

UTILIZAÇÃO DA VARIAÇÃO DENDROMÉTRICA COMO  
INDICADOR PARA O MANEJO DA IRRIGAÇÃO DE PLANTAS DE  
CAFÉ

**LUCAS FERNANDES DE SOUZA**

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO NORTE FLUMINENSE  
DARCY RIBEIRO – UENF

CAMPOS DOS GOYTACAZES – RJ  
FEVEREIRO - 2009

UTILIZAÇÃO DA VARIAÇÃO DENDROMÉTRICA COMO  
INDICADOR PARA O MANEJO DA IRRIGAÇÃO DE PLANTAS DE  
CAFÉ

**LUCAS FERNANDES DE SOUZA**

Dissertação apresentada ao Centro de Ciências e  
Tecnologias Agropecuárias da Universidade  
Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, como  
parte das exigências para obtenção do título de  
Mestre em Produção Vegetal.

Orientador: Prof. Elias Fernandes de Sousa

CAMPOS DOS GOYTACAZES - RJ  
FEVEREIRO - 2009

UTILIZAÇÃO DA VARIAÇÃO DENDROMÉTRICA COMO  
INDICADOR PARA O MANEJO DA IRRIGAÇÃO DE PLANTAS DE  
CAFÉ

**LUCAS FERNANDES DE SOUZA**

Dissertação apresentada ao Centro de Ciências e  
Tecnologias Agropecuárias da Universidade  
Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro,  
como parte das exigências para obtenção do  
título de Mestre em Produção Vegetal.

Aprovada em 18 de fevereiro de 2009

Comissão Examinadora

---

Prof. Everardo Chartuni Mantovani (D. Sc., Agronomia) – UFV

---

Prof. Luiz Roberto Angelocci (D. Sc., Ciências) – ESALQ

---

Prof. Marco Antônio Oliva Cano (Dr. Rer. Nat.) – UFV

---

Prof. Elias Fernandes de Sousa (D. Sc., Produção Vegetal) - UENF  
Orientador

## AGRADECIMENTO

A Deus, Pai amado e maravilhoso, toda honra e toda a glória.

À Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro (UENF) pela oportunidade da realização do curso de mestrado.

À minha amada e querida esposa Letícia pelo companheirismo, amor, força, ajuda e atenção.

À minha família pelo apoio, amor e compreensão.

Ao professor Elias Fernandes de Sousa (Orientador) pelo apoio, orientação, amizade e confiança.

Ao professor Everardo Chartuni Mantovani pela confiança, amizade e apoio.

Ao professor Marco Antônio Oliva Cano pelos ensinamentos, apoio e suporte e amizade.

Ao professor Luiz Roberto Angelocci pelo apoio, orientação e amizade.

À Universidade Federal de Viçosa (UFV) pela área e equipamentos utilizados.

Aos meus grandes amigos, Carol, Danilo e Thales, pela amizade e grande força. Sem vocês não teria conseguido.

Ao Sr. Edson, proprietário do Sítio Jatobá, pelo apoio.

A todos os meus amigos de Campos e Viçosa que contribuíram para a realização deste trabalho, muito obrigado!

## SUMÁRIO

RESUMO .....	V
ABSTRACT .....	VII
1. INTRODUÇÃO .....	1
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	3
2.1. Origem e Importância Econômica do Cafeeiro .....	3
2.2. Estimativa da Necessidade Hídrica do Cafeeiro.....	4
2.3. Irrigação do Cafeeiro .....	7
2.3.1. Importância da irrigação no café.....	7
2.3.2. Métodos de irrigação do cafeeiro .....	8
2.4. Indicadores da Cultura como Métodos de Estimativa do Estresse Hídrico	10
2.4.1. Fluxo de seiva (FS).....	12
2.4.2. Monitoramento do diâmetro do caule (MDC) .....	13
3. MATERIAL E MÉTODOS.....	16
3.1. Material Vegetal e Condições Experimentais .....	16
3.2. Aplicação dos Tratamentos .....	16
3.3. Construção e Calibração dos Dendrômetros.....	17
3.4. Variáveis Avaliadas .....	19
3.4.1. Medições do diâmetro do caule .....	19
3.4.2. Medições da densidade do fluxo de seiva .....	20
3.4.3. Potencial da água foliar na antemanhã ( $\Psi_{wf}$ ).....	21
3.4.4. Área foliar total.....	22

3.4.5. Determinação das trocas gasosas.....	22
3.4.6. Dados climáticos.....	23
3.4.7. Delineamento experimental e análise estatística.....	24
4. RESULTADOS.....	25
4.1. Construção e Calibração dos Dendrômetros.....	25
4.2. Avaliação do Funcionamento dos Dendrômetros.....	26
4.3. Variação Diária do Diâmetro do Caule.....	29
4.4. Amplitude Diária Máxima (ADM) como Indicador do Estresse Hídrico..	30
4.5. Máximo e Mínimo Diâmetro do Caule (Mndt e Mxdt) como Indicadores do Estresse Hídrico.....	42
5. DISCUSSÃO.....	45
6. RESUMO E CONCLUSÕES.....	54
7. RECOMENDAÇÕES.....	56
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	57

## RESUMO

SOUZA, Lucas Fernandes, M.Sc.; Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro; Fevereiro de 2009; Utilização da Variação Dendrométrica como Indicador para o Manejo da Irrigação de Plantas de Café; Orientador: Elias Fernandes de Sousa.

Este trabalho foi executado com o objetivo de avaliar o uso das microvariações do diâmetro do caule na detecção do déficit hídrico, visando o manejo da irrigação em plantas jovens de café. Foram utilizados dois tratamentos, sendo que, em um, as plantas foram irrigadas continuamente e, no outro, as plantas foram desprovidas de água, retornando a irrigação quando o potencial da água foliar ( $\Psi_{wf}$ ) atingiu um valor entre -2,0 e -3,0 MPa. As plantas foram cultivadas em vasos de 22 L, com solo na proporção de 3:2:1, sendo argila:areia:composto, respectivamente, em casa de vegetação. Foram avaliadas as variações do diâmetro do caule, através dos parâmetros de amplitude diária máxima (ADM), mínimo e máximo diâmetro do caule do dia (Mndt e Mxdt), variação do diâmetro mínimo e máximo (Dmin e Dmax), densidade de fluxo de seiva ( $J_s$ ), potencial da água foliar na antemanhã ( $\Psi_{wf}$ ), área foliar total e determinação das trocas gasosas ( $A$  e  $g_s$ ). A ADM das plantas sem restrições hídricas apresentou relação direta e linear com algumas variáveis climáticas ( $T_{med}$ , DPV e  $ET_0$ ). Durante o primeiro ciclo, as plantas submetidas ao estresse hídrico apresentaram um rápido aumento da ADM, seguido pelo decréscimo do  $\Psi_{wf}$ , Dmin,  $J_s$ , Mndt, e, por último, a diminuição do Mxdt e Dmax. O aumento da ADM se deu até um determinado valor de potencial da água foliar na antemanhã ( $\Psi_{wf} =$

-1,3 MPa), quando começou a diminuir. No segundo ciclo, as plantas submetidas ao estresse hídrico também apresentaram um aumento na ADM até um valor de potencial da água foliar na antemanhã ( $\Psi_{wf} = -1,65$  MPa), decrescendo posteriormente, porém em um período de tempo superior ao apresentado no primeiro ciclo. As demais variáveis ( $D_{min}$ ,  $M_{ndt}$ ,  $M_{xdt}$ ,  $D_{max}$ ,  $A$  e  $g_s$ ) das plantas desprovidas de água apresentaram diminuição, associada ao aumento da ADM, também em um período de tempo maior que o ocorrido no primeiro ciclo. A partir desses resultados, pode-se concluir que a ADM está relacionada com as condições climáticas e a transpiração da planta e refletiu satisfatoriamente a variação do  $\Psi_{wf}$ . Além disso, a ADM indicou precocemente o estresse hídrico em plantas jovens de café, quando comparada com as medições do  $\Psi_{wf}$ .

## ABSTRACT

SOUZA, Lucas Fernandes, M.Sc.; Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro; February 2009; Utilization of Dendrometric Variations for Indicator to the Coffee Plants Irrigation Scheduling; Adviser: Elias Fernandes de Sousa.

This work was carried out with the aim to evaluate the use of microvariations of trunk diameter for detection the water deficit, to use it on the young coffee plants irrigation scheduling. It was carried out two treatments, which one, the plants were irrigated continually and the other treatment the plants were submitted to water deficit, after which plants were rewatered when leaf water potential ( $\Psi_{wf}$ ) reached a value between -2,0 and -3,0 MPa. The plants were grown in pots of 22 L, with soil at a ratio of 3:2:1, which clay:sand:compost, respectively, under green house. It was evaluated trunk diameter fluctuations, based on parameters of maximum daily shrinkage (MDS), minimum and maximum daily trunk diameters (Mndt and Mxdt), trunk growth expressed as daily minimum and maximum diameters (Dmin and Dmax), sap flow density ( $J_s$ ), pre-dawn leaf water potential ( $\Psi_{wf}$ ), total leaf area and gas exchange ( $A$  e  $g_s$ ). In the fully irrigation plants, MDS observations correlated linearly and directly with climate variables ( $T_{med}$ , VPD and  $ET_0$ ). During the first cycle, the plants submitted to water stress showed a rapid increase in MDS, followed by a decrease in  $\Psi_{wf}$ , Dmin,  $J_s$ , Mndt, and finally a reduction in Mxdt and Dmax. The increase in MDS values was associated with a decreases in  $\Psi_{wf}$  at values above the threshold value of -1,3 MPa, when it started to decline. At the second cycle, the plants submitted to water

stress showed the same behavior, with an increase in MDS associated with a decrease in  $\Psi_{wf}$  at values above the threshold value of -1,65 MPa, decreasing thereafter, but in a longer period than shown in the first cycle. The other parameters of the plants submitted to water deficit ( $D_{min}$ ,  $M_{ndt}$ ,  $M_{xdt}$ ,  $D_{max}$ ,  $A$  e  $g_s$ ) showed a decrease, were associated with increases in MDS, and similarly, in a longer period than shown in the first cycle. The above mentioned results indicate that the MDS signal is correlated with climatic conditions and plant transpiration and reflected satisfactorily the variations of  $\Psi_{wf}$ . Furthermore, the MDS signal showed the early water stress in young coffee plants, compared with the  $\Psi_{wf}$  parameter.

## 1. INTRODUÇÃO

O Brasil é o maior produtor de café do mundo, com produção de 32,06 milhões de sacas de 60 kg (22,3 milhões de café arábica) na safra 2007/08, sendo que Minas Gerais foi o Estado que mais contribuiu nesta produção com 44,8% de participação (ABC, 2007).

Grande parte desta contribuição de Minas Gerais se deve ao fato da expansão da lavoura cafeeira para regiões anteriormente consideradas impróprias, devido ao elevado déficit hídrico, destacando-se o Triângulo Mineiro e o Alto Paranaíba (Soares et al., 2005).

O aumento da escassez de água doce no mundo e a expansão da área cultivada para regiões que possuem prolongados períodos de déficit hídrico, com o agravante de regiões onde outrora não havia problemas com déficit hídrico e que, devido às adversidades climáticas, hoje necessitam de água para serem cultivadas, exigem que a irrigação seja realizada com um manejo racional, devido à forte competição pela água.

Na busca de um manejo racional da irrigação, novas técnicas para detectar a deficiência hídrica nas plantas estão sendo desenvolvidas. As técnicas mais promissoras são aquelas baseadas nas próprias plantas, pois estas se mostraram mais eficientes do que as técnicas que utilizam fatores ambientais na indicação do déficit hídrico (Remorini e Massai, 2003). Dentre estas técnicas, pode-se citar as medições do potencial da água foliar na antemanhã e ao meio dia, da condutância

estomática à difusão de vapor, da temperatura do dossel foliar, do fluxo de seiva e do monitoramento do diâmetro do caule (Ortuño *et al.*, 2005; Jackson, 1982).

O fluxo de seiva (FS) e o monitoramento do diâmetro do caule (realizado através de dendrômetros) estão sendo considerados promissoras ferramentas no manejo da irrigação, pois estas técnicas permitem uma resposta automática e confiável da condição hídrica do solo (Eastman e Gray, 1998; Goldhamer *et al.*, 1999; Ortuño *et al.*, 2006).

Além do mais, estas duas técnicas têm como características uma relativa facilidade nos procedimentos de medição, envolvem poucos trabalhos em laboratórios e as medições são realizadas no campo, em tempo real.

As medições do fluxo de seiva e do monitoramento do diâmetro do caule, através da amplitude diária máxima (ADM), da variação do diâmetro mínimo (Dmin), da variação do diâmetro máximo (Dmax), da evolução do diâmetro mínimo (Mndt) e da evolução do diâmetro máximo (Mxdt) estão sendo avaliados para o manejo da irrigação, por se tratarem de medições baseadas nas próprias plantas e por estas técnicas conseguirem refletir as interações entre a quantidade de água disponível no solo para a planta e a demanda hídrica da atmosfera.

Estas e outras técnicas estão sendo estudadas a fim de alcançar uma maior eficiência do uso da água, ou seja, maior produção agrícola com menor consumo de água.

Portanto, os objetivos deste trabalho são desenvolver um dendrômetro eventualmente comercializável de baixo custo, capaz de realizar confiavelmente o monitoramento do diâmetro do caule de plantas de café e de verificar se este monitoramento, através dos parâmetros ADM, Dmin, Dmax, Mndt e Mxdt, pode ser utilizado na detecção do estresse hídrico, visando à utilização destes na programação da irrigação e, também, capaz de verificar se há uma relação entre a ADM com a temperatura do ar, com o déficit de pressão de vapor e com a evapotranspiração de referência.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1. Origem e Importância Econômica do Cafeeiro

Dentro do gênero *Coffea* existem duas espécies comercialmente importantes: *C. arabica* L. e *C. canephora* Pierre. No Brasil, cerca de 80 % da produção são provenientes de lavouras formadas com cultivares da espécie *C. arabica* L. e 20 %, de cultivares da espécie *C. canephora* (ABC, 2007).

A espécie *Coffea arabica* é nativa de uma região restrita, marginal às demais espécies, localizada no sudoeste da Etiópia, sudeste do Sudão e norte do Quênia, entre 1.000 e 2.000 m de altitude, 5-8º de latitude norte e 34-38º de longitude Leste de Greenwich (Carrier, 1978; Bridson, 1982).

No Brasil, a cultura do cafeeiro tem uma destacada importância no desenvolvimento econômico e social, propiciando um aumento de divisas e um desenvolvimento regional acentuado. A atividade cafeeira é uma importante fonte de renda para mais de 20 milhões de pessoas ligadas ao seu cultivo, processamento de pós-colheita, transporte e comercialização (Maestri et al., 2001).

O Brasil é o maior produtor mundial desse produto agrícola, tendo como maiores concorrentes o Vietnã e a Colômbia. Além de ser o maior produtor, o Brasil é o maior exportador e o segundo maior consumidor mundial de café, com um consumo anual de 16,9 milhões de sacas de 60 kg (ABIC, 2007).

Na pauta de exportações brasileiras de café, predomina o grupo de produtos básicos (representando entre 86 e 91% do valor exportado no período), e esse grupo é formado quase que completamente por café não-torrado, não descafeinado, em grão. A União Européia é o destino mais importante do café exportado pelo Brasil, representando 53% do valor total em 2002 (Vicente, 2004).

Dentre os estados brasileiros produtores de café, Minas Gerais participa com maior parte da produção nacional. A maior concentração de lavoura de café se encontra na região sul do Estado, tradicionalmente produtora de cafés finos, com excelente qualidade de bebida (Mendes et al., 1995).

O Rio de Janeiro chegou a ser o maior produtor de café do Brasil do século XX, produzindo cerca de 3,5 milhões de sacas nos anos 50. Na década de 60, a área cultivada foi drasticamente reduzida, devido a um programa de diversificação, associado a problemas fitossanitários (Barbosa et al., 2006), culminando na pouca expressão atual no cenário cafeicultor nacional.

Atualmente, o Rio de Janeiro é o oitavo Estado brasileiro em produção de café, com 0,7% do total produzido na safra 2007/2008, cuja principal produção é do café arábica, tendo como principal produtora a região Noroeste do Estado (ABC, 2007).

