inox na planta (B), revestimento com pasta térmica (C) inserção das sondas na cápsula (D) aplicação de silicone (E) e teste das sondas.	48
Figura 8 - Corte transversal de caule de pimenta 'Tabasco'.	50
Figura 9 - Detalhe do posicionamento da sonda em relação à seção do caule.	51
Figura 10 - Análise de regressão da calibração dos lisímetros 100 kg e 250 kg, relação variação de massa e diferença de potencial (DDP).	53
Figura 11 - Variação da massa do conjunto lisimétrico, a) em um dia com (78 dias após transplântio –DAT) e b) sem irrigação (81DAT).	54
Figura 12 - Evapotranspiração da pimenteira (ET _c) medida com lisímetros de pesagem de 100 e 250 kg e Radiação Solar global, aos 71 -73 dias após transplântio-DAT.	55
Figura 13 - Variação da evapotranspiração da pimenta (ET _c), Piracicaba-SP.	55
Figura 14 – Potencial mátrico, em função das lâminas e épocas de diferenciação, em pimenta 'Tabasco'.	58

Figura 15 - A taxa média de crescimento da planta – TMCP e Altura da planta - AP, aos 98 DAT, em função das lâminas e das épocas de diferenciação das lâminas de irrigação em pimenta ‘Tabasco’, em ambiente protegido.....	60
Figura 16 - A taxa média de incremento de diâmetro da lanta – TMIDP e o diâmetro do caule da planta (DCP), aos 194 DAT, e, em função das lâminas e das épocas de diferenciação das lâminas de irrigação em pimenta ‘Tabasco’, em ambiente protegido.	62
Figura 17 - Potencial da água na folha, ao alvorecer, (96 e 110 DAT) e potencial médio da água na folha, em função das lâminas e das épocas de diferenciação das lâminas de irrigação.	66
Figura 18 - Temperatura da folha de pimenteira ‘Tabasco’, aos 176 DAT, sob irrigação plena e com déficit.	67
Figura 19 – Massa médio de frutos (MMF), em função das lâminas e das épocas de diferenciação das lâminas de irrigação em pimenta ‘Tabasco’, em ambiente protegido.	70
Figura 20 - Número médio de frutos por planta (NMFP), em função das lâminas e das épocas de diferenciação das lâminas de irrigação em pimenta ‘Tabasco’, em ambiente protegido.	72
Figura 21 - Abscissão total de flores de pimenteira ‘Tabasco’, em função das lâminas de irrigação diferenciadas a partir da fase vegetativa (E1) e da fase floração-frutificação (E2).	73
Figura 22 - Temperatura máxima diurna e noturna no interior do ambiente protegido, no período de avaliação (88 aos 116 DAT) da abscissão das flores da pimenta ‘Tabasco’.....	73
Figura 23 - Produção total de frutos por planta (PTFP), em função das lâminas e das épocas de diferenciação das lâminas de irrigação em pimenta ‘Tabasco’, em ambiente protegido.	75
Figura 24 – Produção precoce, intermediária e tardia de pimenta ‘Tabasco’ em função das lâminas de irrigação diferenciadas na fase vegetativa (E1) e de floração (E2).	78

Figura 25 - Comprimento (CF), e diâmetro de frutos (DF), em função das lâminas e das épocas de diferenciação das lâminas de irrigação em pimenta 'Tabasco', em ambiente protegido.....	80
Figura 26 - Relação entre o fluxo de seiva médio diário do período (FS) para cada planta com e sem compensação das diferenças térmicas naturais do caule – DTN (A). Relação entre a transpiração medida pelo lisímetro e fluxo de seiva diário acumulado com e sem compensação das DTN (B).....	82
Figura 27- Área da seção condutora de seiva bruta (AS) em função do perímetro externo do caule da pimenteira cv. Tabasco.	83
Figura 28 - Erro percentual na relação entre área condutora estimada e medida (ASest/ASmed) em função do % de caules amostrados.	84
Figura 29 - Coeficiente de variação das medidas diárias de fluxo de seiva com e sem correção do efeito do posicionamento da sonda.	85
Figura 30 - Curso da radiação solar e transpiração - lisimetria, fluxo de seiva - sonda de dissipação térmica (SDT) de pimenta tabasco a partir dos 250 DAT a 253 DAT (01 e 04/08/2010), a cada 15 minutos e hora, considerando validas apenas as leituras das 6 as 19 horas.....	86
Figura 31 - Relação entre o fluxo de seiva por equação de Granier calibrada, a cada 15 minutos e a cada hora (B), no período de 25/07 a 04/08/2010.....	87
Figura 32 - Relação entre o fluxo de seiva com e sem correção de diferenças térmicas naturais e evapotranspiração de referência por Penman-Monteith, em escala diária.....	88
Figura 33 - Relação entre medidas de transpiração efetuadas com lisímetro e fluxo de seiva acumulado diário pela sonda de dissipação térmica.	89
Figura 34 – Fluxo de seiva em função das lâminas aplicadas nas épocas 1 e 2, no ciclo de produção anterior e 14º dia após a nova irrigação.....	90
Figura 35 - Variação horária de fluxo de seiva de pimenteiros em função das lâminas aplicadas nas épocas 1 e 2, no ciclo de produção anterior e 14º dia após a nova irrigação, em ambiente protegido, Piracicaba-SP.....	91

Figura 36 - Variação horária de fluxo de seiva de pimenteiros em função das lâminas aplicadas nas épocas 1 e 2, no ciclo de produção anterior e 14^o dia após a nova irrigação, em ambiente protegido, Piracicaba-SP. 92

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Análise físico-hídrica do solo utilizado no experimento.	38
Tabela 2 - Análise de fertilidade do solo, Piracicaba-SP, 2009.	39
Tabela 3 - Adubação aplicada na fundação, 10 dias antes do transplântio, e em cobertura, parcelada em 5 vezes, para a pimenta Tabasco.	40
Tabela 4 - Pulverizações para prevenção e controle de enfermidades na pimenta 'Tabasco'.	41
Tabela 5 - Volume de água total aplicado na irrigação no ciclo fenológico da pimenta 'Tabasco', em ambiente protegido, Piracicaba-SP.	56
Tabela 6 – Área foliar em função das lâminas e épocas de diferenciação destas, em pimenta 'Tabasco', ambiente protegido, Piracicaba-SP.	63
Tabela 7 - Valores de $Pr> t $ para temperatura da folha e equações de regressão linear em função das lâminas de irrigação diferenciadas nas épocas 1 e 2, aos 176 DAT.	69
Tabela 8 - Equação da regressão linear para relação entre a diferença da temperatura média da folha e do ($T_f - T_{ar}$), nos horários das 13:00 às 17:00 horas, e o déficit de pressão de vapor, aos 176 DAT da pimenteira 'Tabasco', sob irrigação plena e com déficit.	69
Tabela 9 - Eficiência de uso de água em função das lâminas de irrigação diferenciadas na fase vegetativa (E1) e de floração (E2), em pimenta 'Tabasco', ambiente protegido, Piracicaba-SP.	81

1 INTRODUÇÃO

A agricultura irrigada e a utilização de insumos agrícolas, que outrora foram idealizados para permitir a produção de alimentos suficientes para alimentar a população, cada dia mais crescente, hoje causam problemas devido à sua má utilização.

A poluição da água, sua escassez e a dificuldade de acesso têm contribuído para o incremento da competitividade entre os diferentes setores demandantes da água. Em áreas onde há períodos de estiagem, elevado custo de utilização de água e de energia e dificuldade de acesso à água, se faz necessário a adoção de estratégias que visem alcançar a sustentabilidade da agricultura irrigada. Em decorrência destas circunstâncias, o déficit de irrigação tem sido utilizado como uma das mais vantajosas estratégias de economia de água, redução dos custos fixos e variáveis da irrigação.

Entretanto, as irrigações deficitárias podem estar associadas a um maior risco de perdas, por reduzir a produtividade e tornar a atividade agrícola altamente susceptível a problemas inesperados nos equipamentos ou à ocorrência de condições climáticas adversas, uma vez que se aplica água em quantidades menores que a evapotranspiração da cultura.

As culturas demandam água em diferentes quantidades ao longo do ciclo fenológico e, em condições de baixa disponibilidade de água no solo, vários processos metabólicos podem ser influenciados. Todavia, a adaptabilidade das plantas é influenciada pela duração e magnitude do estresse além da variabilidade genética.

Há relatos de que tanto o déficit quanto o excesso de água durante a floração podem aumentar a queda de flores e frutos novos ou impedir que as flores sejam fertilizadas, influenciando assim negativamente a colheita final.

O mercado de pimentas apresenta grandes perspectivas para o futuro, devido ao aumento da área cultivada e ao estabelecimento de agroindústrias. Essa cultura tem excelentes produções em pequena escala e requer até 15 trabalhadores por hectare na época de colheita. A região sudeste é a segunda região maior produtora brasileira de pimenta, sendo o estado de São Paulo responsável por 28% da produção nacional.

O cultivo de pimenta assim como de outras hortícolas no sudeste brasileiro, diferentemente do nordeste, é realizado em épocas distintas devido às condições

climáticas. Entretanto, o cultivo em ambientes protegidos pode ser uma alternativa, principalmente pelo controle das condições ambientais e diminuição da sazonalidade de oferta dos produtos, o que permite aos produtores aumentar a rentabilidade no mercado de pimentas.

Em ambiente protegido, a modificação da demanda hídrica, o manejo adequado da irrigação das plantas com base nos parâmetros determinados a campo devem ser cuidadosamente adotados. Muitos estudos têm sido realizados no sentido de determinar o requerimento hídrico e o nível de estresse das culturas submetidas ao déficit hídrico. Muitos indicadores de condições hídricas das plantas são utilizados com sucesso.

Dispõe-se de poucas informações na literatura a respeito da influência do déficit hídrico em pimenteiras cultivadas em condições de ambiente protegido, considerando as relações hídricas, crescimento, produção e análise de viabilidade econômica do déficit de irrigação.

Este estudo teve como objetivo principal avaliar o efeito da irrigação plena e com déficits no crescimento vegetativo, nas relações hídricas e parâmetros de produção e qualidade da pimenta cv. Tabasco (*Capsicum frutescens*). Neste caso, os déficits de irrigação foram inicializados em duas épocas distintas (fase vegetativa e de floração). Como objetivo secundário, propôs-se avaliar o método da sonda de dissipação térmica na estimativa da transpiração da pimenta 'Tabasco'.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 A cultura da pimenta 'Tabasco' (*Capsicum frutescens*)

A pimenta *Capsicum frutescens* pertence à família Solanaceae, originária da Bacia Amazônica, cultivada nos Estados Unidos, Colômbia, Venezuela, Costa Rica, Panamá, Honduras, República Dominicana e Brasil.

As pimenteiras possuem sistema radicular pivotante, com número elevado de ramificações laterais, podendo chegar a profundidades de 70-120 cm (CARVALHO; BIANCHETTI, 2007). Segundo Allen et al. (1998), a zona efetiva de raiz da pimenteira encontra-se aos 50 - 100 cm, e sugere que se mantenha a umidade do solo a 30 cm de profundidade, ao utilizar a irrigação. Deve ser cultivada em solos areno-argilosos profundos, leves, drenados, preferencialmente férteis, com pH entre 5,5 e 6,8 (FILGUEIRA, 1982).

A cultura requer temperatura do ar entre 25° e 35°C (KHAN; CHATTHA; SALEEM, 2005), sendo os valores de temperatura média mínima ideal de 18°C, máxima em torno de 35°C e temperaturas acima 35°C prejudiciais a formação dos frutos (CRUZ; MAKISHIMA, 2007).

No Brasil, a produção de pimenta é expressiva, com registro de área colhida de 32.739 ha, em 2007 (FAO, 2009) e os principais estados produtores são Minas Gerais, Goiás, São Paulo, Ceará e Rio Grande do Sul. Na região nordeste a produção de pimenta cv. Tabasco (*Capsicum frutescens* L.) tem bom potencial de melhorar as rendas dos fazendeiros e gerar empregos no meio rural. Essa cultura tem excelentes produções em pequena escala e requerem até 15 trabalhadores por hectare na época de colheita (MIRANDA; GONDIM; COSTA, 2006). A região sudeste é a segunda maior região produtora brasileira de pimenta, sendo o estado de São Paulo responsável por 28% da produção nacional (INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE, 2008).

Em 2004, as pimentas do gênero *Capsicum* se destacaram como importantes produtos do agronegócio brasileiro, com exportações de 8.479 toneladas no valor de US\$ 17.344 mil, um aumento (22,1%) de volume e (43,0%) em valor, comparando-se

ao ano de 2000 (VILELA, 2007). Já em 2009, foram registradas áreas colhidas de 27.280 ha e produção de 65.373 ton (FAO, 2009).

O Ceará tem exportado a pimenta cv. Tabasco em forma de pasta para os Estados Unidos para fabricação do 'Molho Tabasco' (RUFINO; PENTEADO, 2000). As pimentas e pimentões possuem um ingrediente ativo, chamado Capsaicina (8-metil-N-vanillyl-6-nonamida), que tem sido estudado extensivamente, em ser vivo e *in vitro*, no tratamento de câncer de próstata, artrite reumática, enxaqueca, tosse crônica, diabetes, sendo considerado um potente analgésico aumentando dessa maneira as janelas de mercado.

As excelentes condições edafoclimáticas brasileiras têm permitido à pimenteira alcançar grandes produtividades, variando de 10 a 30 t ha⁻¹ (REIFSCHNEIDER; RIBEIRO, 2007). E devido ao aumento da área cultivada e ao estabelecimento de agroindústrias no Brasil, o mercado de pimentas apresenta grandes perspectivas para o futuro. A intensificação dos métodos de produção, incluindo o uso de ambiente protegido, irrigação localizada e fertirrigação podem favorecer o sistema de cultivo das pimenteiros (CHAVES, 2008).

O requerimento hídrico do gênero *Capsicum* varia de 600 a 1250 mm, dependendo do clima, do solo, da variedade e do manejo cultural (DOORENBOS; KASSAM, 2000). Chaves et al. (2005) encontraram valor de 1.083 mm durante o ciclo de 135 dias, em cultivo de pimenta Tabasco, em Pentecoste - CE. Sob condições de ambiente protegido, no sudeste brasileiro (Piracicaba-SP), para esta mesma cultura foram requeridos valores de 459 mm de água, num ciclo de 245 dias (CHAVES, 2008) e de 461 mm, num ciclo de 188 dias (PAULA, 2008).

A irrigação das pimenteiros pode ser realizada por suco, aspersão e localizada, mas a irrigação por gotejamento, teoricamente, parece ser a melhor opção, quando se preconiza a economia de água (AZEVEDO et al., 2005). No Ceará, o sistema de gotejamento tem apresentado vantagens na produção de pimenta, por aplicar água num volume pequeno de área, o que minimiza o aparecimento de doenças na parte aérea e perdas por evaporação, além de permitir a utilização de fertirrigação, o que o torna sistema ainda mais atrativo.

Muitos trabalhos relacionam o cultivo da pimenta irrigada por sistemas de irrigação por gotejamento ou aspersão sob diferentes intervalos de rega. Khan, Chattha e Saleem (2005) afirmaram que intervalos de irrigação bem realizados têm efeito benéfico no balanço de água, na qualidade e produção do fruto. Chaves (2008) verificou que fertirrigação e frequência de irrigação de 1 a 24, a cada três dias, são indicadas para o cultivo de pimenta tabasco, em ambiente protegido, no sudeste.

O manejo da água para a cultura da pimenta é importante durante todo desenvolvimento da planta e influencia o estabelecimento do estande, problemas funcionais na emissão de frutos e na qualidade (SEZEN; YAZAR; EKER, 2006). A irrigação é essencial à produção de pimenta, porque ela é considerada uma das culturas mais susceptíveis ao estresse hídrico na horticultura (DOORENBOS; KASSAM, 2000). Tal sensibilidade tem sido documentada em trabalhos sobre o efeito do estresse hídrico na redução severa da produção (SEZEN; YAZAR; EKER, 2006; GONZALEZ-DUGO; ORGAZ; FERERES, 2008). A floração e o desenvolvimento dos frutos são as fases consideradas as mais sensíveis ao déficit hídrico (KATERJI; MASTRORILLI; HAMDY, 1993). Segundo Jones et al. (2000), o estresse hídrico em pimenta causa queda de frutos, queima de flor e ardor, devendo a água ser mantida entre 65% a 80% da capacidade de campo. Por outro lado, o excesso de umidade no solo na fase de floração pode permitir que grande parte das flores não sejam fertilizadas (DALMAGO et al., 2003).