Alguns fatores são determinantes para que o Rio de Janeiro não consiga recuperar e expandir a cafeicultura. Como principais fatores têm-se o baixo nível tecnológico dos produtores e a falta de incentivo e assistência técnica, culminando com baixas produtividades.

## 2.2. Estimativa da Necessidade Hídrica do Cafeeiro

Embora originalmente seja uma espécie adaptada à sombra, no Brasil, o cafeeiro é cultivado a pleno sol, com produções economicamente satisfatórias e, geralmente, maiores que o plantio sob sombra, desde que a disponibilidade hídrica do solo não seja um fator limitante à sua produtividade (Damatta, 2000).

O plantio de café no Brasil está geralmente situado em regiões em que as condições climáticas e o balanço hídrico são favoráveis. Porém, devido à

expansão da cafeicultura, hoje se produz café de excelente qualidade utilizando a irrigação em regiões anteriormente consideradas marginais, com períodos extensos de deficiência hídrica (Rotondano, 2004).

O estudo das relações hídricas no cafeeiro é de particular interesse, uma vez que pequenas reduções na disponibilidade de água podem diminuir substancialmente o crescimento, ainda que não se observem murchas nas folhas ou quaisquer outros sinais visíveis de déficit hídrico (Damatta e Maestri, 2000).

O grau de abertura estomática do cafeeiro pode variar até mesmo com o consumo de pequena quantidade da água disponível no solo. Foi verificado um decréscimo da taxa de crescimento do cafeeiro quando houve redução da condutância estomática (Barros et al., 1997).

A manutenção da turgescência foliar do café em solos com déficit hídrico pode ser explicada pela capacidade que a planta de café tem em fechar os estômatos, quando apenas uma pequena parte da água contida do solo é utilizada pela planta, e pela eficiência do sistema radicular do cafeeiro em extrair água das camadas mais profundas do solo (Damatta e Maestri, 2000).

Irigar uma cultura, ou seja, aplicar água artificialmente em quantidades adequadas e com determinadas frequências, requer conhecimento de três fatores: do solo, do clima e da própria cultura.

O quanto se deve irrigar está baseado no cálculo da evapotranspiração potencial da cultura, enquanto que a frequência de irrigação está diretamente ligada à quantidade de água retida no volume de solo ocupado pela zona radicular e à facilidade com que a planta absorve esta água.

Os métodos mais populares utilizados na programação da irrigação são baseados na evapotranspiração da cultura, através das condições atmosféricas e/ou monitoramento da água no solo (Fererres et al., 1999; Mantovani et al., 2007).

A evapotranspiração é um fenômeno combinado, no qual a água é transferida da superfície terrestre para a atmosfera, em um processo que envolve a evaporação da água líquida da superfície do solo e da água interceptada pelas plantas, mais a transpiração da planta (Jensen et al., 1990).

Como cada cobertura vegetal possui exigências particulares, a evapotranspiração varia de acordo com esta. Devido a isso, foi preciso estabelecer uma cobertura vegetal de referência para, a partir dela, ajustar a

evapotranspiração das demais. Então, surgiram os conceitos da evapotranspiração de referência (ET<sub>o</sub>) e da evapotranspiração da cultura (ET<sub>c</sub>).

A ET<sub>o</sub> pode ser definida como sendo a evapotranspiração de uma cultura hipotética, de porte baixo (0,12 m), com refletividade (albedo) de 0,23 e uma resistência de superfície de 70 s m<sup>-1</sup> (Allen et al., 1998).

Para determinar as necessidades hídricas da cultura, o método mais usual é baseado na estimativa da evapotranspiração da cultura (ET<sub>c</sub>) (Mudrik, 2005). Considerando uma disponibilidade inicial de água no solo, a determinação da ET<sub>c</sub> permite, a qualquer momento, definir a quantidade de água utilizada, possibilitando a identificação do momento da irrigação e da lâmina de água necessária (Mantovani, 1996).

O cálculo da ET<sub>c</sub> é realizado em duas etapas. Primeiro, calcula-se a ET<sub>o</sub>, que representa a demanda de uma região qualquer, utilizando-se a equação de Penman-Monteith (Allen et al., 1998). Depois, multiplica-se a ET<sub>o</sub> pelo coeficiente K<sub>c</sub> (Mantovani et al., 2007).

A ET<sub>c</sub> é o principal parâmetro na determinação da lâmina necessária de irrigação para o cafeeiro, visto que pode-se manter a eficiência de irrigação mesmo reduzindo este parâmetro, nos casos onde não se molha toda a superfície do solo (irrigação localizada), quando o intervalo for grande entre irrigações e quando existir queda de folhas na ocorrência de pragas e doenças (Mudrik, 2005).

O coeficiente da cultura (K<sub>c</sub>) varia de acordo com a fase fenológica, com o manejo, com o estande das plantas e, também, com as condições climáticas e épocas de plantio, já que os parâmetros locais (temperatura, umidade relativa, vento, radiação solar) e as variações fisiológicas e aerodinâmicas da cultura influenciam diretamente a evapotranspiração (Pruitt et al., 1972).

Pode-se observar a distribuição temporal do k<sub>c</sub>, para cada ambiente irrigado, através de uma curva denominada curva da cultura. Essa curva representa o efeito integrado de mudanças na área da folha, na altura da planta, no grau de cobertura, na resistência do dossel da planta e do albedo sobre a ET<sub>c</sub> em relação à ET<sub>o</sub> (Sediyama, 1996).

Para culturas perenes, no caso do cafeeiro, a curva de k<sub>c</sub> apresenta valores baixos nos períodos de formação e estabelecimento da cultura. No momento que atinge um dossel máximo, a curva do K<sub>c</sub> tende a se estabilizar com valores máximos próximos a unidade, surgindo oscilações ao longo do tempo

provenientes de processos fisiológicos e de manejo da cultura (Doorenbos e Kassam, 1979).

Os valores de Kc para cafeeiros cultivados em várias regiões do mundo apresentam uma faixa típica de 0,7 a 0,8, levando-se em conta que, em geral, essas estimativas têm sido obtidas por métodos hidrológicos, ou avaliando a variação da umidade do solo (Bonomo, 1999).

## 2.3. Irrigação do Cafeeiro

### 2.3.1. Importância da irrigação no café

A irrigação é realizada com o objetivo de eliminar o déficit hídrico durante todo o ciclo da cultura, ou em algumas fases específicas, como ocorre em locais com deficiência hídrica moderada. Sem a irrigação, poderá haver perdas na produção e na qualidade final do produto.

Vários autores citam a importância da irrigação nos cafezais, no seu desenvolvimento vegetativo (Fernandes et al., 1998; Karasawa, 2001 e Martins et al., 2002).

Em regiões com déficit hídrico superior a 150 mm (áreas marginais) e nas regiões onde o déficit hídrico não é fator limitante, mas que estão sujeitas à ocorrência de veranicos ou secas prolongadas nos períodos críticos, a irrigação é essencial para se obter elevada produtividade em cafeeiros (Faria e Rezende, 1997).

A deficiência hídrica limita a produção primária dos ecossistemas e o rendimento das culturas, principalmente pelas restrições que impõe à fixação fotossintética do gás carbônico (CO<sub>2</sub>) e ao crescimento da plantas (Mudrik, 2005).

A necessidade hídrica do cafeeiro é bastante variável, de acordo com as fases da planta. No Brasil, no período de vegetação e frutificação, o cafeeiro é mais exigente em água. Na fase de colheita e repouso, a deficiência hídrica normal é até benéfica, pois é necessário para que se completem eventos morfofisiológicos que permitam às gemas florais reassumirem o crescimento, permitindo floradas mais uniformes (Matiello, 1991; Damatta e Rena, 2000).

Existem três estádios do café, onde o déficit hídrico pode afetar com maior intensidade a produtividade: o período pré-florada, a expansão do fruto e o enchimento dos grãos (Soares, 2005),

A deficiência hídrica pode provocar, durante o período de pré-florada, a má formação dos botões florais, assim como a queda destes, diminuindo assim, a produtividade.

Durante a expansão do fruto, o déficit hídrico pode provocar a queda dos frutos, bem como agir negativamente no crescimento do pergaminho (endocarpo endurecido), afetando o crescimento do grão.

No enchimento dos grãos, o severo estresse hídrico pode provocar a má formação dos grãos, acarretando o surgimento dos grãos chochos (Soares, 2005). A quantidade de água aplicada é essencial ao tamanho final do grão cereja. A expansão celular, que delimita o tamanho da semente e que caracteriza essa fase, é sensível ao déficit hídrico (Rena e Maestri, 1987).

### 2.3.2. Métodos de irrigação do cafeeiro

A irrigação em cafeeiros já é uma prática bastante recomendada na maioria das regiões produtoras do país. Com o uso da irrigação em cafeeiros, cafés com excelente qualidade são produzidos em regiões com elevado déficit hídrico, destacando-se o Triângulo Mineiro e o Alto Paranaíba em Minas Gerais, o Norte do Espírito Santo e a região Oeste da Bahia (Mantovani, 2003).

A escolha do sistema de irrigação para cafezais deve levar em conta, principalmente, o custo dos equipamentos, os gastos operacionais, a disponibilidade e qualidade da água e o aumento de produção (Bonomo, 1999).

São variados os sistemas de irrigação utilizados na cafeicultura, podendo destacar a irrigação localizada por gotejamento, a irrigação por aspersão convencional, o autopropelido, o pivô central e os sistemas simplificados, com mangueiras simples ou perfuradas. A irrigação do cafeeiro tem sido realizada, preferencialmente, com uso de sistemas pressurizados: por aspersão ou localizada (Soares et al., 2001).

Um dos métodos de irrigação por aspersão utilizado é o pivô central. Este sistema opera sob pressão e lança o jato d'água no ar, o qual é fracionado em gotas, caindo sob o terreno em forma de chuva (Bernardo et al., 2005). Entre as principais vantagens deste método estão: economia de mão-de-obra; manutenção do mesmo alinhamento e velocidade em todas as irrigações e boa uniformidade de aplicação. Porém, este método apresenta algumas desvantagens: custo inicial relativamente alto; perda de 20% da área irrigada (caso a área utilizada seja um retângulo ou quadrado) e alta intensidade de aplicação na extremidade da linha do pivô, o que pode acarretar escoamento superficial (Mantovani et al., 2007).

Na irrigação localizada, a água é aplicada diretamente no solo, na região radicular da cultura, com pequena intensidade e alta frequência, enquadrando-se as irrigações por gotejamento e microaspersão.

Os sistemas de irrigação que aplicam água de forma localizada se caracterizam pela economia de água, pela pequena utilização de mão-de-obra, pelo grande potencial de automatização, pela manutenção de elevados níveis de água no solo para melhorar o desenvolvimento das culturas, pela possibilidade de se adequar às condições de solos pedregosos, rasos e topografia acidentada, pela possibilidade de aplicação de produtos químicos em solução na água de irrigação e pela redução dos riscos de contaminação das culturas (Scaloppi, 1986). Outra importante vantagem da irrigação localizada é a eficiência do uso da água (Bernardo, 2005). Ainda, como vantagens do sistema de irrigação localizada, têm-se a economia de fertilizantes, a redução de custos culturais e o aumento em produtividade (Hanson e Lamm, 1995). Todas essas são razões pelas quais a utilização destes sistemas tem crescido no Brasil.

O sistema de irrigação localizada apresenta algumas desvantagens como: a possibilidade de entupimento dos emissores, o custo de implantação elevado e o efeito negativo no crescimento radicular, ocorrendo o confinamento das raízes dentro da área do bulbo irrigado; desfavorecendo o crescimento destas e o aproveitamento da água das chuvas, no período úmido (Vasconcelos et al., 2008).

#### 2.4. Indicadores da Cultura como Métodos de Estimativa do Estresse Hídrico

Mundialmente, a quantidade de água doce disponível para o uso em geral e, especificamente, para a irrigação está diminuindo. Por isso, existe uma grande preocupação em aumentar a eficiência do uso da água.

Neste sentido, medições do status hídrico da planta têm se tornado uma promissora técnica no manejo da irrigação devido sua dinâmica natural, na qual está diretamente relacionada com as condições climáticas e condições do solo, assim como com a produtividade da cultura (Goldhamer et al., 2003; Remorini e Massai, 2003; Naor, 2006; Ortuño et al., 2006).

Sensores que medem o teor de umidade do solo são bastante utilizados na detecção do estresse hídrico para o manejo da irrigação (Howell, 1996; Phene *et al.*, 1990), incluindo culturas perenes. Apesar de esses sensores serem de fácil uso e a maioria destes poderem realizar monitoramentos contínuos, a escolha do local de instalação dos sensores é um problema, pois a zona radicular de plantas perenes é irregular e usualmente ocupa um grande volume não-uniforme do solo. Além do mais, são necessárias várias medições para representar adequadamente o status hídrico do solo (Russo e Bresler, 1982; Warrick e Nielsen, 1980).

As próprias plantas são as melhores indicadoras do status hídrico por integrarem automaticamente os fatores que afetam o seu estado de hidratação (Kramer e Boyer, 1995). Indicadores da planta como métodos de estimativa do estresse hídrico têm sido usados principalmente em pesquisas, e suas aplicações práticas no manejo da irrigação estão por ser desenvolvidas (Naor, 2003).

Vários indicadores da planta para medição do seu status hídrico têm sido estudados, dentre os quais podemos citar a variação da temperatura da folha, monitorada por sensores de radiação infravermelha (Jackson, 1982); potencial da água na folha com várias técnicas de medidas, como câmara de pressão, método higrométrico (equilíbrio de pressão de vapor), etc (Angelocci, 2002; Améglio et al., 1997; Katerji et al., 1988); a detecção da cavitação dos vasos do xilema através de detector de ultra-som (Hsiao, 1990); a variação da condutância estomática medida por porometria (Angelocci, 2002); entre outros.

O indicador mais usado para avaliar o status hídrico da planta tem sido o potencial da água foliar ( $\psi_{wf}$ ) (Améglio et al., 1999; Hsiao, 1990). O potencial da água foliar na antemã e ao meio dia tem sido o mais popular indicador da

planta para estimativa do estresse hídrico em pomares (Naor, 2003). Outro indicador utilizado é o potencial da água do caule (Choné et al., 2001).

Nas últimas décadas, vários pesquisadores sugeriram o potencial da água foliar ao meio dia como um indicador da planta para o manejo da irrigação em várias fruteiras (Shackel et al., 1997); incluindo maçã (Naor et al., 1995; 1997), nectarina (Naor et al., 1999) e pera (Marsal et al., 2002).

O  $\Psi_{wf}$  mostrou-se adequado para indicar o déficit hídrico para a cultura do café (*Coffea arabica*) e a necessidade de irrigação na região de Lavras/MG (Silva et al., 2000). Os autores observaram que, no período mais quente do dia, as plantas irrigadas proporcionaram um potencial da água menos negativo do que as plantas não irrigadas, demonstrando assim, o bom status hídrico do cafeeiro sob irrigação.

Apesar de todos os indicadores citados serem originários da própria planta, a aplicação prática destes apresenta dificuldades, como por exemplo, na determinação dos dados, por não permitirem a automação das medidas, além da grande dificuldade em se obter relações entre os indicadores citados e o grau de déficit hídrico (Jackson, 1982; Katerji et al., 1988; Hsiao, 1990; Ferreira, 1996; Shackel et al., 1997).

Devido à dificuldade de medição dos indicadores citados, o uso de outros indicadores da planta tem crescido. As medições do fluxo de seiva (FS) e o monitoramento do diâmetro do caule estão sendo usados como indicadores do status hídrico da planta (Moreno et al., 1996; Cohen et al., 2001; Fernández et al., 2001; Goldhamer e Fereres, 2001), e são considerados promissoras ferramentas no manejo da irrigação (Eastman e Gray, 1998; Fernández et al., 2001; Nicolás et al., 2005; Ortuño et al., 2006).

Estes indicadores permitem contínuos e automáticos registros do status hídrico da planta, e uma imediata, consistente e confiável resposta do déficit hídrico (Goldhamer et al., 1999; Ortuño et al., 2004a), reduzindo substancialmente as medições em laboratórios.

### 2.4.1. Fluxo de seiva (FS)

O fluxo de seiva (FS) que passa por um determinado segmento do caule pode ser estimado através de vários métodos, que utilizam como base a dissipação térmica, que faz uso de princípios físicos de transferência de calor.