2.2 Manejo da irrigação

A agricultura irrigada contribuiu para o crescimento da produtividade agrícola nos últimos 50 anos, garantindo alimentos para a população, já que produz 40% dos alimentos 'comodites' e representa 17% das áreas cultivadas (FAO, 2002).

A concorrência por água entre os diversos setores e a agricultura irrigada, localidades onde a quantidade de água da chuva não é suficiente para o suprimento hídrico das culturas, ou a supressão de água num certo período de tempo devido a mudanças climáticas, têm requerido que a agricultura irrigada seja mais eficiente no uso dos recursos hídricos, isto é, alcançado basicamente por estratégias de manejo da irrigação.

O manejo racional da irrigação evita o desperdício dos recursos hídricos, minimiza os impactos ao meio ambiente, além de aumentar a rentabilidade das atividades agrícolas. De acordo com Michelakis, Vouyoukalou e Clapki (1996), o suprimento da água demandada pelas culturas está associado aos padrões de umedecimento do solo estabelecidos pelos sistemas de irrigação concebidos, principalmente daqueles em que a água é aplicada em parte do volume do solo potencialmente explorável pelo sistema radicular, o que pode afetar bastante as taxas de absorção de água e de nutrientes pelas plantas.

A demanda hídrica difere com a cultura, com o estágio fenológico, tipo de solo e local de cultivo entre outros fatores. Geralmente, a demanda hídrica da cultura é representada pelas perdas por evaporação e transpiração.

A transpiração, igual à evaporação direta, depende do aporte de energia, do gradiente de pressão de vapor e da velocidade do vento. Sendo assim, essas variáveis devem ser consideradas na sua determinação. No processo de evaporação devem ser ainda consideradas a superfície e cobertura do solo e a quantidade de água disponível na superfície evaporante.

A transpiração é influenciada por fatores, como: o conteúdo de água no solo e capacidade do solo de conduzir água à zona radicular, salinidade do solo e água de irrigação, e também pelo tipo de vegetação, estágio fenológico, práticas de cultivo e manejo (ALLEN et al., 1998).

A demanda hídrica das culturas em ambiente protegido é menor que a céu aberto, principalmente pela velocidade do vento ser mínima e haver a atenuação da radiação solar direta incidente (KLAR; JADOSKI, 2004). Sob condições de ambiente protegido, a temperatura, umidade relativa do ar, radiação solar e, consequentemente, a transpiração merecem maior atenção (KLAR, 1988 apud PEREIRA, ANGELOCCI, SENTELHAS, 2007).

Segundo Rosenberg et al. (1989), no interior do ambiente protegido a evapotranspiração é em média 60 a 80% daquela que ocorre no ambiente externo. Por haver essa modificação da demanda hídrica atmosférica no interior da estufa, não se recomenda realizar o manejo de irrigação das plantas com base nos parâmetros determinados a campo (DALMAGO et al., 2003). Por isso a determinação da

evapotranspiração é indispensável ao bom manejo da irrigação em cultivo em ambiente protegido, seja de forma direta ou indireta.

A quantificação da necessidade hídrica de culturas no interior do ambiente pode ser obtida por meio de balanço de água no solo com base em medidas de instrumentos (tensiômetros, TDR ou FDR, etc), modelos empíricos baseados em condições climáticas ou medições diretas da evapotranspiração com lisímetros.

Devido à dificuldade de obtenção da evapotranspiração em campo, têm se adotado estimativas de evapotranspiração com base em dados meteorológicos. Várias são as equações empíricas ou semi-empíricas desenvolvidas para este fim. Entretanto, tem sido bastante utilizado, em função de sua praticidade, a determinação da evapotranspiração da cultura (ET_c) pela equação $ET_c = ETo.kc$, em que se multiplica a evapotranspiração de referência (ETo) pelo valor de coeficiente de cultivo (Kc). Contudo, é interessante que os parâmetros meteorológicos sejam obtidos nas proximidades do cultivo, a fim de representar as condições mais reais possíveis.

A utilização de lisímetros de pesagem para a determinação da ET_c tem sido recomendada para fins de pesquisa, por ser um método direto e padrão (ALLEN et al., 1998; MENDONÇA et al., 2003), sendo mais representativo quando são preenchidos corretamente, pois, dessa forma, as camadas de solo no seu interior assemelham-se o máximo possível às camadas de solo da área externa (SILVA, 2003).

Os lisímetros com mecanismos de pesagem por células de carga são os mais modernos (SILVA; FOLEGATTI; MAGGIOTTO, 1999b) e permitem a realização de medidas automatizadas fornecendo resultados mais confiáveis, e possibilitam a obtenção de medidas em escala horária, representando grande vantagem em relação aos demais tipos de lisímetros (ALLEN et al., 1991). No entanto, o uso de lisímetros convencionais de pesagem é limitado pelo alto custo da mão-de-obra especializada na construção e na operação, bem como pelo tamanho, pelos equipamentos especiais e materiais utilizados, devendo-se buscar construir lisímetros de pesagem alternativos, a baixo custo.

2.3 Irrigação com déficit e indicadores de estresse hídrico na pimenteira

O aumento da eficiência de uso de água na agricultura requer integração de áreas multidisciplinares e medidas agronômicas, tais como: a utilização de cobertura morta e materiais anti-transpirantes, irrigação com déficit (DI), molhamento parcial de raízes.

O déficit hídrico ocorre quando a quantidade de água aplicada é menor que a evapotranspiração da cultura, em toda a zona radicular, durante um período particular de crescimento ou durante todo o ciclo, podendo oferecer maior lucro esperado e maior eficiência de uso de água. Todavia, pode estar associado a um maior risco de perdas por reduzir a produtividade e estar altamente susceptível a problemas inesperados nos equipamentos ou ocorrência de condições climáticas adversas (CUENCA, 1989).

Segundo English et al. (1990), o retorno potencial do déficit de irrigação é devido a três fatores: aumento da eficiência de irrigação, redução do custo da irrigação e custo de oportunidade de água. Pois sabe-se que a quantidade de água economizada com irrigação sob restrição economiza água que pode ser usada para irrigar uma área adicional, aumentando a receita líquida da propriedade rural. Muitas pesquisas têm concluído que o déficit de irrigação pode aumentar a receita líquida das fazendas (ENGLISH, 1990; MARTINS; GILLEY; SUPPLA, 1989; FRIZZONE et al., 2001; ALI et al., 2007)

Sabe-se que a água é essencial ao crescimento das células e manutenção da turgescência e sua limitação provoca alterações no comportamento vegetal cuja irreversibilidade depende do genótipo, da duração, da severidade e do estágio de desenvolvimento da cultura (SANTOS; CARLESSO, 1998).

A manutenção do turgor da célula é importante para permitir a continuidade dos processos de crescimento, expansão, divisão celular e fotossíntese, e a possibilidade de adiar a desidratação dos tecidos, podendo os fotoassimilados serem utilizados em períodos posteriores ao ciclo de cultivo (PETRY, 1991). De acordo com Silva et al. (2009), o déficit hídrico interfere na anatomia, morfologia, fisiologia, na absorção e translocação de água e nutrientes, induzindo, nas plantas, modificações bioquímicas (frequentemente acúmulo de açúcares e aminoácidos) e também a desidratação da

planta causa mudanças no particionamento de assimilados, e forma sacarose em grande número de espécies.

Na planta, o déficit hídrico interno é controlado pela capacidade de absorção das raízes e pela redução da transpiração. Quando a transpiração excede a absorção, há o déficit hídrico interno, à noite pode ocorrer a redução ou até a eliminação do déficit (KOZLOWSKI, 1968). Contudo, quando o solo se encontra com baixa disponibilidade de água, não ocorre essa reidratação da planta, o que pode ocasionar ou não reduções na produção e/ou qualidade de frutos.

Segundo a FAO, 2002, quando o déficit de irrigação é aplicado durante a floração, pode aumentar a queda de flores e frutos novos, influenciando negativamente a colheita final.

Pesquisas científicas têm abordado a influência da limitação da irrigação no rendimento das culturas, sendo o número e peso de frutos, diâmetro e comprimento de frutos e a produção, os parâmetros mais frequentemente determinados. González-Dugo, Orgaz e Fereres (2007), em estudo realizado em Córdoba, na Espanha, concluíram que os déficits de irrigação em *Capsicum annum* L. comprimiram a área foliar e a produção da biomassa, além de prejuízos ao rendimento comercial, devendo as pimenteiras ser irrigadas até a colheita, para a máxima produção de pimenta desidratada “paprika”.

Por sua vez, Dorji, Behboudian e Zegbe-Dominguez (2005), na Nova Zelândia, estudaram as relações do déficit hídrico e molhamento parcial de raízes no crescimento, na produção e qualidade de pimentão (*Capsicum annum* L.) e afirmaram serem estratégias viáveis, que promovem economia de água de 50% e melhora na eficiência de uso de água.

Conforme Santos e Carlesso (1998), o déficit hídrico estimula a expansão do sistema radicular para as camadas mais profundas e úmidas do perfil do solo, as plantas sob irrigação plena normalmente apresentam menos adaptação à deficiência hídrica no solo que plantas submetidas a déficit gradual ou a partir do início do ciclo fenológico e a limitação de água no período de pré-florescimento afeta o desenvolvimento das estruturas vegetativas das plantas, diminuindo a capacidade de produção de fitomassa.

Esforços têm sido dirigidos cada vez mais, para determinar como a água se move através do sistema da solo-planta-atmosfera e como o metabolismo da planta é afetado.

De acordo com Jones (2004), métodos baseados em informações do status da água na planta e no solo, e suas relações, são necessários para a programação da irrigação. Boyer (1995) afirma que estes métodos mostram como a água está dirigida a várias partes do sistema da solo-planta de acordo com a diferença no status da água nas partes.

Indícios de estresse hídrico na planta podem ser verificados por: mudanças no crescimento da planta, do diâmetro, de biomassa. Em estudo com plantas de oliveira submetidas a déficit de irrigação observa-se que o crescimento de ramo, expansão do diâmetro do tronco, volume de dossel e a biomassa foram fortemente influenciados pelos níveis de irrigação (GÓMEZ-DEL-CAMPO; LEAL; PEZUELA, 2008; INIESTA et al., 2009, CORREA-TEDESCO; ROUSSEAU; SEARLES, 2010).

A mensuração do potencial mátrico da água no solo tem sido adotada como uma ferramenta importante nos trabalhos relacionados ao manejo da irrigação, mostrando-se como bom indicador de déficit de água no solo.

O potencial mátrico descreve o estado de energia da água no solo e é crítico para as análises de fluxos de água, estimativa do armazenamento de água no solo e para a relação solo-água-planta.

O potencial da água na folha é utilizado como bom indicador de estresse da planta, e nos anos 70 foi considerado como o melhor indicador de estado hídrico da planta (HSIAO, 1973). Entretanto, esse indicador apresenta uma acentuada variação diurna mesmo na ausência de estresse hídrico. O potencial da água na folha cresce rapidamente do nascer do sol ao meio da tarde, quando há boa disponibilidade de água no solo, ou seja, quando o potencial mátrico do solo é baixo. Neste momento a abertura dos estômatos não é mais dependente da radiação solar. Sendo assim, o potencial de água na folha é dependente da umidade do solo (HARDIE; CONSIDINE, 1976; CARLSON et al., 1979).

O potencial da água na folha, antes do amanhecer, ou potencial de base, o qual corresponde à medição feita pela manhã, antes do sol nascer, descreve o estado

hídrico da planta e independe das condições ambientais. Segundo Katerji e Hallaire (1984) apud Bergonci et al. (2000), essa variável reflete o equilíbrio de potencial entre a planta e o solo.

Mesmo considerando que o potencial de base é medido antes da abertura estomática, parece haver um equilíbrio entre o estado hídrico da planta e o do solo e, embora exista relação entre o potencial de base e o potencial da água no solo, esta nem sempre é evidente (BERGONCI; PERREIRA, 2000).

Sob condições de depleção da água do solo, o potencial da água na folha pode apresentar valores variáveis a depender do nível de estresse da planta. De acordo com Katerji e Hallaire (1984) apud Bergonci et al. (2000), o potencial de base depende do estado hídrico do solo, da densidade e da profundidade do sistema radicular. Pois, à medida que o solo seca, a absorção de água pelas raízes é mais difícil, porque aumenta a força de retenção e diminui a disponibilidade de água no solo às plantas.

Existem evidências de que quando as raízes secam por restrição hídrica no solo, elas produzem “sinais químicos” e enviam para as folhas, para que estas providenciem mecanismos de minimização ou superação dos efeitos da secagem no solo, pelo controle estomático, por exemplo, antes que o potencial total ou de turgescência atinjam níveis desfavoráveis (ANGELOCCI, 2002).

O potencial da água na folha, no qual a fotossíntese se torna nula, depende das características adaptativas de cada espécie, do tempo de exposição, da severidade do déficit de água, do estágio fenológico da planta e da possibilidade de aclimação ao estresse. O fechamento estomático pode ocorrer dentro de uma larga faixa de potencial da água na folha, dependendo da espécie (JONES, 1985).

A temperatura do dossel tem sido utilizada como indicador de estresse hídrico desde os anos 60 (BEN-GAL et al., 2009). A temperatura foliar é uma técnica de fácil execução e não destrutiva. Para plantas sob as mesmas condições de demanda atmosférica, mas com diferentes condições de disponibilidade hídrica, podem apresentar temperatura foliar diferenciada, sendo a termometria por infra-vermelho uma das técnicas mais adequadas para essa avaliação, por permitir a determinação a distância, da temperatura de uma superfície, no caso, um dossel vegetativo (ANGELOCCI, 2002).

2.4 Transpiração das plantas

Sabe-se que à medida que a disponibilidade de água no solo decresce, a taxa de transpiração reduz como resultado do ajuste estomático. Esse é um dos importantes mecanismos de defesa que as plantas possuem contra perdas exageradas de água e eventual morte por dessecação (GLENN et al., 2000). As respostas relativas à transpiração das plantas, quando submetidas a estresse hídrico, são bastante dependentes do cultivar e da condição ambiental (CLAVEL et al., 2004).

Visto que, sob condição de irrigação localizada, as perdas por evaporação e drenagem são reduzidas, transpiração é o principal elemento a ser determinado para o manejo de água em pomares (COELHO FILHO, 2002).

Equipamentos como o porômetro são utilizados com frequência em estudos de relação solo-planta-atmosfera, na determinação da transpiração, todavia enfrentam críticas quanto a sua representatividade, tendo em vista as alterações das condições fisiológicas naturais da planta.

Métodos com base em metodologias de fornecimento de calor ao caule têm sido adotados para estimar a transpiração em plantas florestais e fruteiras. Estes pressupõem a equivalência entre o fluxo de seiva no caule e o fluxo transpiratório nas superfícies das folhas e possibilitam acompanhar em curtos intervalos de tempo o funcionamento hídrico das plantas, sem alterações fisiológicas relevantes, durante períodos prolongados, além de permitir automação de suas medidas.

O método de dissipação térmica, desenvolvido por Granier (1985), permite a determinação de densidade de fluxo de seiva no caule, o que possibilita a estimativa de fluxo de seiva. O princípio de funcionamento das sondas de dissipação térmicas se baseiam em sensor composto por: uma sonda aquecida a potência constante, e uma sonda não aquecida (sonda de referência), ambas com termopar (cobre-constantan) inserido internamente.

Segundo Granier (1985), no período de um dia, a máxima diferença de temperatura entre os dois pontos de medida significa que o fluxo de seiva é mínimo ou nulo, enquanto o contrário representa uma taxa máxima de fluxo de seiva através dessa área de transporte.