Um desses métodos, descrito por Granier (1985), tem por princípio o fornecimento contínuo e constante de calor a uma sonda inserida em um segmento de caule ou em ramos. A sonda elaborada por Granier (1985) é constituída por uma agulha aquecida e outra não aquecida, dispostas no sentido longitudinal do fluxo de seiva, e com a agulha aquecida inserida a jusante do fluxo. Através da diferença de temperatura entre as duas agulhas no segmento de caule é possível determinar a velocidade de transporte convectivo da seiva. O método de dissipação de calor foi desenvolvido originalmente para medida de fluxo de seiva em espécies florestais.

A diferença de temperatura entre as duas agulhas está relacionada com o transporte convectivo de calor pela seiva. Portanto, a máxima diferença entre a temperatura entre os dois pontos de medida, que normalmente ocorre ao amanhecer, significa que o fluxo de seiva é mínimo ou nulo, enquanto que a mínima diferença, ocorrendo aproximadamente às 16 horas, significa uma taxa máxima de fluxo de seiva através dessa área de transporte (Rojas, 2003).

Granier (1985) verificou, em laboratório, que uma única equação de calibração pode ser utilizada para várias espécies de plantas lenhosas. Em função disso, o autor propôs que essa equação pode ser usada em qualquer planta lenhosa com diâmetro de caule superior a quatro centímetros (Smith e Allen, 1996).

Outros autores testaram este método em condições naturais de campo, em várias espécies de plantas lenhosas (Granier e Bréda, 1996).

Uma das principais fontes de erro deste método pode ser atribuída ao gradiente natural da temperatura do caule, principalmente quando o sensor é colocado muito próximo ao solo (Ferreira e Zitscher, 1996).

O gradiente térmico natural é o efeito da radiação e da temperatura do ar e do solo que atuam no caule, afetando o valor da medida térmica do sensor e que por sua vez acaba afetando, significativamente, a estimativa do fluxo de seiva (Rojas, 2003).

Outra fonte de erro é representada pelas variações espaciais da densidade de fluxo de seiva no lenho, que exige a adequada instalação da sonda (Lu et al., 2000).

A determinação da área efetiva do xilema, também, é uma fonte de erro no método, já que para transformar a densidade de fluxo de seiva na seção transversal do caule em fluxo de água, exige a determinação mais exata possível da área condutiva de seiva no lenho (“xilema efetivo”). Esse fator é uma desvantagem deste método, onde se exige a retirada de uma amostra do lenho para a determinação da área condutiva de seiva.

Foi avaliada a utilização de uma técnica de medição de fluxo de seiva baseada em uma fonte intermitente de calor. Operacionalmente, a disposição das sondas e o equipamento necessário são semelhantes ao utilizado pelo método de Granier, porém a fonte de calor não é aplicada de forma constante, e sim em ciclos de aquecimento e resfriamento. O método foi calibrado para a cultura do cafeeiro e os resultados indicaram a possibilidade de utilização deste método para a medição do fluxo de seiva em plantas de café (Silva, 2008).

#### 2.4.2. Monitoramento do diâmetro do caule (MDC)

O monitoramento do diâmetro do caule (MDC) tem sido proposto como um indicador do status hídrico da planta (Klepper, 1968; Klepper et al., 1971), cuja amplitude é relacionada com a condição hídrica da planta e depende da espécie e da demanda evaporativa do ar (Huguet, 1985; Garnier e Berger, 1986; Huguet e Orlando, 1987; Ginestar e Castel, 1998).

Várias pesquisas com diferentes espécies de plantas anuais, como algodão (Parlange et al., 1975), milho (Katerji et al., 1994), soja (So et al., 1979), e de ramos de plantas lenhosas, como laranjeira (Hilgeman, 1962; Ginestar e Castel, 1998), pessegueiro (Garnier e Berger, 1986; Li et al., 1990; Simonneau et al., 1993; Goldhamer et al., 1999) e oliveira (Michelakis, 1997; Moriana et al., 2000), foram realizadas utilizando o monitoramento do diâmetro do caule, a fim de se obter através deste indicador, o status hídrico das plantas. Os autores concluíram que o monitoramento do diâmetro do caule tem uma relação direta e

significativa com o potencial da água foliar na antemanhã, além de ser um confiável critério para indicar o início do stress hídrico das plantas submetidas a variadas condições ambientais.

Em vários trabalhos com fruteiras, foi encontrada boa correlação entre a contração e dilatação do caule e as mudanças do status hídrico das plantas (Huguet et al., 1992; Ginestar e Castel, 1996; Cohen et al., 1997).

Como a variação do diâmetro do caule é muito pequena, é necessário utilizar um aparelho muito sensível. Um dos primeiros equipamentos utilizados para medir a variação do diâmetro do caule foi o “dendrógrafo” (Hilgeman, 1962). Este aparelho amplificava os valores micrométricos numa banda registradora sobre um tambor.

Com o desenvolvimento de dendrômetros mais modernos, como os descritos por diversos autores (So et al., 1979; Higgs e Jones, 1984; Huguet, 1985; Simonneau et al., 1993), e o aumento da qualidade e disponibilidade dos coletores de dados eletrônicos, a utilização do MDC obteve renovada atenção nas pesquisas como indicador do status hídrico da planta.

Estes aparelhos utilizam extensômetros fixos sobre um braço de aço, onde a menor fração de movimento do braço pode ser detectada na forma de sinais elétricos que, posteriormente, são convertidos em sinais micrométricos.

Algumas variáveis do monitoramento do diâmetro do caule (amplitude diária máxima, máximo valor do diâmetro do caule e mínimo valor do diâmetro do caule) podem ser utilizadas no manejo da irrigação. Algumas destas variáveis foram comparadas com indicadores convencionais do status hídrico da planta, como condutância estomática, fotossíntese, crescimento de fruto e potencial da água foliar, em árvores de pêssigo, e concluiu-se que as variáveis derivadas do MDC foram mais sensíveis do que os outros indicadores e, também, indicaram que a planta já estava sob um estresse hídrico antes dos indicadores convencionais (Goldhamer et al., 1999).

O diâmetro do caule oscila em um ciclo de 24 horas, alcançando um valor máximo (Mxdt) um pouco antes do nascer do sol e um valor mínimo (Mndt) no período da tarde (Goldhamer e Fereres, 2001).

A diferença entre Mxdt e Mndt é conhecida como amplitude diária máxima (ADM). Esta variável é a mais utilizada no manejo da irrigação, pois possui uma relação direta com outras variáveis indicadoras do estresse hídrico da planta, ou

seja, quando o estresse hídrico da planta aumenta, a ADM também aumenta (Garnier e Berger, 1986; Cabibel e Isberie, 1997).

Outras variáveis também são utilizadas, como a variação do diâmetro máximo ( $D_{max}$ ), que é a diferença entre o máximo valor do diâmetro registrado no dia e o máximo valor do dia anterior, e a variação do mínimo diâmetro ( $D_{min}$ ), que é a diferença entre o mínimo valor do diâmetro registrado no dia e o mínimo valor do dia anterior (Goldhamer et al. 1999). Ainda, segundo os autores, estas duas variáveis representam a razão de crescimento do caule e este pode ser um dos primeiros sinais do estresse hídrico.

Em um trabalho realizado com pessegueiros, Goldhamer e Fereres (2001) observaram que, quando não havia diferença entre os tratamentos, a variação do diâmetro mínimo ( $D_{min}$ ) das plantas controle foi consistentemente maior do que a das plantas sob déficit hídrico e este comportamento foi similar ao potencial da água do caule, oferecendo assim, um indicador mais confiável do que a ADM para o manejo da irrigação.

Pesquisas realizadas em plantas de milho (Katerji et al., 1994) e citrus (Ginestar e Castel, 1998) indicaram que o  $M_{xdt}$  se relacionou melhor com algumas variáveis indicadoras do estresse hídrico do que com a ADM. Para plantas de milho, o  $M_{xdt}$  se relacionou muito melhor com o potencial da água da folha na antemanhã, com a condutância estomática e com a fração de água transpirada do solo.

Enquanto a ADM se mantinha estável durante a elevação gradativa do estresse hídrico, o  $M_{xdt}$  apresentou uma tendência negativa (Katerji et al., 1994). Porém, um trabalho com pessegueiro, em casa de vegetação, apresentou uma relação inversamente proporcional entre a ADM e o  $M_{xdt}$  (LI et al. 1990). Isto demonstra que o uso de determinada variável varia com o estudo em questão e com o comportamento da espécie estudada durante o estresse hídrico.

A vantagem da medição da variação do diâmetro do caule reside na sensibilidade do método em detectar o balanço hídrico da planta. O ponto desfavorável é que a representatividade da medida como indicador do déficit hídrico não é universal, devendo ser determinada para a espécie estudada a partir da sua relação com outros indicadores como potencial da água da folha, potencial matricial do solo, condutância estomática e transpiração da planta (Rojas, 2003).

### 3. MATERIAL E MÉTODOS

#### 3.1. Material Vegetal e Condições Experimentais

O experimento foi conduzido sob condições de casa de vegetação, na Unidade de Crescimento de Plantas (UCP), na Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.

O material vegetal utilizado foi o cafeeiro (*Coffea arábica*) cv Catuaí Vermelho IAC 44, com aproximadamente um ano de idade. As plantas estavam condicionadas em vasos plásticos de 22 litros, com solo na proporção de 3:2:1, sendo argila:areia:composto, respectivamente.

#### 3.2. Aplicação dos Tratamentos

A aplicação dos tratamentos foi realizada 15 dias após a transferência das plantas para os vasos. Este tempo foi necessário para que houvesse um melhor condicionamento das plantas. O experimento consistiu de dois ciclos de seca/irrigação, onde em cada ciclo houve dois tratamentos, irrigado e não irrigado.

No tratamento irrigado, as plantas foram irrigadas em dias alternados, manualmente, sempre mantidas na capacidade de campo. Para o tratamento sem

irrigação, as plantas foram desprovidas totalmente da água. No momento que as plantas alcançaram um  $\Psi_{wf}$  entre -2,0 e -3,0 MPa, indicando um estresse hídrico severo (Damatta e Rena, 2000), o tratamento foi suspenso, retornando a irrigação em todas as plantas.

Tanto as medições destrutivas quanto as não destrutivas foram realizadas em folhas totalmente expandidas, no terço médio das plantas. No primeiro ciclo foram realizadas as seguintes avaliações: medições do diâmetro do caule, densidade de fluxo de seiva,  $\Psi_{wf}$  e área foliar total.

Para o segundo ciclo, foram mantidas as seguintes avaliações: medições do diâmetro do caule,  $\Psi_{wf}$  e área foliar total. Foi acrescentada a determinação das trocas gasosas.

Durante todo o período experimental, dados climáticos dentro da casa de vegetação foram obtidos.

### 3.3. Construção e Calibração dos Dendrômetros

Os dendrômetros foram desenvolvidos baseados em dendrômetros comerciais, com dimensões e materiais semelhantes. Foram construídos em forma de “U”, onde cada lado possuía 10 cm de comprimento, podendo ser acoplados em caules com diâmetros inferiores a este valor. Constava, também, de um parafuso que realizava o ajuste do dendrômetro no caule (Figura 1).



Figura 1. Foto ilustrativa do dendrômetro construído no LEAG/UENF, Campos dos Goytacazes - RJ, para o monitoramento do diâmetro do caule de plantas jovens de café.

Os materiais utilizados para a construção foram alumínio e aço. O alumínio foi utilizado por ser um material um tanto flexível e que não é muito influenciado pela temperatura ambiente. O aço foi utilizado para acoplar o elemento sensor, extensômetros eletrônicos (modelo PA-13-125HA-350L, EXCEL SENSORES, BR).

Após acoplar os sensores nos dendrômetros, estes foram envoltos por uma camada de silicone, com o objetivo de protegê-los das intempéries climáticas (chuva e vento) que possam influenciar as leituras. Após a camada de silicone, os sensores foram envoltos com papel alumínio para evitar a influência dos raios solares nas leituras.

A tensão de alimentação dos dendrômetros foi de 5 V (corrente contínua) e foi fornecida por um sistema de energia solar, cuja placa receptora estava fora da casa de vegetação.

A calibração dos dendrômetros foi realizada no Laboratório de Engenharia Agrícola (LEAG) da Universidade Estadual do Norte Fluminense (UENF). Os dendrômetros foram conectados ao “datalogger” e alimentados com uma tensão de 5 V através de uma bateria. Mediu-se quantos passos havia em 5 cm de

parafuso e concluiu-se que, ao realizar uma volta completa no parafuso, este ajustaria 1,25 mm.

Com isso, após 10 minutos, período onde o “datalogger” realizou dez leituras, era realizado  $\frac{1}{4}$  de volta no parafuso até completar uma volta e meia, tanto no “aperto” quanto no “afrouxamento”. A cada minuto, o “datalogger” registrava o sinal elétrico enviado pelo dendrômetro. Foi obtida regressão linear entre o sinal elétrico e o respectivo valor real para cada dendrômetro, adquirindo assim, quatro equações de calibração, uma para cada dendrômetro, nas quais convertem o sinal elétrico de saída (em mV), registrado pelo “datalogger”, em deslocamento das hastes do dendrômetro, em mm.

### 3.4. Variáveis Avaliadas

#### 3.4.1. Medições do diâmetro do caule

Os dados do diâmetro do caule foram obtidos utilizando dendrômetros, que foram acoplados ao caule das plantas, 10 cm acima da superfície do solo. Os dendrômetros foram conectados a um datalogger (modelo DL2e, Delta-T Devices Ltd., UK), com leitura do diâmetro a cada um segundo e médias a cada 10 minutos.

Com os dados do diâmetro do caule, foram obtidos diâmetros médios horários que foram utilizados no cálculo das seguintes variáveis: amplitude diária máxima (ADM), obtida entre a diferença do máximo diâmetro do caule do dia (Mxdt) e o mínimo diâmetro do caule do mesmo dia (Mndt). Outra variável obtida foi a variação do diâmetro mínimo e máximo do caule (Dmin e Dmax), calculada entre a diferença do Mndt de dois dias consecutivos ( $Mndt_i - Mndt_{i-1}$ ) e a diferença do Mxdt de dois dias consecutivos ( $Mxdt_i - Mxdt_{i-1}$ ).

### 3.4.2. Medições da densidade do fluxo de seiva

Para a determinação desta variável, utilizou-se o método proposto por Silva (2008), no qual um sensor foi inserido no caule da planta, aproximadamente 5 cm acima da superfície do solo, e envolto por uma manta térmica, possuindo nesta altura um diâmetro variando entre 1,6 e 1,7 cm. O sensor é composto por uma agulha de 1,5 cm de comprimento, apresentando no seu interior um ponto do termopar (circuito formado pela junção das extremidades de dois fios metálicos de materiais diferentes, estando estas junções submetidas a diferentes temperaturas), cobre/constantã e um fio de constantã e também uma resistência, juntamente com uma pasta térmica.

A resistência elétrica aplicava um pequeno fluxo de calor durante 2 minutos. Ao final desse tempo, o fluxo de calor era interrompido, ficando os próximos 3 minutos sem aquecimento. O ciclo total de aquecimento foi de 5 minutos. Um termopar inserido no interior da agulha possibilitava a realização da medição da temperatura durante todo o tempo.

As agulhas estavam conectadas a um datalogger (modelo CR10, Campbell Scientific, USA). A temperatura do termopar foi registrada nos seguintes períodos de tempo: 30 segundos após o início do aquecimento ( $T_{30}$ ), no final do aquecimento ( $T_{120}$ ), 30 segundos após o início do resfriamento ( $T_{150}$ ) e no final do resfriamento ( $T_{300}$ ).