Este método (STD) implica em definir a área condutora de seiva no caule (área efetiva do xilema) para a estimativa do fluxo de seiva, já que é determinada a densidade de fluxo no local de inserção da sonda, sendo então o fluxo de seiva (FS) calculado considerando a área da secção efetiva do xilema que conduz a seiva bruta (AS).

A área condutora pode ser estimada em função do diâmetro externo do caule. Para isso utiliza-se o método destrutivo com aplicação de corantes em caules e ramos de diversos diâmetros. De posse destes dados, calcula-se a área condutora (AS) em função do diâmetro de caule (D).

Estudos sobre a utilização das sondas de dissipação térmica em plantas herbáceas com área de secção inferior a 4 cm e sob condições de déficit de irrigação são escassos, e a viabilidade de utilização destas pode reduzir os custos de aquisição de câmaras. Segundo Vellame et al. (2007), as sondas possuem simplicidade na construção dos sensores, menor custo e necessidade de um menor número de canais diferenciais de sistemas de aquisição de dados, tornando possível um maior número de coleta de dados, fato que em estudos de relação solo-planta-atmosfera é altamente desejável.

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Caracterização do experimento

O experimento foi conduzido em condições de ambiente protegido (estufas agrícolas cobertas com plástico) no Departamento de Engenharia Biossistemas da Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” – ESALQ- USP, no município de Piracicaba, São Paulo, a 22°42’30” de latitude S, 47°38’00” de longitude W e 580 m de altitude, de setembro de 2009 a julho de 2010. O clima do local é do tipo Cwa, subtropical úmido, conforme classificação de Köppen.

Para o estudo utilizaram-se três estufas agrícolas, tipo arco, com orientação no sentido leste-oeste, com 3,0 m de pé direito, 7,1 m de largura, 17,64 m de comprimento e 4,7 m de altura. Em duas estufas foram distribuídos dois blocos, e em cada bloco oito parcelas de tamanho de 4 m (3,2 m o tamanho do canteiro e 0,8 as bordaduras), com quatro plantas. Entretanto, apenas as duas plantas centrais foram utilizadas como unidades experimentais, sendo as demais consideradas bordaduras (Figura 1). Na outra estufa foram colocados os lisímetros no mesmo espaçamento e com plantas de bordadura (Figura 2).

*Escala em mm.

Figura 1 - Desenho esquemático relativo à distribuição dos tratamentos na área experimental, em ambiente protegido, Piracicaba-SP

Figura 2 - Lisímetros de pesagem em ambiente protegido e detalhe da plataforma lisimétrica, Piracicaba-SP

Para controlar a umidade do solo entre as parcelas e entre as linhas foram inseridos plásticos nas margens dos canteiros até a profundidade de 0,70 m (Figura 3).

Na Figura 4 é apresentada a vista da área experimental com as plantas em diversos estádios de crescimento.

Figura 3 - Inserção de plásticos às margens dos canteiros para controle do fluxo de água entre as parcelas e entre as linhas

Figura 4 - Vista da área experimental com as plantas em diversos estádios de crescimento

Amostras de solo do canteiro foram coletadas nas profundidades de 0-40 cm para a caracterização físico-hídrica e de fertilidade do solo (Tabelas 1 e 2 respectivamente) no Laboratório de Água e Solo do Departamento de Engenharia de Biosistemas e no Laboratório de Química e Fertilidade do Solo do Departamento de Solos e Nutrição de Plantas da Esalq-USP. Ajustou-se a curva de retenção de umidade no solo (eq. 1) pela metodologia proposta por van Genuchten (1980) mediante utilização do programa RETC.

$$\theta(\Psi) = \theta_r + (\theta_s - \theta_r) \left[\frac{1}{(1 + \alpha|\Psi|)^n} \right]^{1 - \frac{1}{n}} \quad (1)$$

em que,

$\theta(\Psi)$ é a umidade volumétrica em $\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$; θ_s e θ_r correspondem às umidades volumétricas na saturação e residual, respectivamente em $\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$ e Ψ é o potencial mátrico de água no solo em kPa; α e n são constantes empíricas que afetam a forma da curva de retenção, sendo α expresso em kPa^{-1} e n adimensional.

Tabela 1 - Análise físico-hídrica do solo utilizado no experimento

Prof.	Fração granulométrica			Classe Textural	Ds	ks
	(%)				($\text{g}.\text{cm}^{-3}$)	($\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$)
Cm	Areia	Silte	Argila			
0-20	39,40	17,70	42,90	Argiloso	1,45	24,06
20-40	41,33	15,50	43,17		1,48	
Umidade ($\text{g}.\text{g}^{-1}$)				Parâmetros curva retenção		
				Ajuste van Genutchen		
	1/3 atm	15 atm	θ_r	θ_s	α	n
0-20	0,239	0,200	0,1890	0,4011	0,1080	1,3606
20-40	0,239	0,196	0,2697	0,5736	0,1055	1,3646

Tabela 2 - Análise de fertilidade do solo, Piracicaba-SP, 2009

Prof.	pH	M.O.	Macronutrientes					SB	CTC	V
			P	K	Ca	Mg	H+Al			
Cm	CaCl ₂	g.dm ⁻³	mg.dm ⁻³				mmol _c dm ⁻³			
0-20	5,5	11	189	3,2	46	9	20	58,2	78,4	74
20-40	5,0	14	48	2,0	32	12	20	46,0	66,2	69
Micronutrientes										
		B		Cu		Fe		Mn		Zn
mg.dm ⁻³										
0-20		0,21		2,5		25		13,4		3,0
20-40		0,14		1,8		23		13,5		1,5

3.2 Produção de mudas, transplântio e condução da cultura

Utilizou-se a cultura da pimenta cv. Tabasco (*Capsicum frutescens*). As mudas foram produzidas com substrato organomineral “Plantimax hortaliças”, semeando-se apenas uma semente por célula, em bandejas de isopor de 128 células por bandeja, no dia 28 de setembro de 2009. A germinação ocorreu aos 11 dias após a semeadura (DAS). O transplântio foi realizado quando as mudas estavam com 4 folhas definitivas aos 67 DAS (05 de dezembro de 2009), em canteiros (0,1 m de altura e 0,3 m de largura), com espaçamento de 1,1 x 0,8 m e nos lisímetros de pesagem.

As pimenteiros foram conduzidas sem poda e tutoradas com fios de arame e fitilho de plástico, com desbrota nas plantas antes da primeira bifurcação, com a finalidade de deixar a planta com estrutura em forma de taça e facilitar a movimentação e os tratos culturais na estufa.

Os diferentes estádios de desenvolvimento foram divididos em quatro fases, conforme foi apresentado pela FAO 56 (ALLEN et al., 1998):

Fase I: desde o momento do transplântio até o ponto em que a cultura alcança aproximadamente 10% do seu desenvolvimento;

Fase II: inicia-se no final da fase I e termina em um ponto imediatamente antes da floração, que corresponde ao intervalo de 70 a 80% da cobertura vegetal;

Fase III: período de floração e frutificação;

Fase IV: período de maturação, compreendida entre o final da fase III e a colheita.

A adubação foi calculada de acordo com a análise de fertilidade do solo (Tabela 2) e exigência da cultura, conforme recomendação de adubação para o estado de São Paulo pelo Boletim Técnico 100 (RAIJ et al., 1997). A adubação de fundação foi executada aos 12 dias antes do transplântio e as adubações de cobertura foram aplicadas via fertirrigação e parceladas em seis vezes para N e cinco para K (Tabela 3).

Realizaram-se tratos fitossanitários periodicamente, com intervalos de 15 a 20 dias, seguindo as recomendações técnicas (EMBRAPA, 2007), por meio de aplicações preventivas e respeitando a carência dos produtos. Todavia, quando ocorreram sintomas de doenças ou pragas, fez-se o controle por meio de pulverizações curativas (Tabela 4).

Tabela 3 - Adubação aplicada na fundação, 10 dias antes do transplântio, e em cobertura, parcelada em 5 vezes, para a pimenta Tabasco

Nutriente	Produto	Adubação fundação	Adubação cobertura
		g.planta ⁻¹	
N	Ureia	7,6	12,6
P	Supersimples	156,2	-
K	Sulfato de potássio	21,1	19,7

Tabela 4 - Pulverizações para prevenção e controle de enfermidades na pimenta 'Tabasco'

Produto nome comercial	nome técnico	Enfermidade	Dosagem	Data (DAT)	Tipo
Actara 250 WG	Tiametoxam	mosca branca	6 g 20L ⁻¹	15 DAT	C
Decis	Deltametrina	lagarta mosca minadora	6 ml 20L ⁻¹	15 DAT	C
Vertimec	Abamectina	nematoide Antracnose ferrugem	10 ml 20L ⁻¹	15 DAT	P
Cuprocarb	oxifloreto de cobre	murcha fitófora Pulgão verde lagarta acaricida	40g 20L ⁻¹	62 DAT	P
Orthene	dimethyl acetylphosphoramidothioate (Acetato)	mosca branca lagarta ácaro	2g.20L ⁻¹	62 DAT	C
Agriatoato	Dimethoate	cochonilha mosca branca	1.5ml.L ⁻¹	116 DAT	P
Óleo de neem		cochonilha mosca branca	50ml 20L ⁻¹	105 DAT	C

As capinas foram executadas a cada quinze dias, visando ao controle de ervas daninhas e um melhor aproveitamento da água pela cultura.

3.3 Delineamento experimental e irrigação

O delineamento experimental utilizado foi em blocos casualizados, com quatro repetições, até o estabelecimento da cultura (39 dias após o transplante). Fizeram-se irrigações a 100% da evapotranspiração da cultura (Etc). Em seguida, diferenciaram-se as lâminas de irrigação, calculadas com base em medidas de lisímetros de pesagem. As lâminas de irrigação corresponderam a 40% (L40), 60% (L60), 80% (L80) e 100% da evapotranspiração da cultura aplicadas em duas épocas distintas: a partir da fase vegetativa (E1), aos 39 dias após transplante (DAT) e na fase de floração (E2), aos 59 DAT.

3.4 Lisímetros

Para a construção dos lisímetros confeccionaram-se plataformas de pesagem com célula de carga (ALFA GL 200 e GL 500), centralizadas entre duas chapas de aço carbono, ligadas a um coletor de dados para leitura e armazenamento. Utilizou-se caixas d'água de polietileno (100 e 250 L), sob plataformas as quais funcionaram como lisímetros de 100 e 250 kg (Figura 2). A calibração dos lisímetros foi realizada aplicando-se massas de solo conhecidas e anotando-se o respectivo sinal elétrico (mV). De posse dos dados da variação da massa e voltagem, ajustou-se uma equação por regressão linear, utilizada para conversão de sinal elétrico em massa. Pela variação de massa dos lisímetros determinou-se em escala horária e diária a evapotranspiração ($L \text{ planta}^{-1} \text{ dia}^{-1}$). Foram desconsiderados os valores negativos de variação de massa, pois representavam as irrigações. Inicialmente, até os 75 DAT foi utilizado o lisímetro 100 kg devido a sua melhor resolução, o que era desejado na fase de desenvolvimento inicial da pimenteira, quando a demanda de água era menor, e, em seguida, utilizou-se o lisímetro 250 kg.

3.5 Sistema de Irrigação

O sistema de irrigação utilizado foi em linha única de gotejadores, com vazão de 2 L. h^{-1} , no entanto foram realizadas adaptações de modo a atender ao esquema de distribuição aleatória dos tratamentos estabelecidos. Após a montagem do sistema, foram realizados testes de uniformidade com coletores em todos os emissores. O coeficiente de uniformidade de Christiansen (CUC) foi calculado pela eq. 2:

$$CUC = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{i=n} |X_i - \bar{X}|}{n \cdot \bar{X}} \quad (2)$$

em que,

n - número de observações;

X_i - volume de água aplicada no i-ésimo ponto sobre a superfície do solo; e

$\bar{X}$ - volume médio aplicado.

Com isso alcançou-se o coeficiente de uniformidade de Christiansen (CUC) do sistema de irrigação de 98,1%.

3.6 Medidas meteorológicas

No ambiente protegido foi realizada a aquisição de dados de temperatura por psicrômetro ventilado e de radiação solar global (LI200X, Licor), interligado a um coletor de dados, tipo CR10X, com leituras realizadas num intervalo de 1 segundo e armazenadas à média de 15 minutos.

A evapotranspiração de referência - ET_{OP-M} (mm dia^{-1}) foi calculada pelo método padrão proposto pelo boletim FAO 56. Como a velocidade do vento no interior da estufa é muito baixa, esse valor foi fixado em $0,5 \text{ m s}^{-1}$. O boletim FAO 56 recomenda que, em geral, a velocidade do vento a 2 m deve ser mantida em um valor mínimo de cerca de $0,5 \text{ m s}^{-1}$, quando utilizado na equação de ET_{OP-M} .

3.7 Monitoramento do déficit hídrico no solo

Foi realizado o monitoramento do potencial mátrico no perfil do solo (Ψ_m) por meio de três baterias de tensiômetros para cada tratamento, nas profundidades de 0-20 e 20-40 cm. As leituras foram realizadas duas a três vezes por semana, sempre antes das irrigações.

3.8 Parâmetros avaliados na planta

3.8.1 Crescimento da planta

Aos 25, 39, 46, 54, 70, 83 e 98 DAT, aferiu-se a altura da planta, com auxílio de trena, a partir do solo até o ápice da planta, avaliando-se 27 plantas (7 tratamentos).

O diâmetro do caule foi determinado a 1 cm do nível do solo com paquímetro digital marca Starret[®], Modelo Série 799, em oito ocasiões (aos 25, 39, 46, 54, 69, 83, 112, 163 DAT), em quatro repetições por tratamento.

Para a altura da planta e diâmetro de caule foram calculados os incrementos ao longo do experimento, considerando a diferença entre a medida atual e anterior.

Foram realizadas aferições de comprimento (C) e largura da folhas (L), nos dias 25, 39, 46, 54, 84 e 116 DAT, com auxílio de uma régua. Utilizaram-se inicialmente 4 plantas por tratamento, e foram determinados o comprimento e a largura de todas as folhas. Posteriormente, devido ao grande número de folhas, foram amostrados C e L de $\frac{1}{4}$ das plantas, e três a duas repetições por tratamento. Para obtenção da área foliar, o produto do comprimento e largura (CxL) foi multiplicado por um fator de correlação (f) o qual foi obtido mediante regressão linear da área de um retângulo (comprimento e largura da folha) e da área foliar determinada em 20 folhas das plantas da bordadura, por um medidor de área foliar modelo LI-3100.

3.8.2 Abscisão de flores

Identificaram-se cinco flores totalmente abertas com similar tempo de desabrochamento de 27 pimenteiras (7 tratamentos), na parte mediana de cada uma das plantas aos 92 DAT. O número de flores abortadas de cada planta foi registrado, em intervalos de sete dias, até o pegamento dos frutos (terceira semana).

3.8.3 Potencial da água na folha

Para obtenção do potencial da água na folha retirou-se uma folha na porção média (folha exposta ao sol) de 27 plantas (7 por tratamento) antes do amanhecer, aos 59 e 96, 110 DAT. As amostras foram acondicionadas e transportadas segundo os critérios relatados no trabalho de Melo et al. (2007), e as aferições de potencial da água na folha foram efetuadas utilizando uma câmara de pressão (Modelo 3005, Soil Moisture Equipment Corporation, Santa Bárbara, CA, EUA).

3.8.4 Temperatura da folha

Aos 175 DAT, aferiu-se a temperatura foliar de folhas maduras da camada superior da planta e expostas ao sol, na direção sul, cerca de 20 cm da folha, em quatro repetições por tratamento (7 tratamentos), com termômetro de infravermelho quick TEMP, ao longo da tarde (nos horários das 13:00, 14:00, 15:00, 16:00 e 17:00).

Calculou-se a diferença de temperatura do ar e da folha para todos os tratamentos, relacionando-a com o déficit de pressão de vapor (DPV).

3.8.5 Variáveis de produção e qualidade de frutos

Em conformidade com a colheita, foram verificados os números e o peso de frutos por planta, comprimento e diâmetro de frutos e peso total de frutos por planta.

Os números de frutos por planta foram obtidos por quantificação direta do total de frutos por plantas em todas as colheitas.

A massa média de frutos por planta foi obtida pela divisão da massa total de frutos dividida pelo número de frutos por planta.