Desta forma, a densidade do fluxo de seiva foi estimada segundo a Equação 1, para o aquecimento e resfriamento (Silva, 2008).

$$u = 116,1 \cdot \sqrt{\ln\left(\frac{1}{\alpha}\right)} \quad \text{Eq. (1)}$$

Em que,

$u$ : densidade de fluxo de seiva ( $10^{-6} \text{ m}^3 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ );

$$\alpha = \frac{\lambda_0}{\lambda} \quad \text{Eq. (2)}$$

$$\frac{1}{\lambda} = \frac{(\Delta T_2 - \Delta T_1) \cdot 4\pi}{q \cdot (\ln t_2 - \ln t_1)}, \text{ na fase de aquecimento da agulha} \quad \text{Eq. (3)}$$

ou,

$$\frac{1}{\lambda} = \frac{(\Delta T_2 - \Delta T_1) \cdot 4\pi}{q \cdot \ln \left[ \frac{t_1 \cdot (t_2 - t_p)}{t_2 \cdot (t_1 - t_p)} \right]}, \text{ na fase de resfriamento da agulha} \quad \text{Eq. (4)}$$

$\Delta T_1$ : temperatura da agulha no tempo 1, no aquecimento ( $T_{30}$ ) ou resfriamento ( $T_{150}$ ) no sensor ( $^{\circ}\text{K}$ );

$\Delta T_2$ : temperatura da agulha no tempo 2, no aquecimento ( $T_{120}$ ) ou resfriamento ( $T_{300}$ ) no sensor ( $^{\circ}\text{K}$ );

$t_1$ : tempo de leitura 1, no aquecimento ( $t_1 = 30$  s) ou no resfriamento ( $t_1 = 150$  s) do sensor (s);

$t_2$ : tempo de leitura 2, no aquecimento ( $t_2 = 120$  s) ou no resfriamento ( $t_2 = 300$  s) do sensor (s);

$t_p$ : período de tempo do pulso de calor aplicado na agulha, 300 s;

$q$ : potência aplicada na resistência elétrica do sensor ( $2,4 \text{ W.m}^{-1}$ );

$\lambda_0$ : condutividade térmica para a condição de fluxo zero ( $^{\circ}\text{K.m.W}^{-1}$ );

$\lambda$ : condutividade térmica para a condição de fluxo qualquer ( $^{\circ}\text{K.m.W}^{-1}$ ); e

$\alpha$ : resposta relativa do sensor (adimensional).

Utilizou-se o horário entre 02:00 (duas da manhã) e 05:00 (cinco da manhã) do dia para o estabelecimento de  $\lambda_0$ , em condição de fluxo zero.

### 3.4.3. Potencial da água foliar na antemanhã ( $\Psi_{wf}$ )

O  $\Psi_{wf}$  foi obtido utilizando uma câmara de pressão de Scholander. As medições foram realizadas antes do nascer do sol, entre às 4 e 5 da manhã, onde foram utilizadas três folhas totalmente expandidas de cada planta, localizadas no terço médio das mesmas. As medições foram realizadas no mesmo local da coleta.

#### 3.4.4. Área foliar total

A área foliar total foi medida no início de cada ciclo e no final do experimento. A área foliar total de cada planta foi determinada por um método indireto adaptado, descrito por MARIN et al. (2005), que consistiu em contar o número de folhas de cada planta e utilizar 30% destas folhas para medir, em cada uma, o maior comprimento e a maior largura.

Calculou-se, então, a área foliar média de cada folha, utilizando a Equação 5. Posteriormente, foi calculada a área foliar média das folhas e multiplicada pelo número total de folhas da planta ( Equação 6).

$$AF_f = (LW \cdot 0,703) \quad \text{Eq. (5)}$$

Onde,

$AF_f$ : Área foliar de cada folha ( $m^2$ );

L: Maior comprimento da folha (m);

W: Maior largura da folha (m);

$$AFT = \overline{AF_f} \cdot NF \quad \text{Eq. (6)}$$

Em que,

AFT: Área foliar total da planta ( $m^2$ );

$\overline{AF_f}$ : Área média das folhas ( $m^2$ );

NF: Número total de folhas da planta.

#### 3.4.5. Determinação das trocas gasosas

As variáveis taxa de assimilação fotossintética líquida ( $A$ ) e condutância estomática ( $g_s$ ) foram determinadas pelo analisador de gás por infravermelho (IRGA) (modelo portátil LI-6400, LI-COR Biosciences Inc., Lincon, Nebraska, USA), equipado com fonte de luz artificial 6400-02B RedBlue. As medições foram realizadas com luz actínica constante ( $1000 \mu\text{mol f\u00f3tons m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ), concentração atmosf\u00e9rica de  $\text{CO}_2$  ( $C_a$ ) ( $\sim 385 \mu\text{mol mol}^{-1}$ ) e temperatura do ambiente ( $27^\circ\text{C} \pm 0,9$ ).

### 3.4.6. Dados climáticos

Os dados climáticos como a temperatura do ar, a umidade relativa e a radiação solar foram registrados em uma estação meteorológica automatizada (Modelo 900 ET, WatchDog, USA), localizada dentro da casa de vegetação, ao lado das plantas. Os dados foram registrados em um intervalo de 30 minutos.

O déficit de pressão de vapor médio diário – DPV (KPa) foi calculado a partir da Equação 7, conforme descrito em Allen et al. (1998):

$$DPV = e_s - e_a \quad \text{Eq. (7)}$$

Onde,

$$e_s = \frac{(e_{(T_{\max})} + e_{(T_{\min})})}{2} \quad \text{Eq. (8)}$$

$$e_{(T_{\max})} = 0,6108 \cdot e^{\frac{(17,27 \cdot T_{\max})}{(T_{\max} + 237,3)}} \quad \text{Eq. (9)}$$

$$e_{(T_{\min})} = 0,6108 \cdot e^{\frac{(17,27 \cdot T_{\min})}{(T_{\min} + 237,3)}} \quad \text{Eq. (10)}$$

$$e_a = \left[ \frac{\left( e_{T_{\min}} \cdot \frac{RH_{\max}}{100} \right) + \left( e_{T_{\max}} \cdot \frac{RH_{\min}}{100} \right)}{2} \right] \quad \text{Eq. (11),}$$

$e_s$ : Pressão de saturação do vapor média (KPa);

$e_a$ : Pressão de vapor atual (KPa);

$e_{T_{\min}}$ : Pressão de saturação do vapor para a mínima temperatura do dia (KPa);

$e_{T_{\max}}$ : Pressão de saturação do vapor para a máxima temperatura do dia (KPa);

$RH_{\max}$ : Umidade relativa máxima do dia (%);

$RH_{\min}$ : Umidade relativa mínima do dia (%).

A evapotranspiração de referência média diária –  $E_{to}$  ( $\text{mm} \cdot \text{dia}^{-1}$ ) foi calculada através da equação de Penman-Monteith - FAO (12), de acordo com Allen et al. (1998). Devido à ausência de vento dentro da casa de vegetação, adotou-se o valor de  $0,5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  como o valor da velocidade do vento.

$$ET_o = \frac{0,408 \cdot (R_n - G) + \gamma \cdot \left( \frac{900}{T + 273} \right) \cdot u_2 \cdot (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma \cdot (1 + 0,34 \cdot u_2)} \quad \text{Eq. (12)}$$

Onde,

ET<sub>o</sub>: evapotranspiração de referência, mm.dia<sup>-1</sup>;

R<sub>n</sub>: radiação líquida na superfície da cultura, MJ.m<sup>-2</sup>.dia<sup>-1</sup>;

G: densidade do fluxo de calor do solo, MJ.m<sup>-2</sup>.dia<sup>-1</sup>;

T: temperatura média diária do ar a 2 m de altura, °C;

u<sub>2</sub>: velocidade do vento a 2 m de altura, m.s<sup>-1</sup>;

e<sub>s</sub>: pressão de vapor de saturação, kPa;

e<sub>a</sub>: pressão atual de vapor, kPa;

e<sub>s</sub> - e<sub>a</sub>: déficit de pressão de vapor de saturação, kPa;

Δ: declividade da curva de pressão de vapor de saturação x temperatura, kPa. °C<sup>-1</sup>

γ: constante psicrométrica, kPa. °C<sup>-1</sup>.

#### 3.4.7. Delineamento experimental e análise estatística

Em um delineamento experimental simples, foram realizados dois tratamentos, com duas repetições (duas plantas irrigadas e duas sem irrigação). As médias entre os tratamentos para as trocas gasosas e potencial da água foliar na antemanhã foram comparadas pelo teste *t* à 5%, com o auxílio do programa estatístico SAS<sup>®</sup> versão 9.0. As correlações de Pearson foram realizadas com auxílio do programa estatístico “SigmaPlot” (Systat Software, Inc., USA), versão 10.0.

## 4. RESULTADOS

### 4.1. Construção e Calibração dos Dendrômetros

Foram construídos quatro dendrômetros para este trabalho, todos com dimensões e formato semelhantes. Os dendrômetros foram calibrados em laboratório, apresentando quatro curvas de calibração (Figura 2).

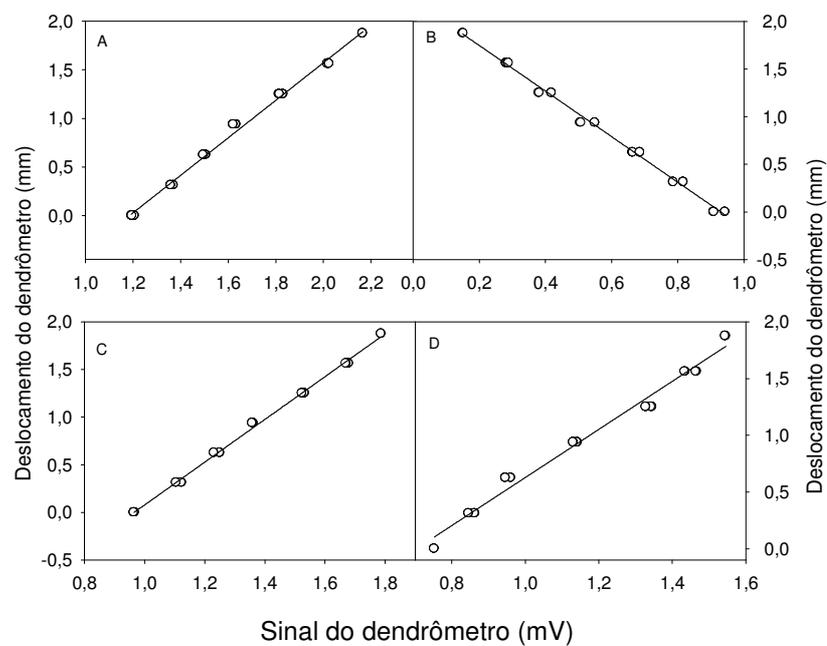


Figura 2. Curvas de calibração para quatro dendrômetros desenvolvidos em laboratório.

Observa-se uma correlação satisfatória entre os valores do deslocamento das hastes do dendrômetro com os valores do sinal analógico obtidos dos sensores, com os valores de  $r^2$  obtidos da regressão linear, sempre próximos da unidade, variando de 0,98 a 0,99 (Quadro 1).

Quadro 1. Coeficientes (a, b), coeficientes de determinação ( $r^2$ ) para equações lineares de primeira ordem ( $Y = a + b.x$ ) entre o sinal dos dendrômetros e valores reais.

Equação	a	b	$r^2$
Dendrômetro 1	-2,2857	1,9291	0,9942
Dendrômetro 2	2,2251	-2,3917	0,9956
Dendrômetro 3	-2,1645	2,2432	0,9977
Dendrômetro 4	-1,4911	2,119	0,9841

#### 4.2. Avaliação do Funcionamento dos Dendrômetros

Dados da variação diária do diâmetro do caule dos cinco primeiros dias após a instalação dos dendrômetros (DJ = 88 a DJ = 92) foram utilizados para avaliar o funcionamento destes.

Para todos os dias, o dendrômetro indicou o maior diâmetro do caule quando a radiação solar era nula e o menor valor quando a radiação solar foi máxima (Figura 3).

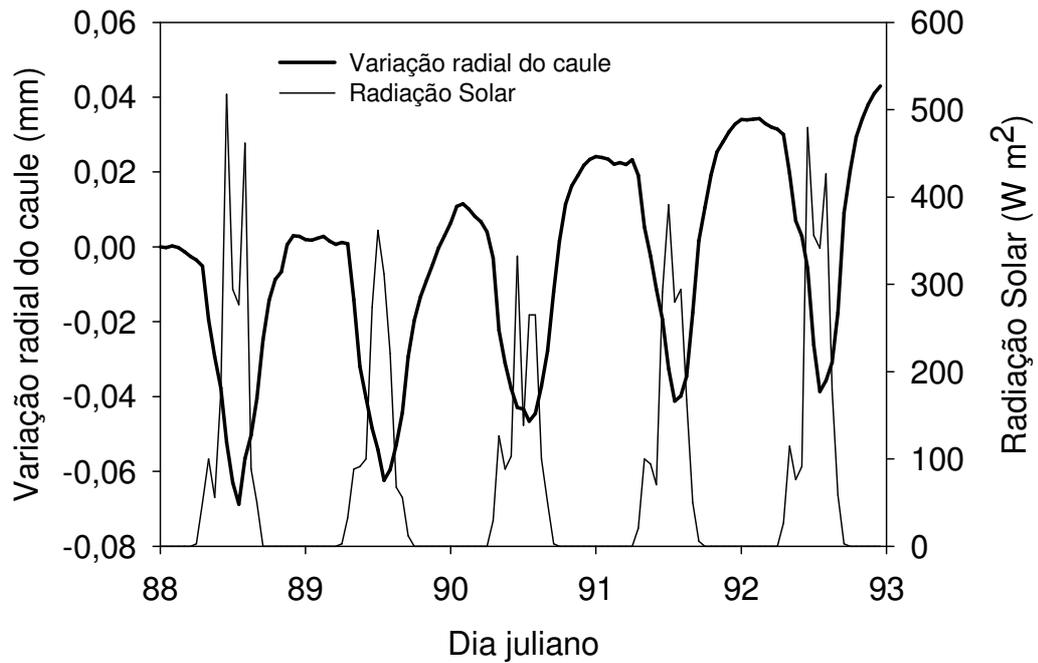


Figura 3. Variação do diâmetro do caule de uma planta de café sem restrições hídricas e da radiação solar entre os dias 29/03/2008 (DJ = 88) e 02/04/2008 (DJ = 92).

Para a temperatura, o dendrômetro demonstrou o mesmo padrão de variação em relação à radiação solar, quando o caule alcança seu maior diâmetro no momento que ocorrem as menores temperaturas do dia e alcança seu menor diâmetro quando a temperatura alcança seus maiores valores do dia (Figura 4).

Diferentemente da temperatura e radiação solar, o padrão da variação do diâmetro do caule acompanha a variação da umidade relativa do ar (Figura 5), onde seus valores máximos e mínimos ocorrem no mesmo instante.

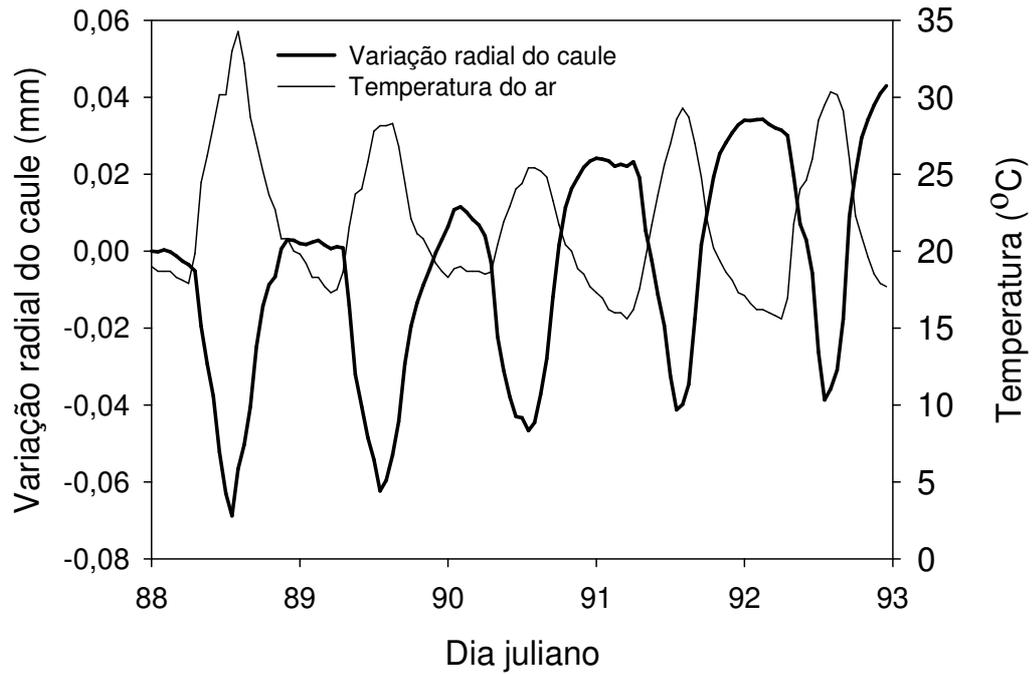


Figura 4. Variação do diâmetro do caule de uma planta de café sem restrições hídricas e da temperatura do ar entre os dias 29/03/2008 (DJ = 88) e 02/04/2008 (DJ = 92).

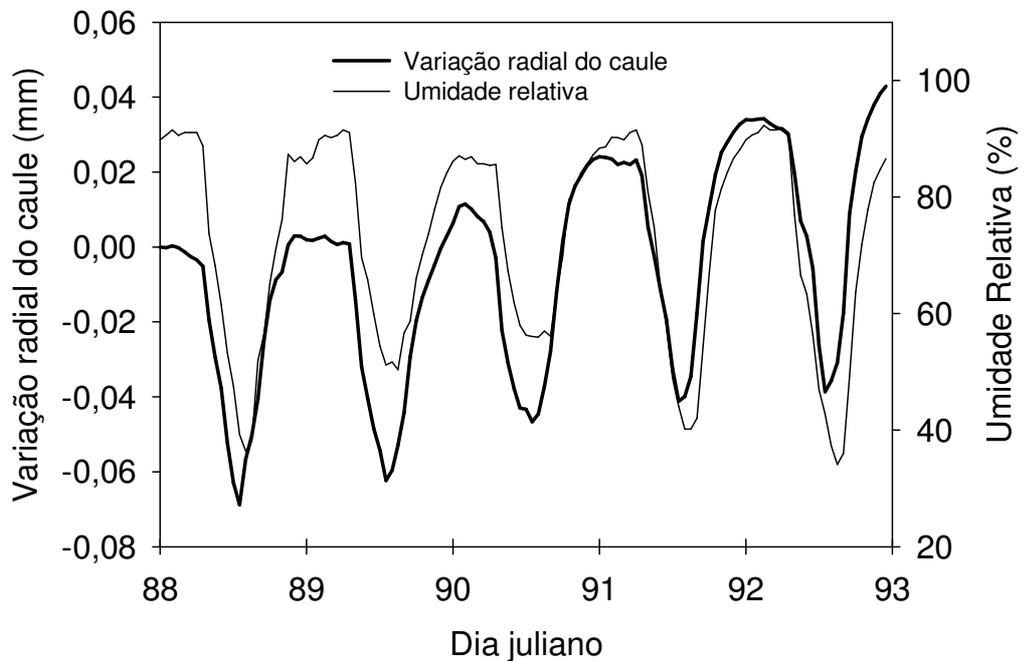


Figura 5. Variação do diâmetro do caule de uma planta de café sem restrições hídricas e da umidade relativa do ar entre os dias 29/03/2008 (DJ = 88) e 02/04/2008 (DJ = 92).

#### 4.3. Variação Diária do Diâmetro do Caule

A variação horária do diâmetro do caule para dois dias consecutivos (DJ = 89 e DJ = 90) é indicada na Figura 6. Observa-se que o diâmetro, durante todo o dia, alcança seu maior valor (Mxdt) normalmente antes do nascer do sol e, seu menor valor (Mndt), no período da tarde. A diferença entre o maior valor (Mxdt) e menor valor (Mndt) no mesmo dia nos dá um dos parâmetros da variação do diâmetro do caule, a amplitude diária máxima (ADM).

A diferença entre dois valores consecutivos de Mxdt nos indica a variação do diâmetro máximo do caule (Dmax). Da mesma maneira, a diferença entre dois valores consecutivos do Mndt nos indica variação do diâmetro mínimo do caule (Dmin).

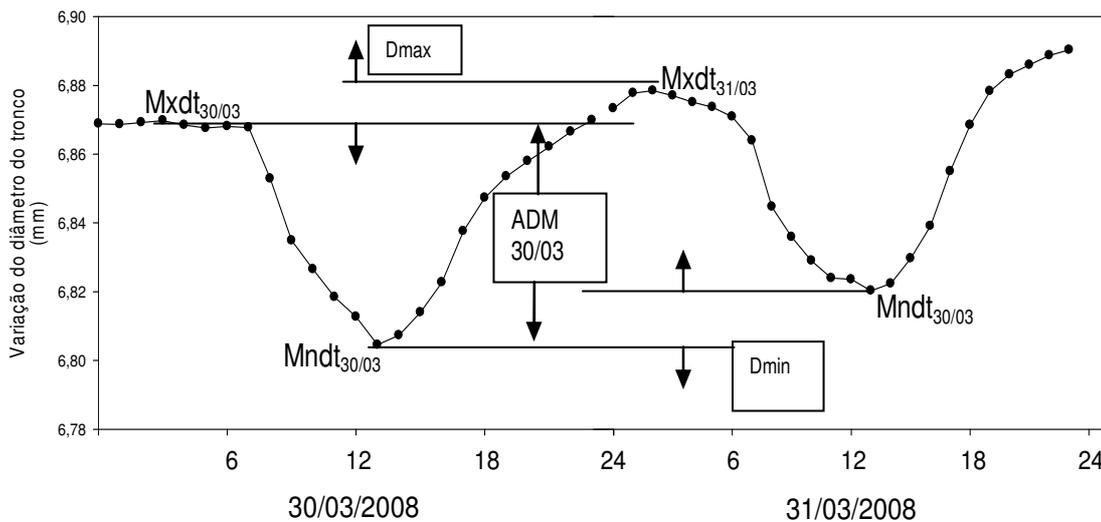


Figura 6. Variação do diâmetro do caule para dois dias consecutivos e alguns parâmetros provenientes das medições do diâmetro do caule, incluindo a amplitude diária máxima (ADM), e a variação do diâmetro do caule (Dmax e Dmin) expressado como a diferença diária entre o máximo diâmetro (Mxdt) e, também, o mínimo diâmetro (Mndt), respectivamente.

A tendência de crescimento das plantas controle e tratada durante todo o período experimental é indicada na Figura 7. A planta controle apresentou, durante todo o período, uma tendência de crescimento. Já a planta tratada, quando submetida ao estresse hídrico em dois períodos (DJ = 109 a DJ = 116 e

DJ = 148 a DJ = 152), apresentou uma tendência decrescente e, logo depois de reidratada (DJ = 117), a tendência voltou a ser crescente (dados não mostrados).

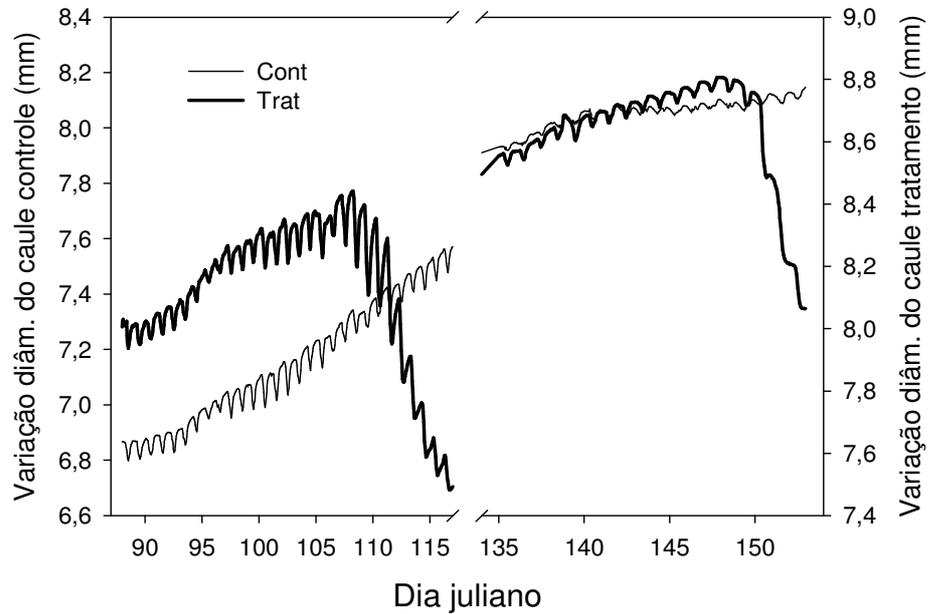


Figura 7. Variação do diâmetro do caule para plantas controle e tratada no período de 29/03/2008 (DJ = 88) a 01/06/2008 (DJ = 152).

#### 4.4. Amplitude Diária Máxima (ADM) como Indicador do Estresse Hídrico

A curva da ADM em função do tempo para plantas sem restrições hídricas, durante todo o período experimental, juntamente com alguns parâmetros climáticos ( $E_{To}$ ,  $DPV$  e  $T_{med}$ ) diretamente relacionados à transpiração da planta, estão indicados na Figura 8.

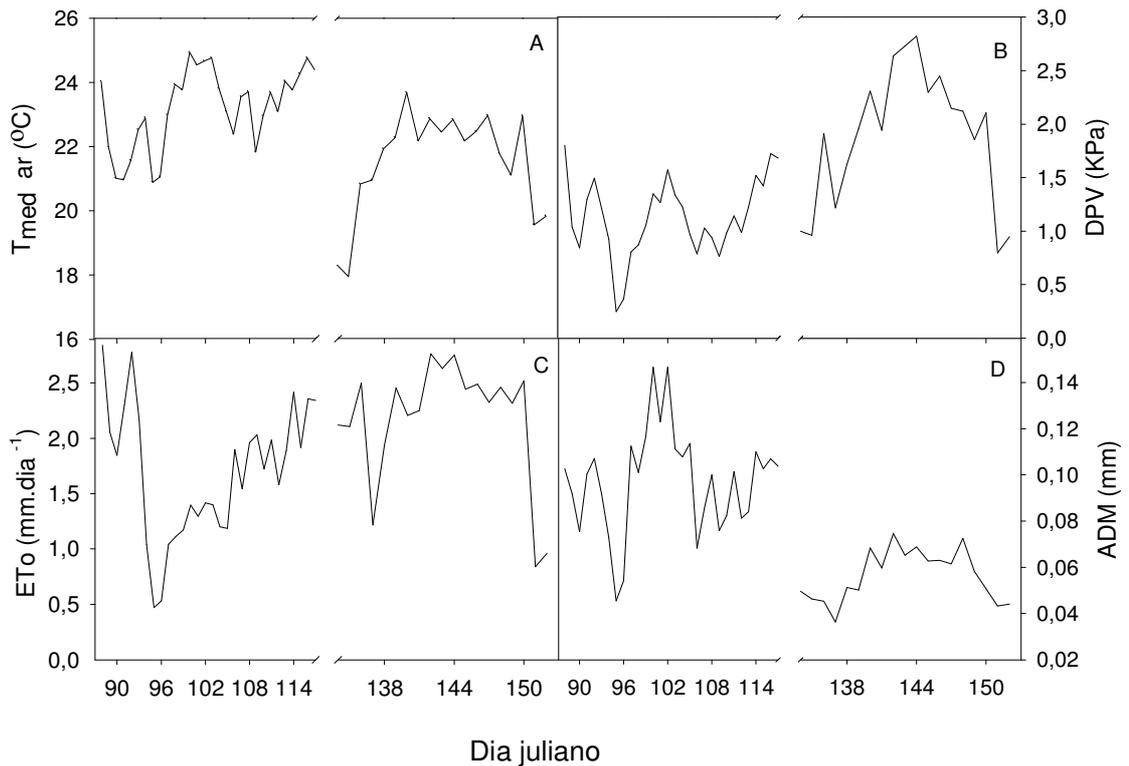


Figura 8. Variação da temperatura média do ar (A), DPV (B), ETo (C) e ADM (D) de plantas sem restrições hídricas durante o período compreendido entre 29/03/08 (DJ = 88) e 01/06/08 (DJ = 152). Valores perdidos no período entre DJ = 117 e DJ = 134.

Observa-se que durante todo o período experimental ocorreu flutuação de todos os parâmetros apresentados. A evapotranspiração média diária (ETo) variou de 0,47 a 2,84 mm.dia<sup>-1</sup>, alcançando seu valor máximo logo no início do experimento, apresentando maior flutuação na primeira parte do experimento, no período compreendido entre os dias julianos 88 e 116 (Figura 8C).

Um dos parâmetros que menos variou foi o Déficit de Pressão de Vapor médio diário (DPV), onde somente, na segunda parte do experimento (DJ = 135 a DJ = 152), alcançou maiores valores (Figura 8B).

Outro parâmetro climático analisado foi a Temperatura média do ar. De acordo com a Figura 8A, os maiores valores de temperatura alcançados ocorreram na primeira parte do experimento (DJ = 88 a DJ = 116) e os menores, na segunda parte (DJ = 135 a DJ = 152).

Maiores flutuações da ADM foram observadas no período compreendido entre os dias julianos 88 e 116 (Figura 8D). Este período também apresentou

maior variação que o segundo período (DJ = 135 a DJ = 152), fato igualmente observado com a ETo (Figura 8C).

De acordo com a Figura 8, observa-se que a ADM apresentou uma tendência de variação temporal similar aos parâmetros climáticos, aumentando, quando as demais aumentaram, e diminuindo, com a diminuição dos demais parâmetros.

Como a ADM apresentou tendências similares a alguns parâmetros climáticos relacionados à transpiração da planta, foram realizadas correlações entre a ADM das plantas controle (sem restrição hídrica) em função da  $T_{med}$ , ETo e DPV, para cada fase do experimento, representadas nas Figuras 9A e 9B, 10A e 10B, 11A e 11B, respectivamente.

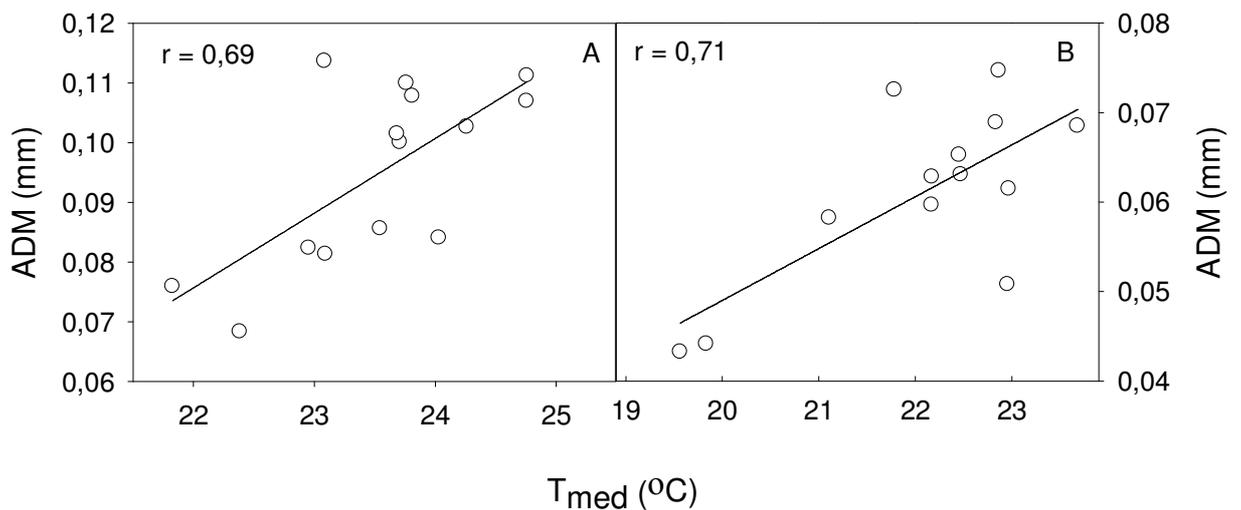


Figura 9. Relação entre a amplitude máxima diária (ADM) de plantas controle e a temperatura média do ar, para o primeiro ciclo - DJ = 103 a DJ = 116 (A) e o segundo ciclo - DJ = 140 a DJ = 152 (B).