A produção total de frutos ou massa total de frutos por planta foi obtida pela multiplicação da massa total de frutos por tratamento e a quantidade de frutos.

A produção foi classificada como precoce (1^a a 5^a colheita), intermediária (6^a a 10^a colheita) e tardia (11^a a 15^a colheita).

A qualidade das pimentas (comprimento e diâmetro de fruto) foi determinada mediante a aferição com trena e paquímetro.

3.9 A eficiência de uso de água

A eficiência de uso de água, em função da produtividade foi estimada pela razão entre a produção e o volume de água aplicado durante todo o ciclo da cultura.

3.10 Transpiração na pimenteira após nova irrigação

Uma semana após verificar o decréscimo da produção de pimenta (aos 217 DAT) as plantas submetidas à diferenciação hídrica foram irrigadas a 100% Etc, a fim de repor a água no solo à capacidade de campo. Aos 227 DAT foram inseridas sondas de dissipação térmica– SDT (método Granier), em 29 plantas.

Após a inserção das sondas foram determinados os fluxos de seiva durante dez dias, a fim de determinar o estado hídrico destas plantas após a nova irrigação e realizar a calibração da equação de Granier para pimenta cv. Tabasco. As plantas foram podadas para determinação da área da secção condutora no caule.

3.10.1 Calibração das sondas de dissipação térmica ‘Granier’ e determinação de fluxo de seiva

3.10.1.1 Princípio de funcionamento, construção e instalação de sondas de dissipação térmica

Os sensores de dissipação térmica foram confeccionados em conformidade com Granier (1985). Cada sensor foi composto por uma sonda aquecida à potência constante e por outra sonda não aquecida (sonda de referência), ambas possuindo internamente um termopar (Figura 5).

A potência a ser aplicada na sonda superior recomendada na literatura é de 0,1W por centímetro de comprimento da sonda. Foram construídas fontes de corrente ajustável a fim de controlar a potência dissipada em cada sensor (Figura 6). Foram construídas 10 fontes de corrente constante ajustável a fim de controlar a potência dissipada nos 31 sensores.

Figura 5 - Esquema de medição do sensor de dissipação térmica (Fonte:DELGADO-ROJAS, 2003)

Figura 6 - Diagrama eletrônico da fonte de corrente constante ajustável (Fonte:VELLAME, 2011)

As sondas foram construídas com 1 cm de comprimento utilizando-se termopares de cobre-“constantan” de 0,5 mm de diâmetro, inseridos em agulhas de 1,0 mm, preenchidas com resina para fixação. O procedimento de instalação das sondas de dissipação térmica pode ser observado na figura 7.

Figura 7 - Procedimento de instalação de sondas de dissipação térmica em pimenteira 'Tabasco', furos no caule (A) inserção da cápsula de aço inox na planta (B), revestimento com pasta térmica (C) inserção das sondas na cápsula (D) aplicação de silicone (E) e teste das sondas

Para instalação das sondas foram feitos dois furos no caule de diâmetro igual ao da cápsula inserida. A cápsula de aço inox tem comprimento igual ao da sonda e diâmetro interno ligeiramente superior ao da sonda (1,5 mm). As sondas foram revestidas de pasta térmica para uma melhor condução do calor, e inseridas na cápsula. Para garantir uma boa fixação foi aplicado silicone externamente. Após a instalação das sondas, o segmento de caule foi revestido acima e abaixo com papel laminado e colocada, no local do sensor, uma proteção com papel laminado no formato de saia. Esse procedimento minimiza o efeito dos gradientes térmicos naturais, segundo Vellame et al. (2011).

A densidade de fluxo de seiva foi obtida, conforme Granier (1985), pela relação existente entre a densidade de fluxo de seiva (F_d) e a diferença de temperatura (ΔT) entre as duas sondas, conforme eq. 3:

$$Fd = \alpha k^\beta = 118,9.10^{-6} \left(\frac{\Delta T_{máx} - \Delta T}{\Delta T} \right)^{1,231} \quad (3)$$

em que,

Fd - densidade de fluxo de seiva, m s⁻¹;

ΔT - diferença de temperatura entre as duas sondas;

α e β - coeficientes empíricos;

K - constante.

O fluxo de seiva (FS, m³ s⁻¹) é calculado considerando a área da secção efetiva do xilema que conduz a seiva bruta (AS, m²), mediante eq. 4:

$$FS = Fd.AS \quad (4)$$

O fluxo de seiva foi calculado com e sem correção das diferenças térmicas naturais (DTN) pela equação de Granier, calibrada anteriormente em uma das plantas do experimento por meio de medidas lisimétricas (item 3.4).

3.10.1.2 Gradientes térmicos naturais

As DTN foram medidas com as sondas não aquecidas nos dias 20, 21 e 22 de julho de 2010 e correlacionadas com 1 sonda em cada estufa, tomadas como referência, para gerar, por meio de regressão linear, modelos de estimativa para cada segmento de caule monitorado, conforme a eq.(5).

$$DTN_E = a.DTN_{ref} + b \quad (5)$$

em que,

DTN_E – diferença térmica natural estimada para cada sonda, °C;

DTN_{ref} - diferença térmica natural para a sonda de referência, °C, e

a e b - coeficientes empíricos.

A diferença térmica com o sensor aquecido foi corrigida pela eq.(6).

$$\Delta T = \Delta T_m - DTN_E \quad (6)$$

em que,

ΔT - diferença térmica atual corrigida, °C;

ΔT_m - diferença térmica não corrigida medida pela sonda, °C, e

DTN_E - diferença térmica natural estimada para cada sonda, °C.

As medidas de diferenças térmicas foram realizadas a cada 30 segundos e se armazenaram as médias das leituras a cada 15 minutos, em sistema de aquisição e armazenamento de dados ("datalogger" CR10X Campbell SCi.) associado a um multiplexador de canais (AM 1632 Relay Multiplexer, Campbell SCi.), utilizando-se uma planta por estufa (2 plantas).

3.10.1.3 Área da seção condutora

No Laboratório de Anatomia Vegetal da Escola Superior de Agricultura 'Luiz de Queiroz'- Esalq – USP identificou-se a estrutura do caule mediante cortes transversais, com micrótomo de deslize Leica SM 2000R. Em seguida eles foram corados com safranina aquosa 0,25% e azul de astra 1% também em solução aquosa e na sequência realizou-se o registro fotográfico dos mesmos, que podem ser observados na Figura 8.

Figura 8 - Corte transversal de caule de pimenta 'Tabasco'

A utilização do método Granier para a estimativa do fluxo de seiva requer o conhecimento da área da secção condutora no caule. Na maioria dos estudos com o método de Granier, por necessitar da destruição da planta, a determinação da AS fica correlacionada ao diâmetro ou perímetro externo do caule, calibrado geralmente com plantas distintas das utilizadas nas medidas de fluxo de seiva. Neste estudo, todas as plantas utilizadas na medição de FS foram amostradas, para tanto. Após o período de medição, foram podadas logo acima do local de inserção da sonda de dissipação térmica superior. Foram geradas imagens das superfícies cepadas e, com auxílio de software CAD (desenho assistido por computador), determinaram-se as dimensões das regiões presentes no caule. A distinção entre as estruturas (floema, xilema e medula) foi realizada de forma visual (Figura 9). Através desse método foi possível estudar o efeito da estimativa da AS em função do perímetro externo do caule e o posicionamento da sonda em regiões não condutoras de seiva bruta no caule

Figura 9 - Detalhe do posicionamento da sonda em relação à seção do caule

Foi calculada a relação entre a área medida e estimada para todas as plantas e calculado o erro da média dessa relação (E) para diferentes números de amostras (n) pela eq. (7):

$$E = \frac{t\alpha}{\sqrt{n}} \quad (7)$$

em que,

σ - desvio padrão;

t - coeficiente de Student para as 29 medidas a 95% de confiabilidade; e

n – número de amostras.

Foram determinados, pela eq.8, os coeficientes de correção das medidas de densidade de fluxo (k) para cada planta em função do percentual do comprimento de sonda inserido em regiões não condutoras de seiva (A_{NC}).

$$k = \frac{1}{1 - \% A_{NC}} \quad (8)$$

3.10.1.4 Calibração

Para calibrar a equação de estimativa do fluxo de seiva foram efetuadas medidas de transpiração em uma das plantas do lisímetro 2 (item 3.4), o qual, para isso, teve a sua superfície coberta com lona plástica preta, para evitar perdas por evaporação. O coeficiente angular da eq.(3) foi modificado a fim de minimizar os desvios absolutos entre o fluxo de seiva acumulado em 24h e a transpiração diária, medida pelo lisímetro.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Calibração e teste dos lisímetros de pesagem

As equações de calibração dos lisímetros de 100 kg e 250 kg (Figura 10) foram obtidas a partir dos dados de carregamento com massas padrões. O maior coeficiente angular da reta (245,91 kg/mV) da calibração do lisímetro de 250 kg em relação ao lisímetro de 100 kg (98,766 kg/ mV) indica que a sensibilidade do lisímetro de 100 kg é superior, o que pode promover melhores resultados para sua utilização na fase inicial do cultivo da pimenteira, quando as perdas de massa por evapotranspiração são pequenas. Carvalho et al. (2007) obtiveram coeficientes de determinação em duas curvas (carregamento e descarregamento) semelhantes.

Figura 10 - Análise de regressão da calibração dos lisímetros 100 kg e 250 kg, relação variação de massa e diferença de potencial (DDP)

Nas Figuras 11 A e B, podem ser observadas duas variações típicas da massa do lisímetro de pesagem, em que são verificados os componentes do balanço de massa do sistema (evapotranspiração e irrigação). Aos 78 e 81 DAT, verificou-se que, a partir das 9 horas da manhã, foram detectadas mudanças decrescentes de massa no lisímetro de 250 kg. Entretanto, o lisímetro de 100 kg proporcionou menores variações de perdas de água por evapotranspiração devido a sua maior sensibilidade a menores perdas de massa que o conjunto do lisímetro 250 kg, o que pode ser uma vantagem em

relação ao lisímetro de 250 kg para a fase de desenvolvimento inicial da pimenteira, quando as perdas por evapotranspiração são menores.

A variação de ET_c medida em escala horária com o lisímetro de 100 kg respondeu melhor à variação da radiação solar global que o lisímetro de 250 kg, todavia, verificou-se um atraso de cerca de uma hora na resposta deste à RS (Figura 11). Outro fato que deve ser observado é que ambos os lisímetros nos horários de baixa demanda (0 a 6 h) apresentaram aos 72 e 73 DAT, variações que não representam perdas por evapotranspiração, o que devem ser desconsideradas na contabilização da Etc . Não se recomenda a utilização dos dados em escala horária para nenhum dos dois.

Figura 12 - Evapotranspiração da pimenteira (ETc) medida com lisímetros de pesagem de 100 e 250 kg e Radiação Solar global, aos 71 -73 dias após transplantio-DAT

4.2 Evapotranspiração da pimenteira

Os resultados referentes à evapotranspiração da cultura (ETc) encontram-se na Figura 13.

Figura 13 - Variação da evapotranspiração da pimenta (ETc), Piracicaba-SP

Os valores de evapotranspiração da cultura variaram de 0,29 a 4,18 L.planta⁻¹ dia⁻¹. Os níveis mais elevados da ETc ocorreram entre 91 e 152 DAT, período

compreendido entre o pico da floração e o desenvolvimento dos frutos. Chaves (2008) encontrou valores de ETc da pimenta Tabasco variando de 0,28 a 2,42 mm.dia⁻¹, com máxima ETc entre 163 e 181 DAT, em condição de ambiente protegido em Piracicaba-SP. Valores bem superiores de ETc foram observados por Chaves (2005) com a máxima ETc (8,4 mm.dia⁻¹) aos 100 DAT em condições de campo em Pentecostes-CE.

O consumo médio de água durante a condução da cultura foi de aproximadamente de 2 L.planta⁻¹ dia⁻¹. Chaves (2008) verificou ETc média de 1,28 mm.dia⁻¹, num ciclo de 350 dias, em estufa no sudeste. Chaves et al. (2005), trabalhando com esta mesma cultivar, encontraram uma ETc média de 7,4 mm.dia⁻¹ em 135 dias em Pentecostes-CE. Essas variações no consumo de água pela pimenta Tabasco, em termos de ETc, podem ser associadas aos estádios fenológicos da cultura e principalmente às variações meteorológicas.

4.3 Irrigação

4.3.1 Volume de água aplicado

Os volumes de água aplicados durante o cultivo da pimenteira Tabasco estão apresentados na Tabela 5.

Tabela 5 - Volume de água total aplicado na irrigação no ciclo fenológico da pimenta 'Tabasco', em ambiente protegido, Piracicaba-SP.

Época	Lâminas de irrigação (% ETc)			
	40	60	80	100
	Volume de água total (L planta ⁻¹)			
E1	160,58	227,75	294,91	
E2	180,31	240,90	301,49	
Todo ciclo				362,08

Observa-se que os volumes de irrigação totais aplicados variaram de 160 (E1L40) a 362 L planta⁻¹ (L100). Para o gênero *Capsicum* o requerimento hídrico varia de 600 a 1250 mm, todavia, depende do clima, do solo, da variedade e do manejo

cultural (DOORENBOS; KASSAM, 2000). Sob condições de ambiente protegido, no sudeste brasileiro (Piracicaba-SP), para esta mesma cultura, foram requeridos valores de 459 mm, num ciclo de 245 dias (CHAVES, 2008) e de 461 mm, num ciclo de 188 dias (PAULA, 2008).

4.3.2 Monitoramento do potencial mátrico do solo

Os valores de potencial mátrico nas profundidades de 0-20 e 20-40 cm, a partir dos 30 DAT da pimenta Tabasco, em função das diferentes lâminas e épocas de inicialização da diferenciação da irrigação encontram-se na Figura 14.

Houve evolução do potencial mátrico com o desenvolvimento da pimenteira, podendo ser observados valores mais negativos nos tratamentos submetidos a déficit hídrico. Notou-se que as plantas cuja diferenciação da irrigação foi inicializada aos 39 dias chegaram a apresentar valores de potencial mátrico mais negativo que -80 kPa, representadas por linhas interrompidas na figura 14, nos tratamentos L40 e L60, não podendo ser determinados os valores exatos com os tensiômetros, os quais apresentam limitação de funcionalidade a partir de -80 kPa. Contudo, para o experimento foi útil saber que realmente o potencial mátrico chegou a atingir valores tão negativos, estando realmente as plantas submetidas a déficit hídrico no solo a nível crítico.

A diferenciação da lâmina de irrigação a partir do estabelecimento da cultura (E1), proporcionou um déficit acumulado maior que a E2, o que pode ser observado pelo potencial mátrico mais negativo nas camadas do solo de 20 a 40 cm, e, a partir dos 88 DAT, houve uma maior extração de água aos 40 cm, nos tratamentos E1L40, E1L60 e E1L80 em relação aos da E2.

Figura 14 – Potencial mátrico, em função das lâminas e épocas de diferenciação, em pimenta 'Tabasco'

4.4 Características da cultura

4.4.1 Duração do ciclo fenológico

O ciclo fenológico da pimenteira foi de 208 dias após transplântio apresentando-se da seguinte maneira: 0-40 DAT (fase I), 41-59 (fase II), 60-99 DAT (fase III) e 100 - 208 DAT (fase IV). Realizaram-se 15 colheitas iniciadas aos 107 DAT com intervalo de sete dias entre uma colheita e outra. Ciclos fenológicos com duração inferior (188 DAT) e (135 DAT) foram obtidos por Paula (2008) em estudo em ambiente protegido em Piracicaba-SP e por Chaves et al. (2005) em cultivo em campo no nordeste brasileiro. Todavia, ambos justificaram a motivação do encurtamento do ciclo, com necessidade de realização de poda para melhoria da radiação no interior da estufa, decorrente do crescimento demasiado das plantas (PAULA, 2008) e ataques por pássaros (CHAVES et al., 2005). Ciclo fenológico bem superior (350 DAT) foi alcançado em estudo realizado por Chaves (2008) com a mesma pimenta em ambiente protegido, em Piracicaba-SP, sob diferentes frequências de irrigação e fertirrigação.

4.4.2 Índices de estresse na planta

4.4.2.1 Altura, diâmetro de caule e a área foliar da planta

A altura (AP) e taxa de crescimento da planta (TMCP) em função das lâminas de irrigação diferenciadas, a partir da fase vegetativa (E1) e de floração (E2), podem ser observados na figura 15. Os valores de coeficiente de variação (CV) da TMCP e AP foram, em média, de 9 a 11% classificados como baixo, conforme Gomes (1987), demonstrando alta precisão do experimento. As pimenteiras atingiram alturas variando de 137 cm a 160 cm, aos 116 DAT, sendo observada redução de 14% na altura quando comparada à menor e à maior lâmina de irrigação imposta na E1.

A análise de regressão aplicada aos dados de taxa média de crescimento (TMCP) e altura das plantas (AP), aos 98 DAT, indicou que o modelo linear para as lâminas de

irrigação em ambas as épocas de diferenciação da lâmina foi o que melhor se ajustou, mesmo com baixos coeficientes de determinação (Figura 15).

Figura 15 - A taxa média de crescimento da planta – TMCP e Altura da planta - AP, aos 98 DAT, em função das lâminas e das épocas de diferenciação das lâminas de irrigação em pimenta 'Tabasco', em ambiente protegido

Porém, verifica-se que os coeficientes angulares foram semelhantes para E1 e E2, apresentando significância à probabilidade de 3,3 e 6,6% (AP) e de 2,1 e 3,1% (TMCP). Essa diferença se dá pela variabilidade dos dados, sendo efeito da taxa de crescimento de cada planta, conforme sua variabilidade genética.

Resultados obtidos por Rezende et al. (2002) demonstraram que a altura das plantas foram influenciadas pelo volume de água aplicado, apesar de não se

constatarem as tendências e os coeficientes angulares nos gráficos, com diferenças de altura da planta a partir dos 28 DAT.

Verifica-se que a taxa de crescimento da pimenteira foi reduzida quando se reduziram as lâminas de irrigação, no intervalo de lâminas estudado, promovendo menores valores de altura de plantas. Esse resultado é interessante, visto que plantas menores poderão facilitar as práticas culturais necessárias ao cultivo da pimenteira, principalmente no que concerne à colheita.

O diâmetro do caule da planta medido aos 194 DAT e a taxa média de incremento de diâmetro do caule da planta em função das lâminas de irrigação diferenciadas, a partir da fase vegetativa (E1) e de floração (E2), são apresentados na Figura 16. O valor de diâmetro médio do caule da planta variou de 15,5 a 31,2 mm, aos 194 DAT. Valor semelhante (39,15 mm) diâmetro médio do caule da pimenteira 'Tabasco', sob cultivo com água carbonatada, em ambiente protegido em Piracicaba-SP, aos 137 DAT foi obtido por Paula (2008).

Verificaram-se efeitos lineares para as lâminas diferenciadas nas épocas 1 e 2 sobre o diâmetro, aos 194 DAT, e taxa de incremento de diâmetro do caule, sendo os coeficientes significativos ao nível de 1% de probabilidade, pelo teste t. O modelo linear para taxa de incremento do diâmetro do caule da planta e diâmetro do caule aos 194 DAT descreveu bom ajuste e explica 51% das variações totais (TMIDCP), quando a diferenciação da irrigação foi realizada a partir da fase vegetativa (E1) e de floração (E2) e de 48% e 51% das DCP, aos 194 DAT, respectivamente para E1 e E2.

Conforme o modelo linear a que se ajustaram os dados de taxa de incremento de diâmetro do caule, em função das lâminas de irrigação, pode-se verificar que a redução de 50% da lâmina de irrigação aplicada na fase de floração promove maior redução da taxa média de incremento de diâmetro do caule (0,95 mm) e, conseqüentemente, maior redução de conversão de diâmetro de caule, aos 194 DAT, do que quando se realiza a diferenciação da irrigação na fase vegetativa. Estes resultados indicam maior sensibilidade da fase vegetativa (E2) ao déficit de irrigação para estas variáveis.

Tendências sigmoidais para o diâmetro de caule da pimenta cv. Tabasco foram verificadas sob cultivo com água carbonatada, até os 136 DAT, em ambiente protegido, em Piracicaba-SP (PAULA, 2008). Também se verificou incremento do diâmetro do

caule de plantas de pimentão (*Capsicum anuum* L.), pertencente ao mesmo gênero que a pimenta, em função do aumento do volume de água aplicada na irrigação, em cultivo em ambiente protegido, em Piracicaba-SP (REZENDE et al., 2002).

Em geral, os coeficientes de variação foram considerados médios (10 a 20%), segundo Gomes e Garcia (2002). Valores semelhantes de CV foram verificados por Paula (2008) para essa mesma variável aos 61, 78 e 103 DAT.

Figura 16 - A taxa média de incremento de diâmetro da lanta – TMIDP e o diâmetro do caule da planta (DCP), aos 194 DAT, e, em função das lâminas e das épocas de diferenciação das lâminas de irrigação em pimenta ‘Tabasco’, em ambiente protegido

Os valores médios de área foliar da pimenteira submetida à restrição hídrica e irrigação plena podem ser visualizados na Tabela 6.

Tabela 6 – Área foliar em função das lâminas e épocas de diferenciação destas, em pimenta ‘Tabasco’, ambiente protegido, Piracicaba-SP

Época ⁽¹⁾	Lâminas de irrigação (% da ETc)					
	40	60	80	40	60	80
	Área foliar (cm ²)					
	25 DAT			39 DAT		
E1	103,67	57,36	74,77	432,33	352,14	447,79
E2	130,10	124,67	74,01	565,57	563,31	401,68
PLENA	136,15			535,91		
	46 DAT			54 DAT		
	40	60	80	40	60	80
E1	1225,5	639,75	738,83	1472,51	1535,75	2038,81
E2	943,39	940,19	599,96	1932,82	2178,08	1645,77
PLENA	787,50			1661,17		
	84 DAT			116 DAT		
	40	60	80	40	60	80
E1	1621,69	1602,83	1952,93	3073,12	4622,26	5034,35
E2	2256,66	2574,52	2546,82	3612,01	4820,82	3937,76
PLENA	2742,91			4351,21		

⁽¹⁾ Época de diferenciação da irrigação

Não se verificou efeito significativo das lâminas e épocas de diferenciação nos dados de área foliar e nenhuma tendência em função das lâminas de irrigação diferenciadas, a partir da fase vegetativa e de floração, para o intervalo de lâminas estudadas. Aos 25, 39 e 46 DAT verifica-se a que área foliar foi bastante desuniforme, confirmando a variabilidade das plantas, possivelmente devido à propagação por semente, o que ocasionou também diferenças de crescimento da planta (Figura 15) e diâmetro de colo de planta (Figura 16). Essa variabilidade indica que a amostragem pode ter sido pequena, e que todas as folhas das plantas deveriam ter sido medidas, e não apenas ¼ de cada planta como realizado nesta pesquisa.

Observa-se redução de incremento médio de área foliar de até 29% quando a irrigação foi reduzida a 40% ETc a partir da E1, contudo, verifica-se incremento médio absoluto de área foliar (60% ETc, para ambas as épocas de diferenciação) superiores aos obtidos sob irrigação plena.

4.4.2.2 Potencial da água e temperatura da folha

Na figura 17 é apresentado o potencial da água na folha em função da diferenciação das lâminas de irrigação a partir da fase vegetativa (E1) e na fase de floração (E2). Os coeficientes de variação variaram de 11 a 21% para os potenciais da água na folha, aos 96 e 110 DAT. Estes valores são considerados médios conforme Gomes e Garcia (2002).

De acordo com a análise de variância, verifica-se que ocorreu efeito significativo das lâminas sobre o potencial da água na folha, aos 96 e 110 DAT e para o potencial da água na folha médio das plantas. Observou-se tendência linear negativa entre o potencial da água na folha e as lâminas de irrigação para ambas as épocas de diferenciação da irrigação. O potencial da água na folha ao alvorecer torna-se cada vez mais negativo nas datas avaliadas, quando o déficit foi realizado na E2, sendo que a redução de cada 1% da lâmina de irrigação, para o intervalo estudado, acarretou um potencial da folha cada vez mais negativo, passando de - 0,0019 (96 DAT), - 0,0024 (110 DAT) a - 0,0044 MPa (P_{fm}).

Foram verificados maiores coeficientes angulares para o potencial da água na folha, antes do alvorecer, em função das lâminas de irrigação, quando a diferenciação da irrigação ocorreu aos 59 DAT (E2), nas datas avaliadas, exceto aos 68 DAT. Este fato indica que o déficit hídrico acumulado (E1) pode ter permitido que as plantas se adaptassem mais rapidamente à condição de estresse que as plantas que tiveram o déficit hídrico imposto só a partir da fase floração-frutificação (E2). Os valores de coeficiente de determinação para o potencial da água na folha, aos 110 DAT, e potencial médio da água na folha, quando a diferenciação das lâminas ocorreu a partir da fase de floração (E2), indicaram que as variações do potencial da água na folha 61 e 52% foram devidas às variações das lâminas de irrigação.

O potencial de água na folha, antes do alvorecer, atingiu o maior valor: - 0,76 e - 0,77 MPa para os tratamentos E1L40 e E2L40. Resultados semelhantes foram encontrados por Dorji, Behboudian e Zegbe-Dominguez (2005), na Nova Zelândia, nos quais os potenciais da água na folha de pimenta, ao alvorecer, variaram de - 1,0 a - 0,8 MPa no tratamento sob déficit de irrigação a 50% da irrigação plena. Carbonneau et al.

(2004) afirmam que o potencial hídrico de base (antes do alvorecer) pode ser considerado um indicador muito sensível de estresse hídrico, quando o conteúdo de água disponível no solo for inferior a 50%. Segundo Deloire et al. (2004), quando os valores de ψ_b são superiores a - 0,2 MPa, o manejo de água é considerado adequado, uma vez que a ocorrência de estresse hídrico é suave ou nula. Como os valores de potencial da água na folha, ao alvorecer, foram superiores a este, pode-se inferir que as plantas encontravam-se sob estresse moderado a severo, principalmente quando a lâmina foi reduzida a 40 e 60% da ETc (L40 e L60).

Figura 17 - Potencial da água na folha, ao alvorecer, (96 e 110 DAT) e potencial médio da água na folha, em função das lâminas e das épocas de diferenciação das lâminas de irrigação

A temperatura foliar mostrou tendência de aumentar com a diminuição da lâmina de irrigação para ambas as épocas de diferenciação das lâminas, vegetativa (E1) e de floração (E2) (Figura 18). Resultados semelhantes de aumento de temperatura da folha em milho sob estresse hídrico foram encontrados em estudo realizado por Oliveira, Fernandes e Rodrigues (2005), com valores máximos de 38 °C ao meio-dia solar ou 12 e 14 h, respectivamente; verificou-se também estreita relação entre a temperatura da folha e a resistência estomática.

Figura 18 - Temperatura da folha de pimenteira 'Tabasco', aos 176 DAT, sob irrigação plena e com déficit

Houve efeito significativo ($p \leq 0,051$) das lâminas de irrigação apenas na temperatura da folha da pimenteira às 13:00 (E2) e 15:00 (E1) e para T_{mf} (E1 e E2), os

quais podem ser observados na análise de variância (Tabela 7). Verifica-se forte dependência entre (Tf-Ta) e DPV para a pimenteira, para as plantas sob irrigação plena e com restrição hídrica (Tabela 8).

Estes resultados apresentam tendências semelhantes às obtidas para o feijão por IDSO (1981) ($Tf-Ta = -2,35DPV + 2,91$ com $r^2=0,95$) e por Garcia e André (2001) ($Tf-Ta = -3,10 DPV + 2,66$ com $r^2=0,93$). Contudo, para as plantas sob déficit de irrigação, a mudança de um kPa de DPV implica mudança de -9 a -10,6 °C de variação de diferença de Tf-Ta, sendo a temperatura da folha dependente em grande parte do DPV e de outros fatores, tal como a temperatura do ar, consequentemente, pode ocorrer redução da transpiração em maior escala nas plantas sob déficit de irrigação que para a planta sob irrigação plena.

Todavia, sabe-se que, quando o VPD diminui, diminui a demanda evaporativa e as taxas de transpiração, mesmo para as plantas sob irrigação plena (IDSO et al., 1981). Observa-se que a temperatura média da folha foi influenciada pelo déficit de irrigação, sendo que a redução da lâmina de irrigação em 1% da lâmina, no intervalo estudado, aumentou a temperatura da folha em cerca de 0,012 °C e de 0,013 °C, respectivamente. Nas épocas 1 e 2, tendências lineares semelhantes também foram observadas em avaliações realizadas às 13:00 e 15:00 horas, aos 176 DAT.

Mesmo as plantas submetidas a déficit de irrigação, apresentando temperatura da folha maior que a das plantas sob irrigação plena, há indícios de que há capacidade de resfriamento das folhas da pimenteira via transpiração, no intuito de manter a planta protegida das faixas térmicas muito elevadas, por apresentarem temperaturas inferiores à temperatura do ar (no interior do ambiente protegido).

De acordo com Oliveira, Fernandes e Rodrigues (2005), a manutenção da temperatura da folha igual ou ligeiramente inferior à temperatura do ar comprova a capacidade de resfriamento das diversas cultivares ou espécies e é desejável.

Junior, Vieira et al. (2007) verificaram boa relação entre a temperatura da folha e o potencial da água na folha de sorgo e milho, todavia, não observaram repetibilidade e estabilidade suficientes para o emprego da medida de temperatura no monitoramento do status hídrico da planta em cultivo irrigado.

Tabela 7 - Valores de $Pr>|t|$ para temperatura da folha e equações de regressão linear em função das lâminas de irrigação diferenciadas nas épocas 1 e 2, aos 176 DAT

Variável	Regressão	Teste F	$Pr> t $
Época 1			
$T_{f(15:00)}$	22,35-0,0175 Lâmina	2,54	0,0234
T_{mf}	22,43- 0,0130 Lâmina	2,37	0,0324
Época 2			
$T_{f(13:00)}$	25,87-0,0313 Lâmina	2,25	0,2176
T_{mf}	22,34- 0,0123 Lâmina	2,14	0,0506

T_{mf} - Temperatura média da folha; E- época de diferenciação da irrigação; E1- a partir da fase vegetativa; E2- a partir da fase de floração-frutificação.

Tabela 8 - Equação da regressão linear para relação entre a diferença da temperatura média da folha e do ($T_f - T_{ar}$), nos horários das 13:00 às 17:00 horas, e o déficit de pressão de vapor, aos 176 DAT da pimenteira 'Tabasco', sob irrigação plena e com déficit

Trat	Equação	R^2
E1L40	$T_f - T_{ar} = - 10,554 (DPV) + 14,82$	0,934
E1L60	$T_f - T_{ar} = - 10,439 (DPV) + 14,58$	0,831
E1L80	$T_f - T_{ar} = - 10,556 (DPV) + 14,67$	0,931
E2L40	$T_f - T_{ar} = - 10,243 (DPV) + 14,14$	0,776
E2L60	$T_f - T_{ar} = - 9,527 (DPV) + 11,94$	0,876
E2L80	$T_f - T_{ar} = - 10,436 (DPV) + 14,47$	0,952
100	$T_f - T_{ar} = - 11,807 (DPV) + 17,17$	0,952

4.4.3 Parâmetros relacionados ao rendimento da cultura

4.4.3.1 Massa média de frutos por planta

Para as plantas que tiveram diferenciação da irrigação na época 1, os valores de MMFP variaram de 490 a 765 mg. Verifica-se que ocorreu efeito significativo ($p < 0,05$) das lâminas de irrigação sobre a MMFP (E1) (Figura 19).

A análise de regressão aplicada aos dados de MMFP, para a época 1, mostrou que o modelo linear para lâminas de irrigação aplicadas foi o que melhor se ajustou, para os intervalos estudados, embora com baixo coeficiente de determinação (42%).