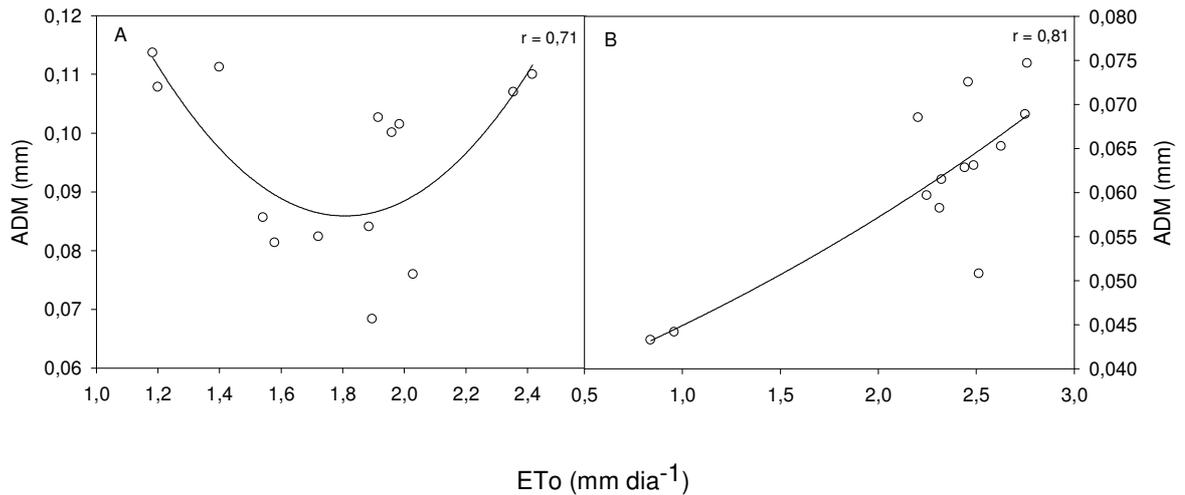


Figura 10. Relação entre a amplitude máxima diária (ADM) de plantas controle e a evapotranspiração média diária (ETo), para o primeiro ciclo - DJ = 103 a DJ = 116 (A) e o segundo ciclo - DJ = 140 a DJ = 152 (B).

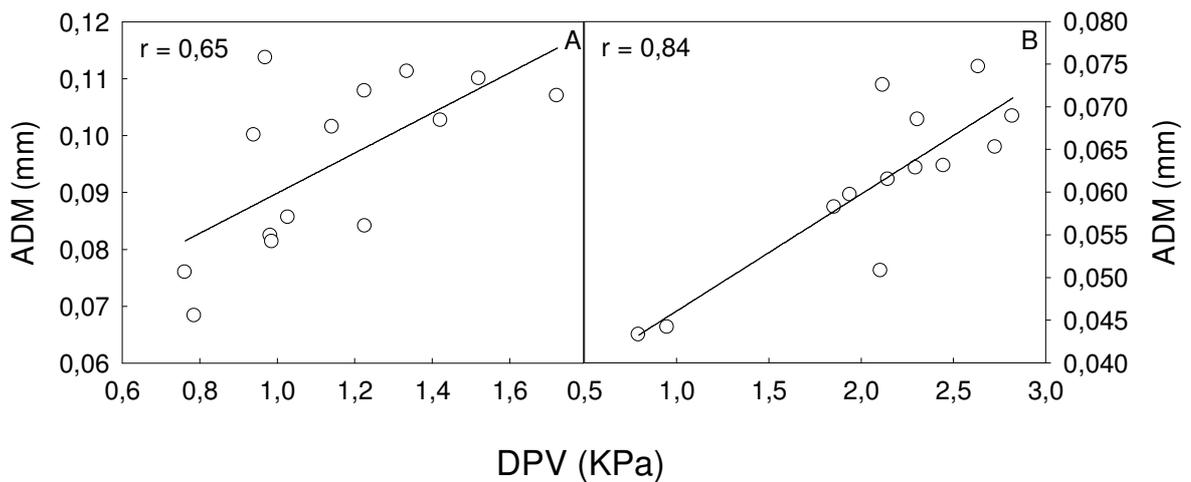


Figura 11. Relação entre a amplitude máxima diária (ADM) de plantas controle e o déficit de pressão de vapor médio diário (DPV), para o primeiro ciclo - DJ = 103 a DJ = 116 (A) e segundo ciclo - DJ = 140 a DJ = 152 (B).

Para os dois ciclos, foram significativas ( $p < 0,05$ ) e lineares as correlações entre a amplitude diária máxima com a temperatura média do ar e com o déficit de pressão de vapor ( $r = 0,69$  e  $0,71$ ;  $0,65$  e  $0,84$ , respectivamente) (Figuras 9 e 11, respectivamente). Da mesma maneira, foi significativa a correlação entre a amplitude diária máxima e a evapotranspiração de referência diária, porém não foi linear. Para o primeiro ciclo (Figura 10A), a curva que melhor se ajustou foi a

polinomial de segundo grau ( $r = 0,71$ ;  $p < 0,05$ ). Já para o segundo ciclo (Figura 10B), houve um melhor ajuste com uma curva exponencial ( $r = 0,81$ ;  $p < 0,001$ ).

No primeiro ciclo de estresse hídrico, o parâmetro que melhor se relacionou com a ADM foi a ETo, seguido pela temperatura média e pelo DPV. De maneira diferente, no segundo ciclo, o que melhor se relacionou com a ADM foi o DPV, seguido pela ETo e, por fim, pela temperatura média do ar.

A variação da ADM, em função do tempo para as plantas controle e tratada, e a variação do  $\Psi_{wf}$ , para os dois ciclos de estresse hídrico, estão indicadas nas Figuras 12 e 13. Para o primeiro ciclo, no DJ = 103, a irrigação foi cortada nas plantas tratadas. Observa-se que, já no segundo dia após início do tratamento, a ADM das plantas tratadas é maior do que nas plantas controle (Figura 12a).

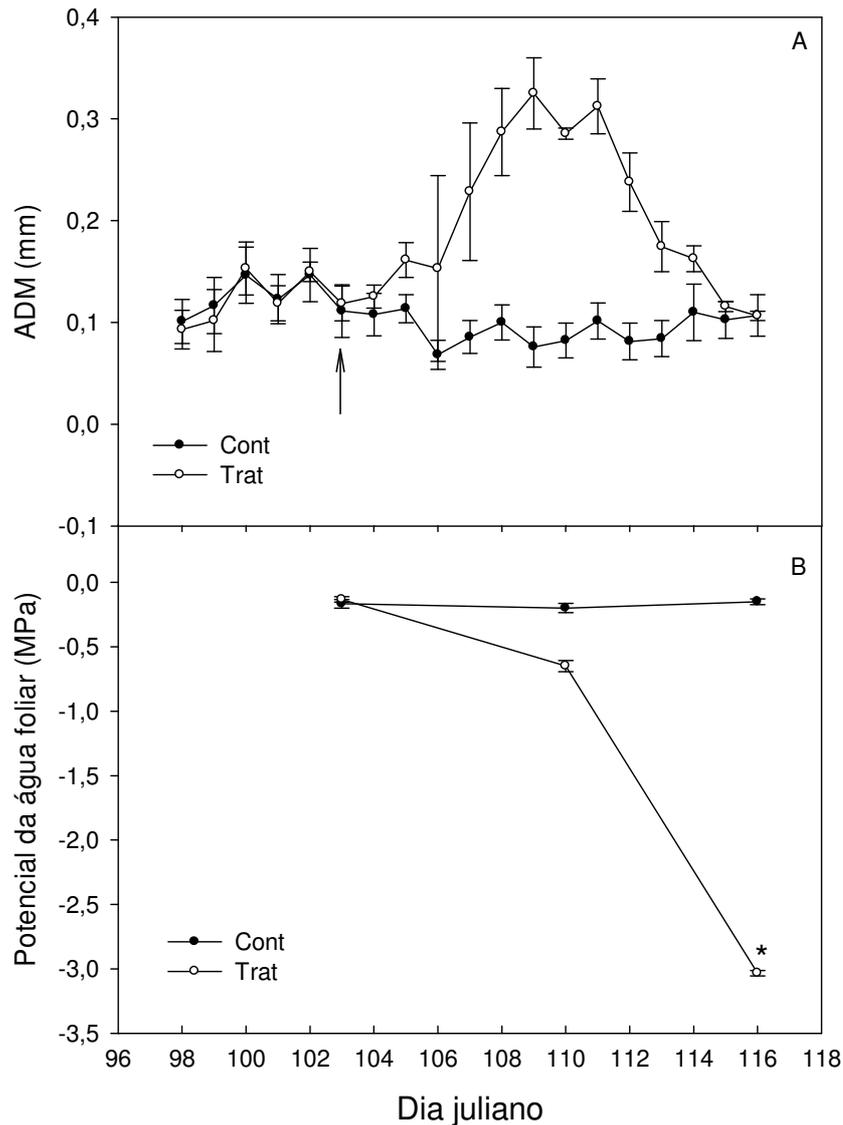


Figura 12. Comparação entre amplitude diária máxima (A) e  $\Psi_{wf}$  (B) de plantas sem restrição hídrica (Cont) e plantas sem irrigação (Trat) para o ciclo 1, durante o período de 13/04/08 (DJ = 103) a 26/04/08 (DJ = 116). Cada valor representa a média de duas plantas. Barras verticais representam o erro padrão das médias. (\*) representa que as médias diferem significativamente entre si pelo teste *t*, ao nível de 5% de probabilidade. Seta indica início do estresse hídrico.

A ADM permanece crescente até atingir seu valor máximo no DJ = 109. Nesse mesmo DJ, o  $\Psi_{wf}$  para a planta tratada é maior que -0,5 MPa (Figura 12B). Após atingir seu valor máximo, a ADM das plantas tratadas começa a diminuir. Nesse mesmo instante, os valores do  $\Psi_{wf}$  das plantas tratadas começam a ficar mais negativos, atingindo -3 MPa no DJ = 116. Neste mesmo dia, o valor da ADM

das plantas tratadas fica semelhante ao das plantas controle (Figura 12A). A partir deste ponto, as plantas tratadas foram reidratadas (dados não mostrados).

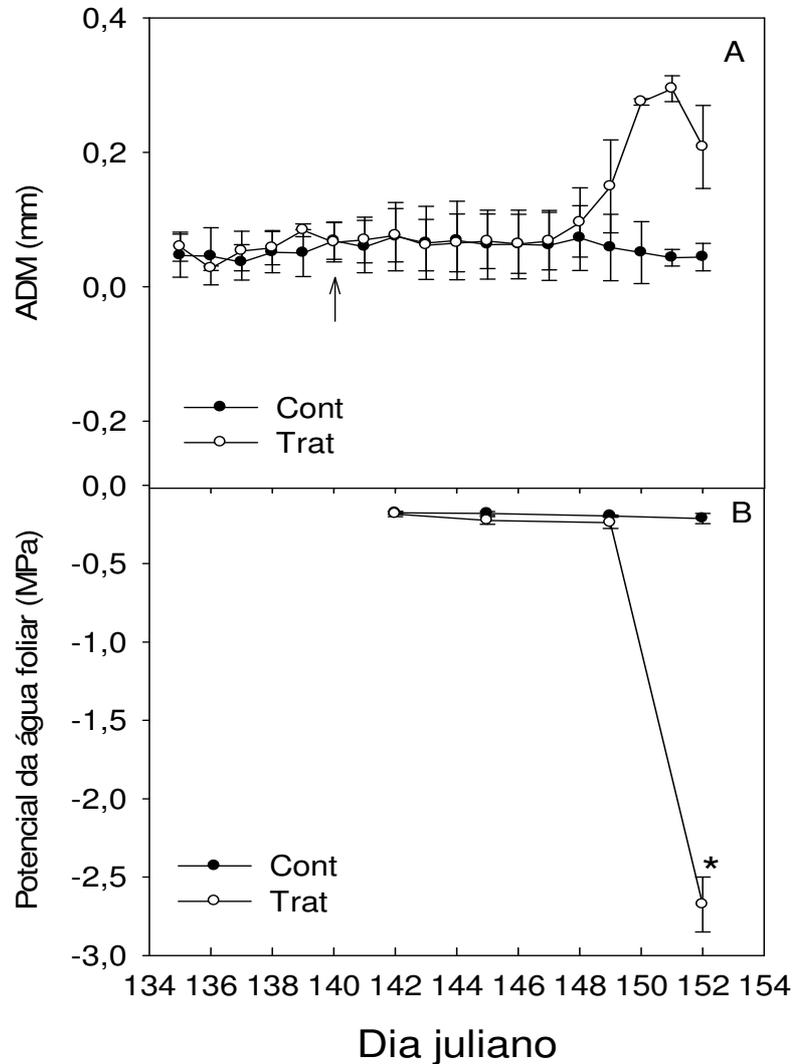


Figura 13. Comparação entre amplitude diária máxima (A) e  $\Psi_{wf}$  (B) de plantas sem restrição hídrica (Cont) e plantas sem irrigação (Trat) para o ciclo 2, durante o período de 20/05/08 (DJ = 140) a 01/06/08 (DJ = 152). Cada valor representa a média de duas plantas. Barras verticais representam o erro padrão das médias. (\*) representa que as médias diferem significativamente entre si pelo teste  $t$ , ao nível de 5% de probabilidade. Seta indica início do estresse hídrico.

No segundo ciclo, somente após oito dias sem água, o valor da ADM das plantas tratadas começa a aumentar em relação ao controle (Figura 13A), um pouco antes do  $\Psi_{wf}$  do tratamento diminuir em relação ao controle (Figura 13B).

No DJ = 150, a ADM das plantas tratadas atinge seu valor máximo, decaindo posteriormente, tendendo a retornar aos valores semelhantes ao controle. Semelhante ao primeiro ciclo, a ADM começa a decair quando o estresse hídrico se torna mais severo (Figuras 13A e 13B).

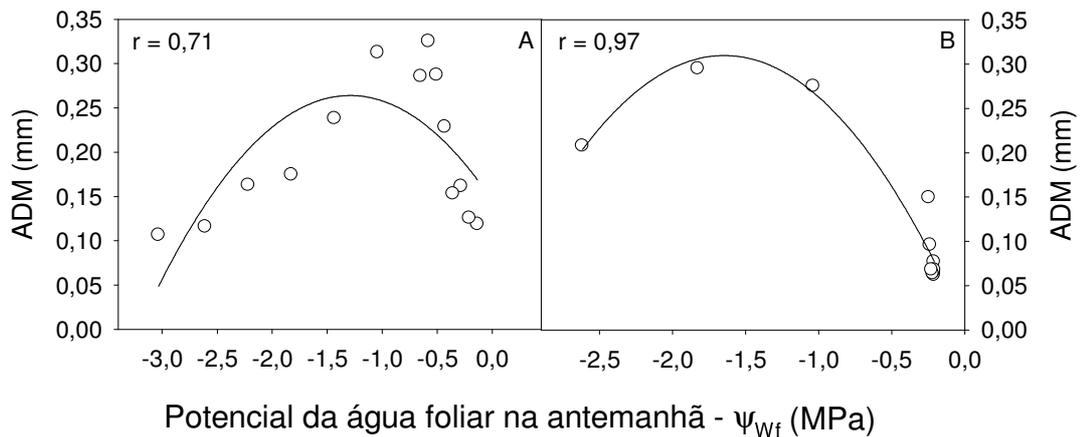


Figura 14. Relação entre a amplitude diária máxima (ADM) e o  $\Psi_{wf}$  (MPa) das plantas submetidas ao estresse hídrico para o primeiro ciclo (A) e segundo ciclo (B). Cada ponto equivale à média de duas plantas.

A relação entre a ADM e o  $\Psi_{wf}$  foi estatisticamente significativa para ambos os ciclos ( $p < 0,05$ ). Para o primeiro ciclo, à medida que  $\Psi_{wf}$  se torna mais negativo, a ADM aumenta. Após o  $\Psi_{wf}$  atingir o valor de -1,3 MPa, a ADM começa a diminuir (Figura 14A). O comportamento do segundo ciclo se assemelha ao primeiro, porém a ADM começa a diminuir quando o  $\Psi_{wf} = -1,65$  MPa (Figura 14B).

Para cada ciclo, antes de iniciar o estresse hídrico e no final do período experimental, foi medida a área foliar total das plantas controle e tratada (Quadro 2). Para o primeiro ciclo, não houve diferença na área foliar total, pois ainda não havia diferenciação de tratamentos.