Resultados significativos e tendência raiz-quadrática positiva para a massa média de frutos foram encontrados por Chaves (2004) em estudo realizado com a mesma variedade de pimenta 'Tabasco' em função do acréscimo das lâminas de

irrigação de 40 a 120 % baseadas na evaporação do tanque Classe “A” no campo, em Pentecoste – CE, contudo observou-se uma diminuição de 38% caso houvesse redução da lâmina.

O coeficiente de variação para massa média de frutos por planta foi de 11,20 e de 15,86% quando a diferenciação da irrigação foi realizada a partir da fase vegetativa (E1) e de floração (E2). Estes valores são considerados médios, de acordo com Gomes e Garcia (2002), e indicam boa precisão do experimento.

Figura 19 – Massa média de frutos (MMF), em função das lâminas e das épocas de diferenciação das lâminas de irrigação em pimenta ‘Tabasco’, em ambiente protegido

4.4.3.2 Número médio de frutos por planta

O número médio de frutos por planta (NMFP), em função das lâminas de irrigação diferenciadas a partir da fase vegetativa (E1) e de floração (E2), pode ser observado na Figura 20.

Verifica-se tendência linear para o NMFP em função das lâminas e épocas de diferenciação da irrigação, sendo que a redução de 1% da lâmina na E1 e E2 reduziu de 10,12 e 10,32 números de frutos, para o intervalo estudado.

O coeficiente de determinação para ambas as épocas de diferenciação das lâminas indicam que aproximadamente 60% da variação do número médio de frutos por planta é explicada pela regressão linear do NMFP em função das lâminas aplicadas, no intervalo estudado. Não se verificou maior influência do déficit de irrigação em uma

época distinta e sim que, em qualquer época de inicialização, se observaram efeitos negativos no número médio de frutos por planta.

O coeficiente de variação para NMFP na E1e E2 encontra-se entre 10 e 20%, e são classificados como valor médio, conforme Gomes e Garcia (2002).

O maior valor absoluto foi de 1.761 frutos planta⁻¹ com a lâmina de 100% da ETc, e o valor médio entre os tratamentos foi de 1.125 frutos planta⁻¹ entre os tratamentos. A amplitude de variação foi de 585 e de 665 frutos planta⁻¹, entre as lâminas de 40 e 100% ETc, respectivamente, diferenciadas a partir da fase vegetativa (E1) e da fase de floração-frutificação (E2).

Paula (2008) verificou maior número de frutos (706 frutos planta⁻¹), antes da poda, para a pimenta 'Tabasco' cultivada sob aplicação de CO₂, em ambiente protegido no sudeste brasileiro.

Resultados superiores foram obtidos por Chaves et al. (2008) em função de diferentes frequências de irrigação e cobertura plástica em solo argiloso, com valores variando de 4.183 e 5.123 frutos planta⁻¹. Todavia, não se verificou efeito significativo para o número de frutos por planta em função das diferentes lâminas no experimento de Chaves (2004), devido, provavelmente, ao alto coeficiente de variação e metodologia de amostragem, segundo o próprio autor.

Sabe-se que o número de frutos por planta é altamente relacionado à variabilidade da planta e à variação de abscisão das flores. Fernández et al. (2005) não verificaram efeito significativo do déficit de irrigação em pimentão, em estudo realizado em ambiente protegido, na Província de Almeria no sudoeste da Espanha.

Figura 20 - Número médio de frutos por planta (NMFP), em função das lâminas e das épocas de diferenciação das lâminas de irrigação em pimenta 'Tabasco', em ambiente protegido

4.4.3.3 Abscisão total de flores

Os resultados de abscisão total de flores em função das lâminas de irrigação diferenciadas, a partir da E1 e E2, encontram-se na Figura 21.

A porcentagem de abscisão de flores não foi comprometida pelo déficit hídrico imposto, pois, não se observou efeito significativo ($p \leq 0,05$) das lâminas diferenciadas a partir da fase vegetativa (E1) e fase de floração-frutificação (E2) na abscisão de flores.

A porcentagem de abscisão de flores da pimenta cv. Tabasco variou de 20 a 60% para os tratamentos que tiveram a irrigação reduzida a 20% e 60%, a partir da fase vegetativa (E1). Verificou-se que, mesmo sob condição de irrigação plena durante todo o ciclo (lâmina igual 100% ETc) a porcentagem de abscisão de flores alcançou 45 % ao final de quatro semanas de avaliação.

Em estudo realizado por González – Dugo, Orgaz e Fereres (2007) também não se verificou efeito significativo na abscisão de flores de pimentão, quando submetido a déficit hídrico aplicado durante o amadurecimento e toda a estação e sob irrigação plena, sendo que, para todos os tratamentos, a porcentagem de abscisão variou de 40 a 48%.

A abscisão de flores é o processo responsável pela redução da produção em pimenta (ALONI et al., 1991) e normalmente está relacionado ao estresse térmico

(ALONI et al., 1994). Neste estudo, a temperatura máxima variou de 27 a 36 °C durante o dia e de 22 a 34 °C à noite (Figura 22), o que pode ter causado a abscisão das flores, durante o período de avaliação dos 88 aos 116 DAT.

Em cultivo de pimentão cv. Sonora submetido à condição de déficit hídrico em Córdoba, Espanha, observou-se que a temperatura máxima diária foi superior a 35 °C durante a maior parte do tempo, o que pode ter sido uma possível causa da abscisão das flores (GONZÁLEZ- DUGO; ORGAZ; FERERES, 2007).

Figura 21 - Abscisão total de flores de pimenteira 'Tabasco', em função das lâminas de irrigação diferenciadas a partir da fase vegetativa (E1) e da fase floração-frutificação (E2)

Figura 22 - Temperatura máxima diurna e noturna no interior do ambiente protegido, no período de avaliação (88 aos 116 DAT) da abscisão das flores da pimenta 'Tabasco'

4.4.3.4 Produção total de frutos por planta

Na Figura 23 encontra-se a massa total de frutos por planta (MTFP) ou produção total de frutos por planta, em função das lâminas de irrigação diferenciadas na fase vegetativa (E1) e de floração (E2).

A MTFP variou de 309 a 1.096 g de fruto por planta. Paula et al. (2011) obtiveram maior produção (748,87 g de fruto planta⁻¹), ao utilizar aplicação de CO₂ em cultivo de pimenta Tabasco, em ambiente protegido e sem restrição hídrica.

A análise de regressão aplicada aos dados de peso total de frutos por planta, para as épocas 1 e 2 de diferenciação das lâminas, indicou que o modelo linear para lâminas de irrigação foi o que melhor se ajustou, com coeficiente de determinação de 58% (E1) e 45% (E2).

No presente estudo houve tendência linear positiva para a massa total de frutos por planta com o incremento da lâmina de irrigação. No entanto, verifica-se que a diferenciação da irrigação na fase vegetativa (E1) mostrou-se mais susceptível ao déficit hídrico que a fase de florescimento (E2), por apresentar maior coeficiente angular da regressão, podendo-se observar que a redução de uma unidade da porcentagem da lâmina aplicada na E1 implica redução de 8 g de frutos por planta e na E2 de 6g de frutos por planta, no intervalo de lâminas estudado. Resultado semelhante foi obtido por Chaves (2004), que verificou que, para redução de cada unidade percentual de ECA houve uma redução de cerca de 7 g de frutos por planta de pimenta 'Tabasco'.

Constatou-se que a redução da produção foi devido à redução da massa média de frutos por planta e do número de frutos por planta (E1), contudo observa-se que para a E2 o MMFP não foi influenciado, sendo apenas as variações de MTFP devido à variação do NFP. O déficit de irrigação (40% ETc) imposto na E2 permitiu economia de água de até 49,8% no ciclo de 208 DAT, com redução de 380 g de pimenta. Fernández et al. (2005) observaram uma redução de 33 e 62% na produção total de frutos de pimentão, quando houve 20 e 50% de déficit de irrigação.

Dorji, Behboudian e Zegbe-Dominguez (2005) verificaram que a produção e qualidade de pimentão sob déficit hídrico e molhamento parcial de raízes são estratégias viáveis, proporcionam economia de água de 50% e melhora na eficiência de

uso de água. Por sua vez, González-Dugo, Orgaz e Fereres (2007) observaram que o déficit de irrigação em *Capsicum annum* L. reduziu a área foliar e a produção da biomassa e que os déficits aplicados no amadurecimento dos frutos, exigido para a colheita mecânica e para que não acelere o amadurecimento, também foram prejudiciais aos rendimentos comerciais, devendo as pimenteiras ser irrigadas até a colheita, para a máxima produção de pimenta desidratada “paprika”. Azevedo et al. (2005) relatam que a pimenta Tabasco responde positivamente às lâminas de irrigação mais elevadas.

Figura 23 - Produção total de frutos por planta (PTFP), em função das lâminas e das épocas de diferenciação das lâminas de irrigação em pimenta 'Tabasco', em ambiente protegido

4.4.3.5 Sazonalidade da produção

Identificou-se o efeito do déficit de irrigação inicializado a partir da fase vegetativa e de floração sob a sazonalidade da produção precoce, intermediária e tardia de pimenta. Os valores de produção precoce (1ª a 5ª colheita), intermediária (6ª a 10ª colheita) e tardia (11ª a 15ª colheita) em função das lâminas de irrigação diferenciadas, a partir da fase vegetativa (E1) e de floração (E2) estão apresentados na Figura 24.

Para a produção precoce não se verificou efeito significativo das lâminas diferenciadas na E1 e E2, provavelmente devido à grande variação das plantas, o que pode ser confirmado pelo alto valor de coeficiente de variação. Possivelmente, estes valores estão relacionados à variabilidade de produção inicial das plantas devido à propagação por semente, haja vista que a colheita precoce teve maior CV, quando

comparada com as demais colheitas e desuniformidade de maturação dos frutos. Também foi observado por Chaves (2008) alto coeficiente de variação para MFF da colheita precoce (36% e 56%).

Fernández et al. (2005) verificaram que o déficit hídrico não induziu a produção precoce de pimentão, também pertencente ao gênero *Capsicum*, na Espanha.

Houve efeito significativo ($p \leq 0,05$) das lâminas de irrigação diferenciadas na E1 e E2 na produção intermediária e tardia. O modelo linear para lâminas de irrigação aplicadas foi o que melhor se ajustou para os intervalos estudados, apresentando coeficiente de determinação de 27 a 50%. O coeficiente de variação para a produção intermediária e tardia variou de 29,9 a 34,4%, valores considerados altos conforme Gomes e Garcia (2002).

Verificou-se que a produção de pimentas foi mais sensível ao déficit hídrico na fase vegetativa (E1) do que na fase de florescimento (E2), por apresentar maior coeficiente angular da regressão. Observa-se que, para a redução de uma unidade na porcentagem da lâmina, no intervalo estudado, na E1 houve redução de 3,17 g e na E2 de 2,47 g, ao se considerar a produção intermediária. Para a produção tardia de pimenta verificou-se semelhante coeficiente angular da regressão em ambas as épocas de diferenciação da irrigação, sendo que o déficit de irrigação de 1%, no intervalo de lâminas estudado, acarretou uma redução de cerca de 3,22 g de fruto.

O déficit de irrigação afetou negativamente a produção intermediária e tardia que, consequentemente, promoveu menor produção total ou massa total de frutos por planta, principalmente quando a diferenciação da irrigação ocorreu na fase vegetativa. Isto, provavelmente, decorreu do maior déficit hídrico acumulado, representado pelo menor potencial da água no solo (Figura 13), principalmente no período de maior demanda de água pela cultura (Figura 14), tendo, possivelmente direcionado a translocação de fotossintatos para a manutenção da turgescência da planta em geral. Santos e Carlesso (1998), em revisão sobre o déficit hídrico e processos morfológicos e fisiológicos das plantas comentam que, quando as plantas são expostas a situações de déficit hídrico exibem, frequentemente, respostas fisiológicas que resultam, de modo indireto, na conservação da água no solo, como se estivessem economizando para períodos posteriores e chamam atenção para a necessidade de água para o crescimento das

células, sendo, desta maneira, elemento essencial para manutenção da turgescência. Petry (1991) relata a importância da manutenção do turgor nas células para permitir a continuidade dos processos de crescimento vegetal, expansão, divisão celular e fotossíntese e a possibilidade de adiar a desidratação dos tecidos, podendo essas reservas serem usadas em períodos posteriores do ciclo.

* Produção precoce (1ª a 5ª colheita), intermediária (6ª a 10ª colheita) e tardia (11ª a 15ª colheita).

Figura 24 – Produção precoce, intermediária e tardia de pimenta 'Tabasco' em função das lâminas de irrigação diferenciadas na fase vegetativa (E1) e de floração (E2)

4.4.4 Qualidade física da pimenta 'Tabasco'

Não se verificou efeito significativo ($p \leq 0,05$) das lâminas de irrigação diferenciadas na E1 e E2 na qualidade física da pimenta cv. Tabasco, diâmetro (DF) e comprimento de fruto (CF), sendo que os comprimentos dos frutos variaram de 20,1 a 25 mm e o diâmetro dos frutos de 6,13 a 7,30 mm entre os tratamentos (Figura 25).

Valores semelhantes de comprimento de frutos (24,03 mm) e de diâmetro de frutos (7,43 mm) foram encontrados por Paula (2008), em estudo com aplicação de CO₂ em pimenta 'Tabasco', em ambiente protegido em Piracicaba-SP.

Observa-se que o déficit de irrigação iniciado em E1 e E2 não influenciou negativamente a qualidade física da pimenta, não havendo comprometimento para sua comercialização, mesmo não existindo normas oficiais de padronização e classificação comercial, podendo estas variáveis serem definidas pela variedade e não pelo tipo de manejo de irrigação adotado.

Em estudo realizado por Sezen, Yazar e Eker (2006), na Turquia, verificou-se que o estresse hídrico reduziu o diâmetro e comprimento do pimentão, também fruto do gênero *Capsicum*, e segundo este autor o peso do fruto é associado com a falta de água no solo na proximidade da zona radicular do solo, sendo que, quando aumenta o déficit de água no solo, ocorre redução da turgidez e redução do crescimento do fruto.

Figura 25 - Comprimento (CF), e diâmetro de frutos (DF), em função das lâminas e das épocas de diferenciação das lâminas de irrigação em pimenta 'Tabasco', em ambiente protegido

4.4.5 Eficiência de uso de água

Não houve efeito significativo das lâminas de irrigação diferenciadas a partir da fase vegetativa e de floração na eficiência de uso de água da pimenta 'Tabasco' (Tabela 9). Os valores médios da EUA variaram de 2,14 (E1L80) a 2,84 kg m⁻³ (E1L40) e de 2,42 kg m⁻³ sob irrigação plena. Estes valores foram semelhantes aos valores indicados por Doorenbos e Kassam (2000), para o gênero *Capsicum* (1,5 a 3,0 kg m⁻³).

Azevedo et al. (2005), trabalhando com pimenta 'Tabasco', em Pentecoste-CE, com diferenciações de lâminas de irrigação (40, 60, 80, 100 e 120 % ECA), nas fase de

florescimento e frutificação, obtiveram o maior valor de eficiência de uso da água de $1,85 \text{ kg m}^{-3}$, com a lâmina de 60% da evaporação do tanque Classe A.

Paula (2008), em condições de ambiente protegido no sudeste brasileiro, obteve valor de eficiência de uso de água variando de 0,99 a $1,2 \text{ kg m}^{-3}$ ao avaliar o efeito da aplicação de CO_2 no rendimento da pimenta cv. Tabasco McIlhenny, enquanto Chaves (2008) encontrou valores de 1,99 a $2,14 \text{ kg.m}^{-3}$, para mesma pimenta, sob diferentes frequências de irrigação, também em condições de ambiente protegido. Para o *Capsicum anum* sob diferentes níveis de evapotranspiração cumulativa do tanque classe A, Sezen, Yazar e Eker (2006) obtiveram maiores valores de EUA para os tratamentos com menores intervalos de irrigação (3 a 6 dias), e concluíram que esses intervalos são recomendados para a pimenta, para se obter altas produtividades e melhora da qualidade.

Tabela 9 - Eficiência de uso de água em função das lâminas de irrigação diferenciadas na fase vegetativa (E1) e de floração (E2), em pimenta 'Tabasco', ambiente protegido, Piracicaba-SP

Época	Lâminas de irrigação (% ETc)			
	40	60	80	100
	EUA (kg m^{-3})			
E1	2,841	2,301	2,683	
E2	2,693	2,589	2,145	
Todo ciclo				2,421

4.4.6 Calibração e determinação de fluxo de seiva por sondas de dissipação térmica

4.4.6.1 Gradientes térmicos naturais

Na Figura 26A é correlacionada a média do fluxo de seiva no período, estimado pela eq. (7), com e sem compensação das DTN. Observa-se uma forte tendência de subestimativa do método, quando não compensadas as DTN (média de -14,9%).

Quando se corrigem as diferenças térmicas pela subtração das diferenças térmicas naturais estimadas, a tendência de subestimativa do fluxo pelo método diminui

e aumenta a precisão na estimativa do fluxo de seiva, como pode ser verificado pelos coeficientes de determinação (R^2) apresentados na Figura 26B.

Figura 26 - Relação entre o fluxo de seiva médio diário do período (FS) para cada planta com e sem compensação das diferenças térmicas naturais do caule – DTN (A). Relação entre a transpiração medida pelo lisímetro e fluxo de seiva diário acumulado com e sem compensação das DTN (B)

Em estudo realizado por Vellame et al. (2011), observou-se que foi indispensável a correção dos gradientes térmicos naturais presentes no caule para adequar a estimativa da densidade de fluxo de seiva pelo método Granier em mangueira. Delgado-Rojas (2003) e Delgado-Rojas et al. (2004) também verificaram, em plantas de menor porte, como cafeeiro e limoeiro, que o gradiente térmico apresenta acentuada interferência sobre as estimativas.

Todavia Delgado-Rojas et al. (2006), em estudo com a seringueira, verificaram que não houve interferência do gradiente térmico natural (GTN) sobre as estimativas de fluxo de seiva (FS) devido à alta densidade de plantas. Segundo esses autores, tudo indica que, quando as plantas têm baixa área basal (plantas jovens) ou baixa densidade por área, pode haver maior incidência da carga térmica do ambiente sobre as mesmas, ocorrendo maior interferência do GTN e que, quanto menores as plantas, o efeito pode ser mais acentuado, principalmente pelo reduzido diâmetro do caule, que é afetado mais facilmente, tanto pela energia transportada advectivamente como a que foi transformada no local.

4.4.6.2 Área da secção condutora do caule e posicionamento do sensor

A relação entre a área da secção condutora e o perímetro externo do caule apresentou um bom ajuste por equação polinomial de 2º grau (Figura 27). Em média, a AS representa 66,37% da área total da seção reta do caule.

Figura 27 - Área da seção condutora de seiva bruta (AS) em função do perímetro externo do caule da pimenteira cv. Tabasco

Neste trabalho, por se utilizarem todas as plantas como amostras destrutivas, foi possível estabelecer qual o número de caules amostrados que proporciona uma estimativa confiável da área de xilema ativo. Na Figura 28 é apresentado o erro percentual da média da relação entre a área condutora medida e estimada. Observa-se que, com uma pequena amostragem (em torno de 10% ou 3 segmentos de caule), os

erros são inferiores a 5%, o que viabiliza a realização de trabalhos dessa natureza com um número reduzido de plantas destruídas.

Figura 28 - Erro percentual na relação entre área condutora estimada e medida (AS_{est}/AS_{med}) em função do % de caules amostrados

Os coeficientes de variação (CV) para as medidas diárias de fluxo de seiva das 29 plantas, com e sem correção, quanto ao posicionamento do sensor pela eq. 6, são apresentados na Figura 29. Verifica-se que parte da variabilidade das medidas entre plantas pode ser explicada pelo posicionamento do sensor em áreas não condutoras de seiva bruta. Para todo o período, a diferença entre o CV das medidas com e sem correção foi de 5,3%, o que explica apenas 12,5% da variabilidade.

Figura 29 - Coeficiente de variação das medidas diárias de fluxo de seiva com e sem correção do efeito do posicionamento da sonda

4.4.6.3 Calibração de sonda Granier para pimenta 'Tabasco'

O curso da radiação solar global, do fluxo de seiva e da transpiração, ao longo de 4 dias, calculados com base em médias horárias e a cada 15 minutos, para a planta utilizada na calibração é apresentado na Figura 30.

Figura 30 - Curso da radiação solar e transpiração - lisimetria, fluxo de seiva - sonda de dissipação térmica (SDT) de pimenta tabasco a partir dos 250 DAT a 253 DAT (01 e 04/08/2010), a cada 15 minutos e hora, considerando validas apenas as leituras das 6 às 19 horas

Verifica-se bom funcionamento das sondas ao se comparar a evolução diurna do fluxo de seiva e da radiação solar. Esta característica também foi utilizada como garantia de bom funcionamento por Mangueira e Silans (1995), ao testar um transpirômetro, pois, sabe-se que a radiação solar é a fonte primária de energia para a transpiração (ANGELOCCI, 2002).

Observa-se que o fluxo de seiva, assim como a transpiração, evolui com o incremento da radiação solar, da manhã até parte da tarde, com reduções bruscas entre 11 e 13 horas, quando a radiação solar atinge seu ponto mais elevado, para depois diminuir até o período noturno, permitindo a recuperação do déficit hídrico que se acumulou ao longo do dia. Com isso, verifica-se a peculiaridade da pimenta em evitar demasiadamente perda água, que provavelmente se dá por regulação estomática.

Ressalta-se que a defasagem entre o fluxo de seiva e a transpiração segue o curso da radiação solar. Verifica-se também haver boa relação entre a radiação solar e o fluxo de seiva por Granier calibrada com o lisímetro e com os dados de AS com correção da posição da sonda (Figura 31). A tendência foi polinomial de 2º grau, com bom ajuste ($r^2 = 0,9472$ e de $0,9322$), em escala horária e a cada 15 minutos, nas datas de 25/07 a 4/08/2009.

Figura 31 - Relação entre o fluxo de seiva por equação de Granier calibrada, a cada 15 minutos e a cada hora (B), no período de 25/07 a 04/08/2010

Todavia, verifica-se também que houve variações bruscas e atrasos da transpiração por lisímetro em relação à radiação solar global, tendo como causa provável a baixa sensibilidade, o que inviabiliza medidas horárias.

Constata-se tendência linear na relação fluxo de seiva com e sem compensação de DTN e evapotranspiração de referência ($ET_{o\ P-M}$) (Figura 32). Observa-se que, quando

realizada a correção das diferenças térmicas naturais nos dados de fluxo de seiva acumulados, melhora-se o ajuste, com coeficiente angular de 0,73 e com menor dispersão dos dados ($r^2=0,32$).

Figura 32 - Relação entre o fluxo de seiva com e sem correção de diferenças térmicas naturais e evapotranspiração de referência por Penman-Monteith, em escala diária

Considerando a baixa acurácia das medidas lisimétricas em escala horária e a defasagem entre fluxo de seiva e transpiração, optou-se por modificar o coeficiente linear da equação geral de Granier, aproximando os valores em escala diária segundo a eq. (10). O coeficiente β (1,231) da eq.(3) foi mantido no valor ajustado por Granier (1985).

$$F = 0,0003823K^{1,231}AS \quad (10)$$

A relação entre as medidas de transpiração efetuadas com lisímetro e o fluxo de seiva calculado pela eq. (10) e pela equação geral de Granier (eq. 3) pode ser observada na Figura 33. O desvio médio entre o fluxo de seiva e a transpiração em escala diária no período estudado foi de 6,1%, verificando-se que o fluxo de seiva estimado pela equação geral de Granier, sem modificação dos parâmetros empíricos, subestima os valores de transpiração obtida com lisímetros. Vellame et al. (2007)

também observaram essas tendências de subestimativa do fluxo de seiva pelo método da sonda de dissipação térmica.

Figura 33 - Relação entre medidas de transpiração efetuadas com lisímetro e fluxo de seiva acumulado diário pela sonda de dissipação térmica

4.4.7 Fluxo de seiva de pimenteira 'Tabasco' após nova irrigação

A análise de regressão aplicada aos dados de fluxo de seiva (FS), em função das lâminas de irrigação diferenciadas em duas épocas distintas, no ciclo de produção anterior e após nova irrigação indica que houve efeito significativo ($p < 0,03$) das lâminas aplicadas no ciclo anterior apenas quando a diferenciação da irrigação foi realizada na fase de floração (E2), aos quatorze dias após a nova irrigação. Ressalta-se que as sondas foram inseridas na planta aos 227 DAT, dez dias após a nova irrigação (Figura 34).

O modelo que melhor se ajustou foi o linear, para o intervalo considerado, com um coeficiente de determinação de 0,393. Observou-se um coeficiente de variação de 16,59%, valor condizente com estudos dessa natureza. Verificou-se em média uma redução de 26,9% no fluxo de seiva para as plantas que tiveram a irrigação diferenciada a 40% da lâmina no ciclo anterior.

Figura 34 – Fluxo de seiva em função das lâminas aplicadas nas épocas 1 e 2, no ciclo de produção anterior e 14º dia após a nova irrigação

Na figura 35 pode ser observada a variação horária do fluxo de seiva da pimenta Tabasco, média de três plantas, em função das lâminas de irrigação diferenciadas em duas épocas distintas, no ciclo de produção anterior e após nova irrigação, ao longo dos 230 DAT (14 dias depois da nova irrigação).

Observa-se abaulamento das curvas da média do fluxo de seiva da pimenteira cv. Tabasco em escala horária, ao longo dos 230 DAT, no período de maior demanda de água da cultura (das 11 às 13 horas), em relação à radiação solar para todos os tratamentos. Contudo, verifica-se que as plantas que tiveram a diferenciação da irrigação realizada a partir da fase de floração (E2) no ciclo anterior apresentaram maior abaulamento quanto menor a lâmina aplicada no ciclo anterior.

Figura 35 - Variação horária de fluxo de seiva de pimenteiras em função das lâminas aplicadas nas épocas 1 e 2, no ciclo de produção anterior e 14º dia após a nova irrigação, em ambiente protegido, Piracicaba-SP

No 15º dia após a nova irrigação não se verificou efeito do déficit hídrico acumulado no ciclo de cultivo anterior (Figura 36). Este fato pode ser um indicador de que as plantas que sofreram déficit acumulado tenderam a se ajustar e manter a sua transpiração igual ou maior à das plantas que não sofreram restrição hídrica.

Figura 36 - Variação horária de fluxo de seiva de pimenteiras em função das lâminas aplicadas nas épocas 1 e 2, no ciclo de produção anterior e 14º dia após a nova irrigação, em ambiente protegido, Piracicaba-SP

Como, após a poda houve morte de plantas, por causa não determinada, reduzindo significativamente as unidades experimentais, não foi possível determinar o fluxo de seiva após a poda e sob condição de déficit hídrico.

5 CONCLUSÕES

O déficit de irrigação inicializado na fase vegetativa acarreta maior redução no crescimento da planta e na produção de pimenta cv. Tabasco.

Há maior influência do déficit de irrigação na relação hídrica da pimenteira quando aplicado a partir da fase de floração.

A qualidade física da pimenta 'Tabasco' não foi depreciada pelo déficit hídrico.

A eficiência de uso de água pela pimenta Tabasco foi semelhante para plantas irrigadas com e sem déficit, com valores dentro da faixa recomendada para o gênero *capsicum*.

O máximo déficit de irrigação inicializado na fase de floração permite uma economia de água no primeiro ciclo produtivo de cerca de 50%, com redução de 380 g da produção total de pimenta, podendo a água economizada ser destinada a ampliação da área de produção.

O método da sonda de dissipação térmica, com ajuste da calibração original e correção do gradiente térmico natural do caule, é eficaz na estimativa da transpiração, fornecendo dados que possibilitam o estudo das relações hídricas de plantas de pimenta cv. Tabasco.

REFERÊNCIAS

- ALI, M.H.; HOQUE, M.R.; HASSAN, A.A.; KHAIR, A. Effects of deficit irrigation on yield, water productivity, and economic returns of wheat, **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 92, n.3, p. 151-161, 2007.
- ALLEN, R.G.; PRUITT, W.O.; JENSEN, M.E. Environment requirements of lysimeters. In: ALLEN, R.G.; HOWELL, T.A.; PRUITT, W.O.; WALTER, I.A.; JENSEN, M.E. (Ed.). Lysimeters for evapotranspiration and environmental measurements. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON LYSIMETRY, 1991, New York. **Proceedings...** New York: ASCE, 1991. p. 170-181.
- ALLEN, R.G.; PEREIRA, L.S.; RAES, D.; SMITH, M. **Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements**. Rome: FAO, 1998. 297 p. (FAO. Irrigation and Drainage Paper, 56).
- ALONI, B.; KARNI, L.; ZAIDMAN, Z.; RIOV, Y., HUBERMAN, M.; GOREN, R. The susceptibility of pepper (*Capsicum annuum* L.) to heat-induced flower abscission. Possible involvement of Ethylene. **Journal of Horticultural Science**, Palo Alto, v. 69, n. 5, p. 923-928, 1994.
- ALONI, B.; PASHKAR, T.; KARNI, L. Partitioning of (¹⁴C) sucrose and acid invertase activity in reproductive organs of pepper plants in relation to their abscission under heat stress. **Annals of Botany**, London, v. 67, n. 5, p. 371–377, 1991.
- ANGELOCCI, L.R. **Água na planta e trocas gasosas/energéticas com a atmosfera: introdução ao tratamento biofísico**. Balanço hídrico da planta. Piracicaba: O autor, 2002. 272 p.
- AZEVEDO, B.M. de; CHAVES, S.W.P.; MEDEIROS, J.F.; AQUINO, B.F.; BEZERRA, F.M.L.; VIANA, T.V.A. Rendimento da pimenteira em função de lâminas de irrigação. **Revista Ciência Agronômica**, Fortaleza, v. 36, n. 3, p. 268-273, 2005.
- BEN-GAL, A.; AGAM, N.; ALCHANATIS, V.; COHEN, Y.; YERMIYAHU, U.; ZIPORI, I.; PRESNOV, E.; SPRINTSIN, M.; DAG, A. Evaluating water stress in irrigated olives: correlation of soil water status, tree water status, and thermal imagery. **Irrigation Science**, Berlin, v. 27, n. 5, p. 367–376, 2009.
- BERGONCI, J.I.; PEREIRA, G.B. Comportamento do potencial da água na folha e da condutância estomática do milho em função da fração de água disponível no solo. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 10, n. 2, p. 229, 2002.
- BERGONCI, J.I.; BERGAMASCHI, H.; BERLATO, M.A.; SANTOS, A.O. Potencial da água na folha como um indicador de déficit hídrico em milho. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 35, n. 8, p. 1531-1540, 2000.

BOYER, J.S.; KRAMER, P.J. Soil and water. In: _____. **Water relations of plants and soils**. San Diego: Academic Press, 1995. p. 84-114.

CARBONNEAU, A.; DELOIRE, A.; COSTANZA, P. Leaf water potential: meaning of different modalities of measurements. J. Int. Sci. Vigne vin, Bordeaux, v.38, n.1, p.15-19, 2004.

CARLSON, R.E.; MOMEN, N.N.; ARJMAND, O.; SHAN, R.H. Leaf conductance and leaf-water potential relationship for two soybean cultivars grown under controlled irrigation. **Agronomy Journal**, Madison, v. 71, p. 321-325, 1979.

CARVALHO, F.D.; SILVA, L.D.B.; GUERRA, J.G.M.; CRUZ, F.A.; SOUZA, A.P. Instalação, calibração e funcionamento de lisímetro de pesagem. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 27, n. 2, p. 363-372, 2007.

CARVALHO, S.I.C. de; BIANCHETTI, L.B. **A cultura da pimenta (*Capsicum* spp): sistema de produção - botânica**. Brasília: Embrapa Hortaliças, 2007. Disponível em: <http://www.cnpq.embrapa.br/sistemas_producao/cultivo_da_pimenta.htm>. Acesso em: 12 jun. 2008.

CHAVES, S.W.P. **Coeficiente de cultivo, necessidade hídrica e adubação nitrogenada na cultura da pimenta**. 2004. 59 p. Dissertação (Mestrado em Irrigação e Drenagem) - Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2004.