Após o estresse hídrico do primeiro ciclo, as plantas tratadas apresentaram uma diminuição de 34% da área foliar total, mesmo após o período de reidratação, e as plantas controle, um aumento de aproximadamente 6%. Da mesma maneira, após o segundo ciclo de estresse hídrico, a área foliar total das plantas controle aumentou aproximadamente 19% em relação ao início do experimento. As plantas tratadas obtiveram um ligeiro aumento em relação ao

primeiro ciclo, apresentando uma queda de 25% em relação ao início do experimento.

Quadro 2. Área foliar total das plantas controle e tratada, medida no início de cada ciclo e no final do período experimental. Valores médios de duas plantas para cada tratamento

PERÍODO	ÁREA FOLIAR TOTAL (M <sup>2</sup> )	
	CONTROLE	TRATAMENTO
CICLO 1	1,29	1,30
CICLO 2	1,38	0,85
FINAL EXP.	1,54	0,97

A densidade de fluxo de seiva ( $J_s$ ) foi medida no primeiro ciclo, ocorrendo um aumento do período da manhã até o período da tarde, onde começou a diminuir. Após o início do estresse hídrico (DJ = 103), a variação diária da  $J_s$  das plantas controle e tratada foi semelhante, apresentando uma diminuição do fluxo de transpiração da planta tratada após 03 dias de estresse hídrico, ocorrendo a maior diferença entre tratamentos 06 dias após início do estresse hídrico (Figura 15).

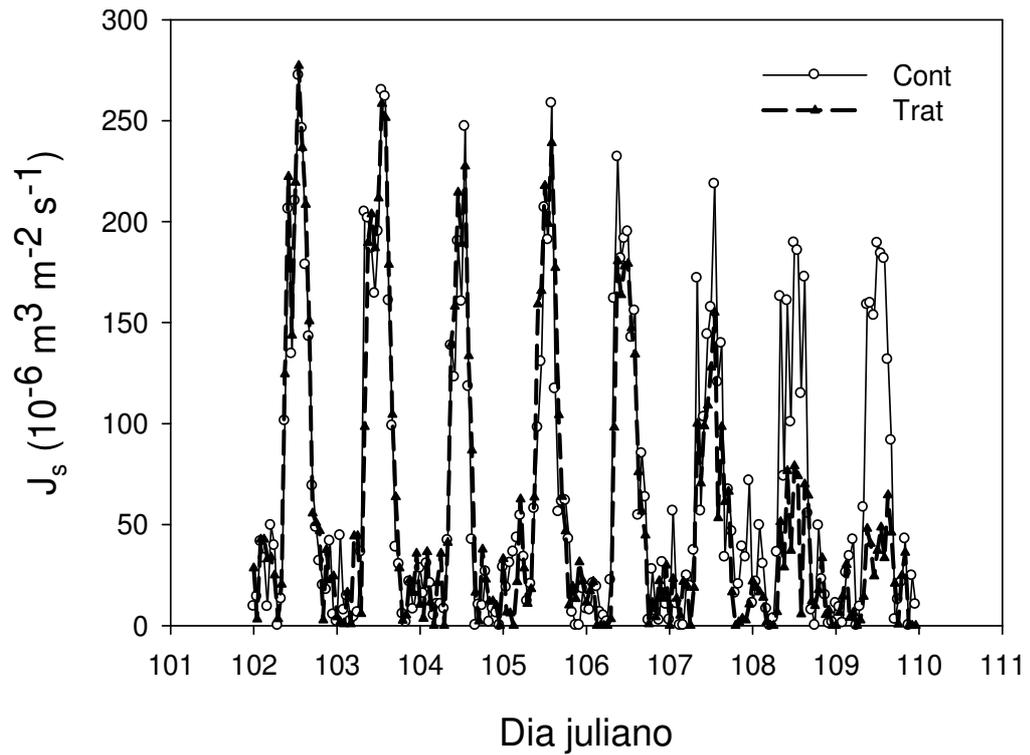


Figura 15. Variação diária da  $J_s$  de plantas controle e de plantas submetidas ao estresse hídrico, no período de 12/04/08 (DJ = 102) a 19/04/08 (DJ = 109).

Analisando a  $J_s$  com a ADM, na forma de valores relativos (Trat/Cont) normalizados, pode-se observar que, enquanto a ADM das plantas submetidas ao estresse hídrico aumentava gradualmente, alcançando aproximadamente 370% do controle no DJ = 109, a  $J_s$  diminuía alcançando, nesse mesmo dia, uma queda de aproximadamente 65% em relação ao controle (Figura 16).

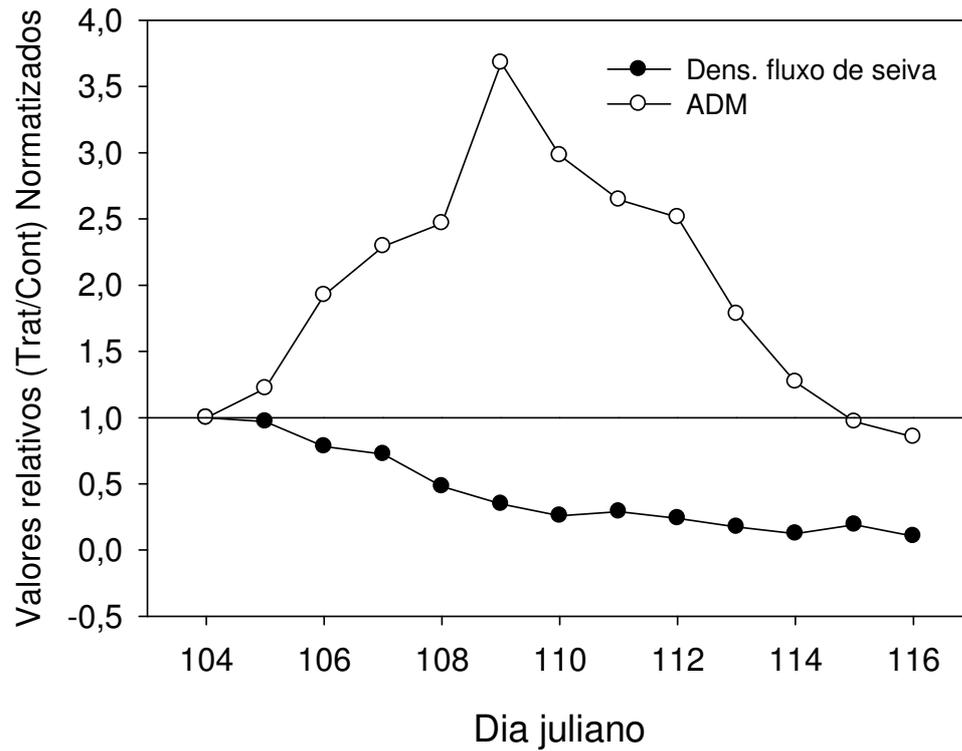


Figura 16. Valores de  $J_s$  e ADM para as plantas sem irrigação (Trat) expressos em relação às plantas sem restrição hídrica (Cont) e normalizadas, no período entre 13/04/08 (DJ = 103) e 26/04/08 (DJ = 116).

Alguns parâmetros fisiológicos (taxa de assimilação fotossintética líquida –  $A$ ; e condutância estomática –  $g_s$ ) foram determinados durante o segundo ciclo (DJ = 140 a DJ = 152). Somente no último dia (DJ = 152), tanto  $A$  (Figura 17A) quanto  $g_s$  (Figura 17C) das plantas submetidas ao estresse hídrico apresentaram diferença significativa em relação ao controle, enquanto que a ADM das mesmas plantas já apresentara aumento no DJ = 148 (Figura 17B).

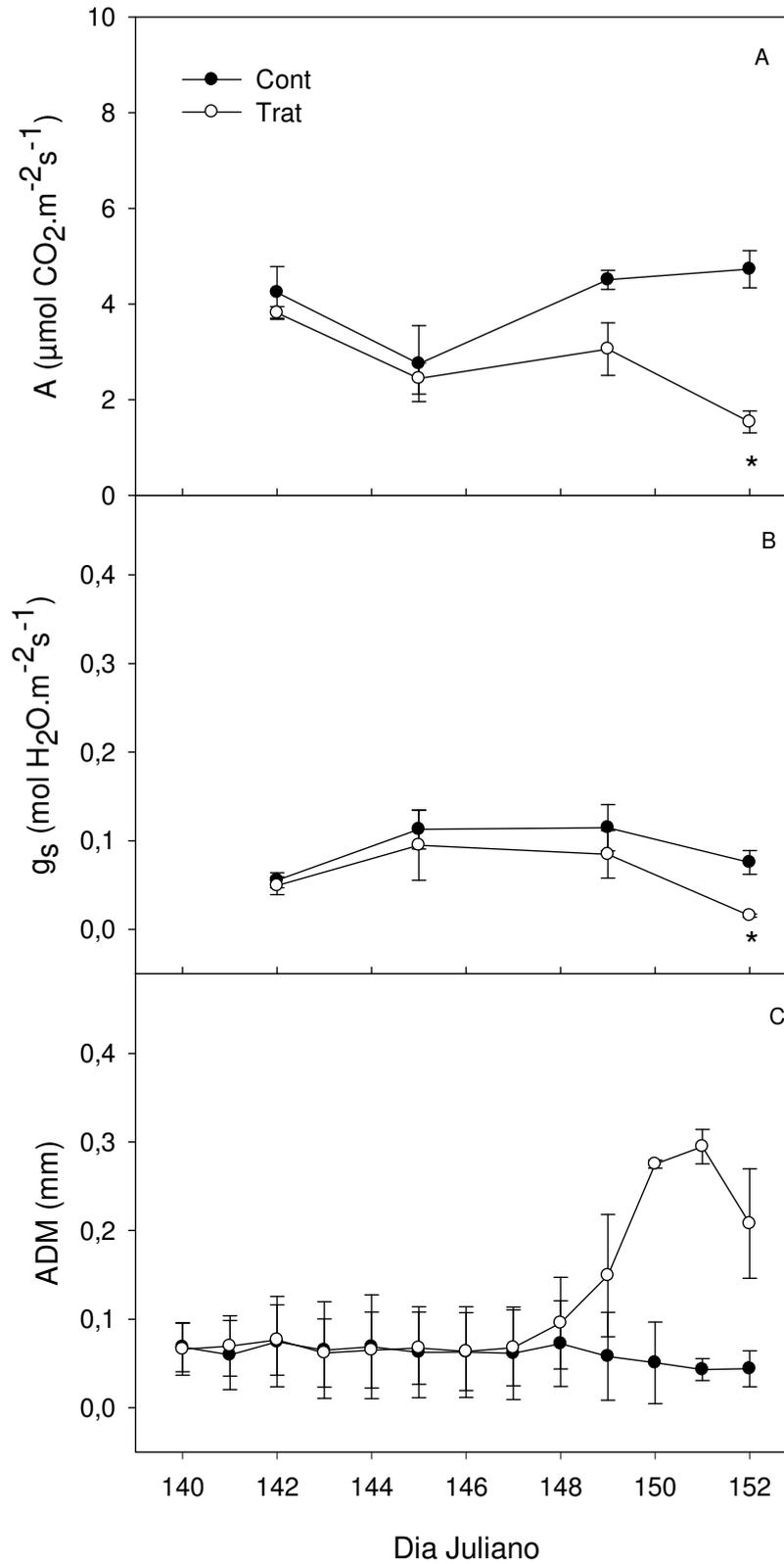


Figura 17. Taxa de assimilação fotossintética líquida (A), condutância estomática (B) e amplitude diária máxima (C) em plantas de café irrigadas e submetidas ao estresse hídrico, durante o período de 20/05/08 (DJ = 140) a 01/06/08 (DJ = 152). (\*) representa que as médias diferem significativamente entre si pelo teste *t*, ao nível de 5% de probabilidade.

#### 4.5. Máximo e Mínimo Diâmetro do Caule (Mndt e Mxdt) como Indicadores do Estresse Hídrico

Outros dois parâmetros provenientes da variação do diâmetro do caule foram analisados, o máximo e mínimo diâmetro do caule. Observou-se uma variação semelhante, para ambos os diâmetros durante os dois ciclos. As plantas controle apresentaram tendência de crescimento, indicado pela evolução do diâmetro máximo e mínimo sempre crescente ao longo do tempo, com um crescimento mais acentuado no primeiro ciclo do que no segundo (Figura 18).

Para o primeiro ciclo, o mínimo diâmetro do caule apresentou uma tendência de queda mais precocemente do que o máximo diâmetro, quatro dias após início do estresse hídrico para o Mndt e seis dias para o Mxdt. Para o segundo ciclo, ambos mostraram queda no mesmo instante (Figura 18).

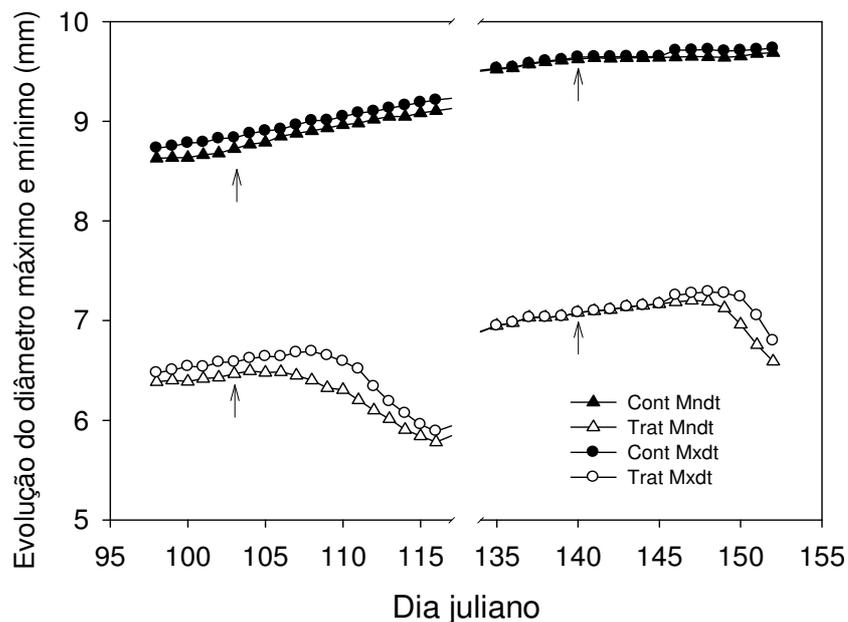


Figura 18. Evolução do diâmetro máximo e mínimo do caule durante o período experimental das plantas controle e tratada. Setas indicam início do estresse hídrico. Cada ponto equivale à média de duas plantas.

Analisando a variação do diâmetro máximo e mínimo do caule da planta (Dmax e Dmin), podem-se observar variações diferentes. Para o primeiro ciclo, a Dmin indicou, para as plantas tratadas já no segundo dia após imposição do

estresse hídrico, um decréscimo, apresentando valores abaixo de zero, enquanto que a Dmin das plantas controle manteve-se sempre com valores acima de zero, indicando continuidade de crescimento, enquanto que no segundo ciclo, apenas nove dias após o estresse hídrico, houve diminuição da Dmin das plantas tratadas (Figura 19A).

A Dmax apresentou um decréscimo apenas seis dias após imposição do estresse hídrico para as plantas tratadas no primeiro ciclo, tempo superior ao apresentado pela Dmin no mesmo período. No DJ = 111, a Dmax apresentou seu menor valor, mostrando em seguida uma tendência de crescimento (Figura 19B). Para o segundo ciclo, apenas dez dias após início do estresse hídrico, a Dmax começou a decrescer, também em um período posterior ao apresentado pela Dmin.