_____. **Efeito da alta frequência de irrigação e do “mulching” plástico na produção de pimenta ‘Tabasco’ fertirrigada por gotejamento**. 2008. 154 p. Tese (Doutorado em Irrigação e Drenagem) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2008.

CHAVES, S.W.P.; AZEVEDO, B.M. de; MEDEIROS, J.F. de; BEZERRA, M.L.B.; MORAIS, N.B. de. Evapotranspiração e coeficiente de cultivo da pimenta em lisímetro de drenagem. **Revista Ciência Agrônoma**, Fortaleza, v. 36, n. 3, p. 262-267, 2005.

CLAVEL, D.; SARR, B.; MARONE, E; ORTIZ, R. Potential agronomic and physiological traits of Spanish groundnut varieties (*Arachis hypogaea* L.) selection criteria under end-of-cycle drought conditions. **Agronomie**, Paris, v. 24, p. 101-111, 2004.

CORREA-TEDESCO, G.; ROUSSEAU, M.C.; SEARLES, P.S. Plant growth and yield responses in olive (*Olea europaea*) to different irrigation levels in an arid region of Argentina. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 97, p. 1829–1837, 2010.

COELHO FILHO, M.A. **Determinação da transpiração máxima em um pomar jovem de lima ácida ‘Tahiti’ (*Citrus latifolia* Tan.) e sua relação com a evapotranspiração de referência**, 2002. 91 p. Tese (Doutorado em Irrigação e Drenagem) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2002.

COELHO FILHO, M.A.; ANGELOCCI, L.R.; ROJAS-DELGADO, J.S.; CAMPECHE, L.F.S.; FOLEGATTI, M.V. Relações entre transpiração máxima, área foliar e evapotranspiração de referência em pomar jovem de lima ácida 'Tahiti'. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 12, n. 2, p. 265-274, 2004.

CRUZ, D.M.R.; MAKISHIMA, N. **A cultura da pimenta (*Capsicum spp*): sistema de produção – clima**. Brasília: Embrapa Hortaliças, 2007. Disponível em: <http://www.cnph.embrapa.br/sistemas_producao/cultivo_da_pimenta.htm>. Acesso em: 23 abr. 2008.

CUENCA, R.H. **Irrigation systems design: an engineering approach**. Englewood Cliffs: Prentice Hall, 1989. 551p.

DALMAGO, G.A.; HELDWEIN, A.B.; BURIOL, G.A.; LUZZA, J.; TAZZO, I.F.E.; TRENTIN, G. Evapotranspiração máxima e coeficiente de cultura do pimentão em estufa plástica. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 11, n. 1, p. 33-41, 2003.

DELOIRE, A.; CARBONNEAU, A.; WANG, Z.; OJEDA, H. Vine and water. A short review. **Journal International des Sciences de la vigne et du vin**, Bordeaux, v.38, n.1, p.1- 13, 2004.

DORJI, K.; BEHBOUDIAN, M.H.; ZEGBE-DOMINGUEZ, J.A. Water relations, growth, yield, and fruit quality of hot pepper under deficit irrigation and partial rootzone drying. **Scientia Horticulturae**, Amsterdam, v. 104, p. 137–149, 2005.

DOORENBOS, J.; KASSAM, A.H. **Efeito da água no rendimento das culturas**. Campina Grande: UFPB, 2000. 221 p. (Estudos FAO: Irrigação e Drenagem, 33).

EMBRAPA. **Manual de métodos de análises de solo**. 2. ed. Rio de Janeiro: EMBRAPA, CNPS, 1997. 212 p. (EMBRAPA. CNPS, Documentos, 1).

_____. **Sistemas de produção**. Cultivo de pimenta Tabasco no Ceará, 2006. Disponível em: <http://www.cnpat.embrapa.br/cnpat/cd/jss/acervo/Sp_003.pdf>. Acesso em: 10 mar. 2008.

ENGLISH, M.J. Deficit irrigation. I. Analytical framework. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, New York, v. 116, n. 3, p. 399-412, 1990.

FAO. **Report, deficit irrigation practices**. Rome, 2002. 102 p.

_____. **Faostat database gateway**. Disponível em: <<http://faostat.fao.org/site/567/DesktopDefault.aspx?PageID=567>>. Acesso em: 08 set. 2009.

FERNÁNDEZ, M.D.; GALLARDO, M.; BONACHELA, S.; ORGAZ, F.; THOMPSON, R.B.; FERERES, E. Water use and production of a greenhouse pepper crop under optimum and limited water supply. **Journal of Horticultural Science & Biotechnology**, Ashford, v. 80, n. 1, p. 87–96, 2005.

FILGUEIRA, F.A.R. **Manual de olericultura**: cultura e comercialização de hortaliças. 2. ed. São Paulo: Agronômica Ceres, 1982. v. 2, p. 307-310.

FRIZZONE, J.A.; MATIOLI, C.S.; REZENDE, R.; GONÇALVES, A.C.A. Viabilidade econômica de irrigação suplementar em cana-de-açúcar, *Sacharum* spp., para a região Norte do Estado de São Paulo. **Acta Scientiarum Agronomy**, Maringá, v. 23, n. 5, p. 1131-1137, 2001.

GARCIA, A.; ANDRÉ, R.G.B. Desempenho de dois modelos para a determinação do estresse hídrico em feijoeiro. **Revista Brasileira de Meteorologia**, São José dos Campos, v. 16, n. 2, p. 201-210, 2001.

GLENN, D.M.; SCORZA, R.; BASSETT, C. Physiological and morphological traits associated with water use efficiency in the willow-leaf peach. **Hortscience**, Alexandria, v. 35, n. 7, p. 1241-1243, 2000.

GOMES, F.P. **Curso de estatística experimental**. São Paulo: Nobel, 1987. 468 p.

GOMES, F.P.; GARCIA, C.H. **Estatística aplicada a experimentos agrônômicos e florestais**. Piracicaba: FEALQ, 2002. 309 p.

GÓMEZ-DEL-CAMPO, M.; LEAL, A.; PEZUELA, C. Relationship of stem water potential and leaf conductance to vegetative growth of young olive trees in a hedgerow orchard. **Australian Journal of Agricultural Research**, Victoria, v. 59, p. 270–279, 2008.

GONZÁLEZ-DUGO, V.; ORGAZ, F.; FERERES, E. Responses of pepper to deficit irrigation for paprika production. **Scientia Horticulturae**, Amsterdam, v. 114, p. 77–82, 2007.

GRANIER, A. Une nouvelle method pour la mesure du flux de seve brute dans le tronc des arbres. **Annales des Sciences Forestières**, Versailles, v. 42, n. 2, p. 193-200, 1985.

HARDIE, W.J.; CONSIDINE, J.A. Response of grapes to water deficit stress in particle stages of development, **American Journal of Enology and Viticulture**, Davis, v. 27, p. 55-61, 1976.

HSIAO, T.C. Plant responses to water stress. **Annual Review of Plant Physiology**, Palo Alto, v. 24, p. 519-570, 1973.

INIESTA, F.; TESTI, L.; ORGAZ, F.; VILLALOBOS, F.J. The effects of regulated and continuous deficit irrigation on the water use, growth and yield of olive trees. **European Journal of Agronomy**, Amsterdam, v. 30, n. 4, p. 258–265, 2009.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Sistema IBGE de recuperação automática – SIDRA**, 2008. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br/dbda>>. Acesso em: 07 jan. 2010.

IDSO, S.B.; JACKSON, R.D.; PINTER, P.J. Jr.; REGINATO, R.J.; HATFIELD, J.L. Normalizing the stress-degree-day parameter for environmental variability. **Agricultural Meteorology**, Amsterdam, v. 24, p. 45-55, 1981.

JONES, C.A. **C4 grasses and cereals: growth, development and stress response**, New York: John Wiley, 1985. 419 p.

JONES, H.G. Irrigation scheduling: advantages and pitfalls of plant-based methods. **Journal of Experimental Botany**, Oxford, v. 55, p. 2427-2436, 2004.

JONES, T.; BESSIN, R.; STRANG, J.; ROWELL, B.; SPALDING, D. **Kentucky pepper integrated crop management**. Kentucky: University of Kentucky, College of Agriculture, Cooperative Extension Service, 2000. 38 p.

JUNIOR, VIEIRA, P.A.; NETO, DOURADO, D.; OLIVEIRA, R.F. de; PERES, L.E.P.; MARTIM, T.N.; MANFRON, P.A.; BONNECARRÈRE, R.A.G. Relações entre o potencial e a temperatura da folha de plantas de milho e sorgo milho submetidas a estresse hídrico. **Acta Scientiarum Agronomy**, Maringá, v. 29, n. 4, p. 555-561, 2007.

KATERJI, N.; MASTRORILLI, M.; HAMDY, A. Effects of water stress at different growth stage on pepper yield. **Acta Horticulture**, Almeria, v. 335, n. 1, p. 165–172, 1993.

KHAN, M.U.H.; CHATTHA, T.H.; SALEEM, N. Influence of different irrigation intervals on growth and yield of bell pepper (*Capsicum Annuum* Grossum Group). **Journal of Agriculture and Biological Sciences**, Pakistan, v. 1, n. 2, p. 125-128, 2005.

KLAR, A.E.; JADOSKI, S.O. Irrigation and mulching management for sweet pepper crop in protected environment. **Irriga**, Botucatu, v. 9, n. 3, p. 217-224, 2004.

KRAMER, P.J.; BOYER, J.S. **Water relations of plants and soils**. San Diego: Academic Press, 1995. 495 p.

KOZLOWSKI, T.T. Introduction. In: _____. **Water deficits and plant growth: development, control, and measurement**. New York: Academic Press, 1968. v. 1, p. 1-21.

MARTINS, D.L.; GILLEY, J.R.; SUPPLA, R.J. Evaluation of irrigation planning decisions. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, New York, v. 115, n. 1, p. 58-77, 1989.

MELO, R.F. de; GRUBER, Y.B.G.; COELHO, R.D. Efeito do armazenamento das amostras para a determinação do potencial da água na folha pela câmara de pressão. **Irriga**, Botucatu, v. 12, n. 3, p. 326-337, 2007.

MENDONÇA, J.C.; SOUZA, E.F.; BERNARDO, S.; DIAS, G.P.; GRIPPA, S. Comparação entre métodos de estimativa da evapotranspiração de referência (ET_o), na região norte fluminense - RJ. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 7, n. 2, p. 275-279, 2003.

MICHELAKIS, N.; VOUYOUKALOU, E.; CLAPKI, G. Water use and soil moisture depletion by olive trees under different irrigation conditions. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 29, n. 3, p. 315-325, 1996.

MIRANDA; F.R; GONDIM, R.S.; COSTA, C.A.G. Evapotranspiration and crop coefficients for tabasco pepper (*Capsicum frutescens* L.) **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 82, p. 237-246, 2006.

OLIVEIRA, A.D. de; FERNANDES, E.J.; RODRIGUES, T.J.D. Condutância estomática como indicador de estresse hídrico em feijão. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 25, n. 1, p. 86-95, 2005.

ORTA, A.H.; ERDEM, T.; ERDEM, Y. Determination of water stress index in sunflower. *Helia*, Novi Sad, v. 25, n. 37, p. 27-38, 2002;

PAULA, F.L.M. **Aplicação de CO₂ via irrigação na pimenta Tabasco cultivada em ambiente protegido**. 2008. 133 p. Tese (Doutorado em Irrigação e Drenagem) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2008.

PAULA, F.L.M.; FRIZZONE, J.A.; PAULA, A.L.de; DIAS, C.T.S. Produção de pimenta tabasco com aplicação de CO₂, utilizando-se irrigação por gotejamento. **Acta Scientiarum Agronomy**, Maringá, v. 33, n. 1, p. 133-138, 2011.

PEREIRA, A.R.; ANGELOCCI, L.R.; SENTELHAS, P.C. **Meteorologia agrícola**. Piracicaba: ESALQ, Depto. Ciências Exatas, 2007. 192 p.

PETRY, C. **Adaptação de cultivares de soja a deficiência hídrica no solo**. 1991. 106 p. Dissertação (Mestrado em Agronomia)– Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 1991.

RAIJ, B. van; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J.A.; FURLANI, A.M.C. **Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo**. Campinas: Instituto Agronômico; FUNDAG, 1997. 285 p. (IAC. Boletim, 100).

REIFSCHNEIDER, F.J.B.; RIBEIRO, C.S.C. **A cultura da pimenta (*Capsicum* spp): sistema de produção - importância econômica**. Brasília: Embrapa Hortaliças, 2007.

Disponível em:

<http://www.cnph.embrapa.br/sistemas_producao/cultivo_da_pimenta.htm>. Acesso em: 18 ago. 2008.

REZENDE, F.C.; FRIZZONE, J.A.; BOTREL, T.A.; PEREIRA, A.S. Plantas de pimentão cultivadas em ambiente enriquecido com CO₂. I. Crescimento vegetativo. **Acta Scientiarum Agronomy**, Maringá, v. 24, n. 5, p. 1517-1526, 2002.

ROJAS-DELGADO, R.S. **Avaliação do uso de fluxo de seiva e da variação do diâmetro do caule e de ramos na determinação das condições hídricas de citros, com base para o manejo de irrigação**. 2003. 129 p. Tese (Doutorado em Irrigação e Drenagem) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2003.

ROJAS-DELGADO, R.S.; ANGELOCCI, L.R.; FOLEGATTI, M.F.; COELHO FILHO, M.F. Desempenho da sonda de dissipação térmica na medida da transpiração de plantas jovens de Lima Ácida, **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 27, n. 2, p. 404-413, maio/ago. 2007.

ROSENBERG, N.J.; MCKENNEY, M.S.; MARTIN, P. Evapotranspiration in a greenhouse-warmed world, a review and a simulation. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 47, p. 199-209, 1989.

RUFINO, J.L.S.; PENTEADO, D.C.S. Importância econômica, perspectivas e potencialidades do mercado para pimenta. **Informe Agropecuário**, Belo Horizonte, v. 27, n. 235, p. 7-15, 2006.

SANTOS, R.F.; CARLESSO, R. Déficit hídrico e os processos morfológicos e fisiológicos das plantas, **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 2, n. 3, p. 287-294, 1998.

SEZEN, S.M.; YAZAR, A.; EKER, S. Efeitos de regimes de irrigação no rendimento e qualidade em campo de pimenta. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 81, p. 115–131, 2006.

SILVA, E.S.A.; SOUZA, C.M.A.; ROCHA NETO, O.G. da; FIGUERÊDO, F.J.C. Parâmetros bioquímicos de plantas de pimenta longa (*Piper hispinervum* C.DC.) em diferentes condições de cultivo no município de Igarapé-Açu-PA, **Revista Ciência Agrária**, Belém, n. 51, p. 171-189, 2009.

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

SILVA, L.D.B. **Evapotranspiração do capim Tanzânia (*Panicum maximum* Jacq) e gramabatatais (*Paspalum notatum* Flugge) utilizando o método do balanço de energia e lisímetro de pesagem**. 2003. 93 p. Tese (Doutorado em Irrigação e

Drenagem) - Escola Superior “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2003.

VELLAME, L.M. **Transpiração em plantas de laranja e manga utilizando sonda de dissipação térmica e balanço de calor**. 2007. 67 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Manejo da Irrigação) – Centro de Ciências Agrárias, Ambientais e Biológicas / Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, Cruz das Almas, 2007.

VELLAME, L.M.; COELHO FILHO, M.A.; PAZ, V.P.S. Transpiração em mangueira pelo método Granier. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 13, n. 5, p. 516–523, 2009.

VELLAME, L.M.; COELHO FILHO, M.A.; PAZ, V.P.S.; COELHO, E.F. Gradientes térmicos naturais na estimativa do fluxo de seiva pelo método Granier. **Revista Caatinga**, Mossoró, v. 24, n. 1, p. 116-122, 2011.

VILELA, N.J. **A cultura da pimenta (*Capsicum spp*): sistema de produção-coeficientes técnicos, custos, rendimentos e rentabilidade**. Brasília: Embrapa Hortaliças, 2007. Disponível em:
<http://www.cnph.embrapa.br/sistemas_producao/cultivo_da_pimenta.htm>. Acesso em: 28 ago. 2008.