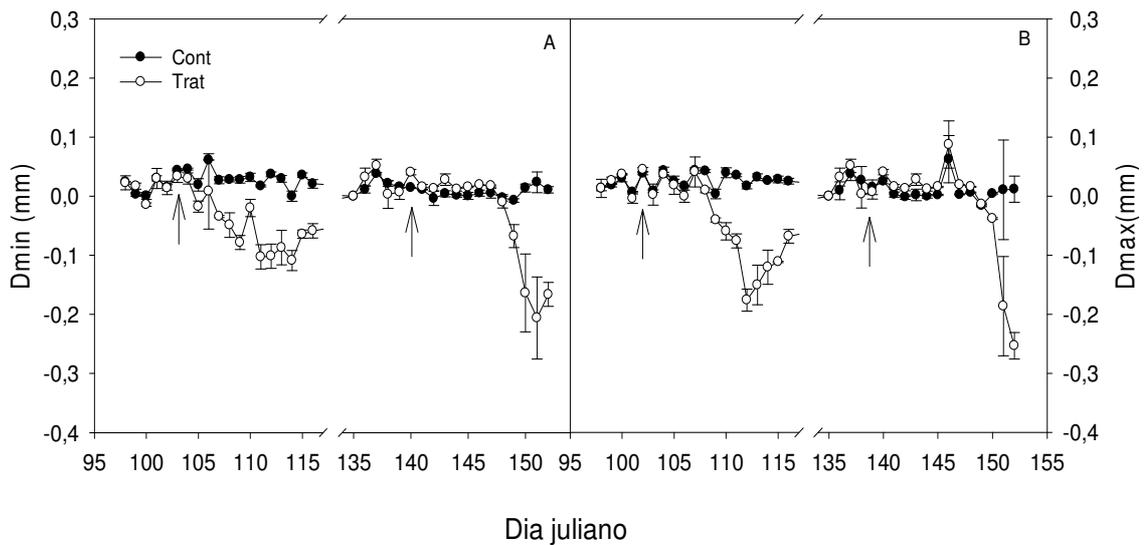


Figura 19. Variação do diâmetro mínimo (A) e máximo (B) do caule de plantas controle e tratada durante o período experimental. Setas indicam início do estresse hídrico. Cada ponto equivale à média de duas plantas. Barras verticais representam o erro padrão das médias.

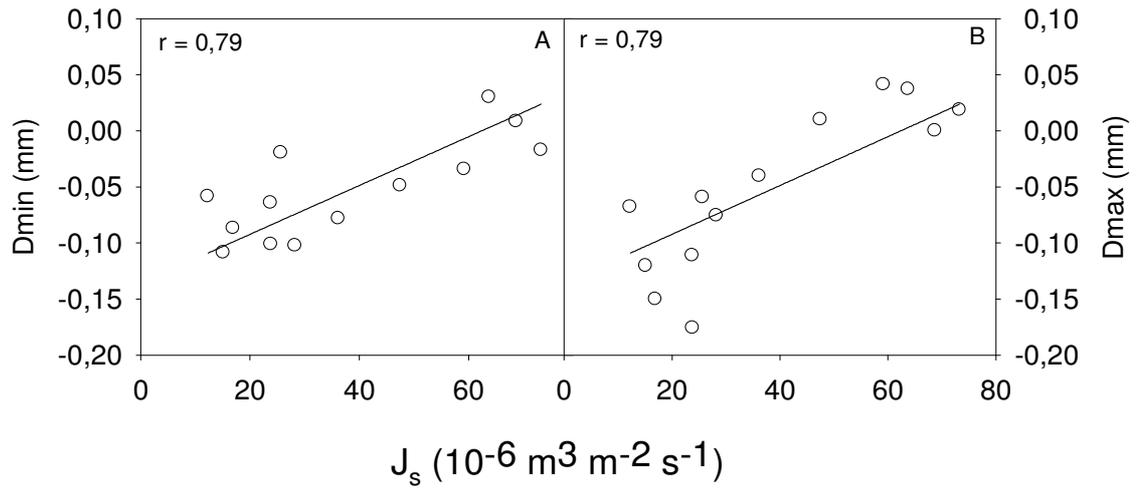


Figura 20. Correlação entre a  $D_{min}$  (A) e  $D_{max}$  (B) e a densidade de fluxo de seiva ( $J_s$ ) em plantas jovens de café submetidas ao estresse hídrico, durante o primeiro ciclo. Cada ponto representa a média de duas medidas.

Foi significativa a correlação entre a  $D_{min}$  e  $D_{max}$  e a  $J_s$  das plantas de café submetidas ao estresse hídrico ( $p < 0,001$ ), indicando uma relação direta e linear (Figura 20).

## 5. DISCUSSÃO

Para este trabalho, foram construídos no LEAG/UENF, dendrômetros utilizados para mensurar as variações do diâmetro do caule, a fim de se obter determinados parâmetros para serem utilizados na detecção do estresse hídrico. Os dendrômetros construídos (Figura 1) apresentaram desempenho semelhante aos encontrados no mercado. Os dendrômetros comerciais são patenteados por multinacionais (Naor e Cohen, 2003; Rojas, 2003), tornando seu custo muito elevado.

O diâmetro do caule oscila em um ciclo de 24 horas, alcançando seu diâmetro máximo, um pouco antes do nascer do sol, e seu mínimo diâmetro, no período da tarde (Figura 6). O diâmetro da planta de café oscila da mesma maneira que outras culturas estudadas como pessegueiro (Goldhamer et al., 1999; Goldhamer e Fereres, 2001), limoeiro (Ortuño et al., 2005), macieira (Naor e Cohen, 2003) e oliveira (Moreno et al., 2006). Trata-se de uma característica fisiológica das culturas, onde mais de 90% da variação diária do diâmetro do caule ocorre nos tecidos do floema (Irvine e Grace, 1997), com uma ligeira deformação elástica do xilema, a qual é provavelmente limitada pelos elementos imaturos do xilema (Molz e Klepper, 1973).

Durante o dia, o potencial da água na folha, concomitantemente com o potencial da água no xilema, se torna mais negativo, acarretando uma difusão radial de água dos tecidos mais externos para o xilema, alcançando, assim, seu menor diâmetro. No período da tarde, a captação de água pela planta excede a

perda de água pela transpiração, tornando o potencial da água no xilema menos negativo, acarretando a inversão no fluxo radial de água do xilema para o floema, fazendo com que, antes do amanhecer, o diâmetro alcance seu maior valor. Assim, o potencial de água no xilema é a força motriz da variação do diâmetro do caule (Molz e Klepper, 1973; Parlange et al., 1975; Sevanto et al., 2003).

A teoria dos autores acima, que afirmam que o potencial de água no xilema é o que controla a variação do diâmetro do caule, foi confirmada para a cultura do café, onde seu diâmetro varia conforme variáveis climáticas diretamente relacionadas com a transpiração da planta (Klepper et al., 1971; Katerji et al., 1994; Goldhamer et al., 2003; Remorini e Massai, 2003; Moreno et al., 2006). Isto indica, também, um funcionamento satisfatório dos dendrômetros construídos em laboratório para este trabalho (Figuras 3, 4 e 5).

Alguns parâmetros derivados da variação do diâmetro do caule foram utilizados na detecção do estresse hídrico como a amplitude diária máxima (ADM), o mínimo diâmetro do caule (Mndt), o máximo diâmetro do caule (Mxdt) e a variação do diâmetro máximo e mínimo derivada do Mndt e Mxdt (Figura 6), por serem parâmetros adequados para avaliar o status hídrico das plantas (Cohen et al., 2001; Ortuño et al., 2004b).

A variação temporal da amplitude diária máxima (ADM) foi similar ao de algumas variáveis climáticas diretamente relacionadas com a transpiração da planta (Figura 8). Comportamento semelhante foi encontrado por Moreno et al. (2006), em estudos com oliveiras.

A ADM é um dos parâmetros mais comumente utilizados na detecção do estresse hídrico (Huguet et al., 1992), pois além de estar diretamente relacionada com as condições climáticas, este parâmetro responde satisfatoriamente a mudanças da água disponível do solo (Cohen et al., 2001).

Correlações entre a ADM e algumas variáveis climáticas (ET<sub>o</sub>, DPV e temperatura) foram realizadas com o objetivo de encontrar valores de referência ou valores limite, para que este indicador da planta seja corretamente interpretado e, posteriormente, utilizado como ferramenta da irrigação.

Estes valores de referência são obtidos relacionando o parâmetro escolhido de plantas sem restrições hídricas, neste caso a ADM, com parâmetros diretamente ligados a transpiração da planta, ou seja, é necessário que a ADM

reflita as mudanças das variáveis da demanda evaporativa (Goldhamer e Fereres, 2001; Fereres e Goldhamer, 2003; Ortuño et al., 2006).

A análise de regressão entre a ADM e a temperatura média do ar, para os dois ciclos do período experimental (Figura 9), indica uma relação direta e linear, porém com valores de  $r^2$  moderados (0,48 e 0,51; para o primeiro e segundo ciclos, respectivamente). Este fato está de acordo com Vélez (2004), que indicou uma melhor relação entre a ADM e outras variáveis climáticas do que com a temperatura média do ar em limoeiros. Embora a temperatura não seja um indicador exato da demanda evaporativa da atmosfera (Hatfield e Fuchs, 1990), houve boa correlação entre a ADM e este parâmetro para amendoeirais (Fereres e Goldhamer, 2003).

Relacionando a ADM com a ETo, encontrou-se resultado satisfatório e significativo, com as grandezas variando de forma diferente em cada ciclo. No primeiro, a curva que melhor se ajustou foi a polinomial de segundo grau (Figura 10A). No segundo, obteve-se uma relação exponencial (Figura 10B). Outros autores encontraram resultados diferentes em estudos realizados com outras espécies, como limoeiro (Ortuño et al., 2004a; Ortuño et al., 2006), oliveira (Moreno et al., 2006), amendoeira (Goldhamer e Fereres, 2001), indicando que esta relação se dá de forma direta e linear. Em poucos estudos, a relação entre a ADM e a ETo não foi linear e sim exponencial, saindo da linearidade quando a ETo alcançou elevados valores (Fereres e Goldhamer, 2003).

No primeiro ciclo, à medida que a ETo começou a aumentar, a ADM diminuiu até um determinado ponto. Isto se deu, provavelmente, pelo fechamento estomático, diminuindo a perda de água da planta para a atmosfera. Posteriormente, os valores da ADM começaram a elevar-se, mesmo para valores elevados de ETo.

Um dos motivos deste comportamento da ADM para o primeiro ciclo e também para o segundo foi, provavelmente, uma eficiente retenção de água adicional de tecidos do caule, com o aumento da demanda evaporativa do ar (Ortuño et al., 2006). Neste sentido, a água armazenada nos tecidos do caule contribuiu para a transpiração diária, até mesmo para plantas sem restrições hídricas, indicando que a água armazenada nestes tecidos tem um papel importante não somente nos períodos de ausência de água, mas também no transporte da água que ocorre no interior da planta (Zweifel et al., 2001).

Da mesma maneira que a temperatura média do ar, a ADM variou de forma direta e linear com o DPV (Figura 11 A e B), apresentando para o primeiro e segundo ciclos valores de  $r^2$  satisfatórios e significativos (0,43 e 0,72, respectivamente) ( $p < 0,05$ ). O moderado valor do coeficiente de determinação ( $r^2$ ) da regressão no primeiro ciclo pode ser atribuído à moderada variabilidade das condições do tempo no interior da casa de vegetação e/ou à duração do experimento (Ortuño et al., 2004b).

Diferentemente do primeiro ciclo, no segundo, a regressão linear entre a ADM e o DPV apresentou valor de  $r^2$  maior. A boa correlação entre as variáveis pode ser explicada pela maior variação do DPV durante o segundo ciclo e, também, devido à grande sensibilidade da ADM a mudanças no DPV médio diário, pelo fato deste último estar diretamente relacionado com a transpiração diária da planta (Hatfield e Fuchs, 1990). Foram encontradas boas correlações entre a ADM e o DPV para outras culturas estudadas, como amêndoeira (Feres e Goldhamer, 2003), ameixeira (Intrigliolo e Castel, 2006) e limoeiro (Ortuño et al., 2006).

Comparando a ADM das plantas controle e tratada, tanto para o primeiro ciclo quanto para o segundo, observa-se que, antes da suspensão da irrigação, não houve diferença da ADM entre tratamentos (Figuras 12A e 13A).

A partir do momento que a água foi suspensa, logo a ADM das plantas tratadas começou a aumentar (Figura 12A), levando um tempo maior para o segundo ciclo (Figura 13A). Comportamento semelhante foi encontrado em outros estudos, onde a ADM aumentou no mesmo instante que o déficit hídrico aumentou para várias outras espécies, como pessegueiro (Garnier e Berger, 1986; Goldhamer et al., 1999), cerejeira (Cabibel e Isberie, 1997) e noqueira (Cohen et al., 1997).

Em pessegueiros, observou-se que, mesmo na ausência de diferença entre o potencial da água foliar na antemanhã das plantas controle e tratada, houve aumento significativo da ADM de plantas estressadas em relação às plantas controles (Remorini e Massai, 2003).

À medida que o  $\Psi_{wf}$  se tornou mais negativo, a ADM aumentou até alcançar um valor máximo (Figura 12A). Ao alcançar um valor máximo, a ADM começou a diminuir no mesmo momento que a queda do  $\Psi_{wf}$  se tornou mais brusca (Figuras 12A e 12B), ou seja, o aumento da ADM das plantas tratadas

está associado com a diminuição do  $\Psi_{wf}$  até um valor limite, aproximadamente -1,3 MPa (Figura 14A), comportamento também encontrado para as espécies de limoeiro (Ortuño et al., 2005) e pessegueiro (Garnier e Berger, 1986).

Em limoeiros, a ADM aumentou até um determinado valor de  $\Psi_{wf}$ , indicando que, quando o conteúdo de água no solo não estava muito baixo, a ADM foi um bom indicador da intensidade do fluxo de transpiração da planta (Huguet et al., 1992; Ortuño et al., 2004a).

Outra explicação para a queda da ADM para um determinado valor do  $\Psi_{wf}$  é o fim da retenção da água do floema, do cambio e dos tecidos mais externos, quando a água armazenada no caule foi reduzida (Garnier e Berger, 1986; Huguet et al., 1992; Remorini e Massai, 2003). Para uma espécie de citrus, na qual a ADM começou a diminuir, o valor do  $\Psi_{wf}$  foi de -1,0 MPa (Ortuño et al., 2004b).

Outra hipótese para a queda da ADM, após atingir seu valor máximo para os dois ciclos, é a regulação estomática, parâmetro medido somente no segundo ciclo (Figura 17). Observou-se que, enquanto o valor da ADM começou a subir, houve uma queda na condutância estomática ( $g_s$ ), porém sem diferença significativa entre tratamentos (Figura 17B).

No momento que a ADM atingiu seu máximo valor, no DJ = 151, observou-se uma queda mais brusca na  $g_s$ , apresentando diferença significativa entre tratamentos no dia posterior, quando a ADM já estava diminuindo (Figura 17B).

Conseqüentemente, com a diminuição da  $g_s$ , as plantas tratadas apresentaram também um decréscimo na taxa de assimilação fotossintética líquida ( $A$ ) e, do mesmo modo, apresentaram diferença entre tratamentos no momento da queda da ADM (Figura 17A). Em plantas de limão, resultado semelhante foi encontrado, onde a ADM começou a decrescer quando  $g_s$  e  $A$  apresentaram uma queda mais brusca (Ortuño et al., 2005).

Portanto, nas plantas submetidas ao estresse hídrico, o que possivelmente controlou a ADM foi a regulação estomática, com o fechamento dos estômatos, evitando a perda excessiva de água, devido a sinalização do ácido abscísico (ABA). Em condições de estresse hídrico, há um aumento na concentração do ABA sintetizado pelas raízes e transportado via xilema para as

folhas, causando o fechamento parcial dos estômatos, eventualmente restringindo o crescimento celular (Chaves et al., 2008).

Para o segundo ciclo, o comportamento da ADM foi semelhante ao primeiro ciclo, sendo diferente o período de tempo. As plantas tratadas levaram um tempo maior para que o valor da ADM começasse a aumentar em relação ao controle, cerca de oito dias após a suspensão da irrigação, no DJ = 147 (Figura 13A).

Esse comportamento não ficou restrito só a ADM. O  $\Psi_{wf}$  só começou a decrescer nove dias após a suspensão da irrigação, no DJ = 149 (Figura 13B). Neste segundo ciclo, ficou claro que a ADM apresentou uma resposta mais rápida ao estresse hídrico do que o  $\Psi_{wf}$ , comportamento também encontrado para pessegueiro (Goldhamer et al., 1999) e limoeiro (Ortuño et al., 2004b).

Como no primeiro ciclo, a ADM atingiu seu valor máximo, decaindo posteriormente (Figura 13B). Para o segundo ciclo, a ADM atingiu seu máximo valor em um momento posterior em relação ao ciclo anterior, quando o  $\Psi_{wf}$  já estava em uma queda mais brusca. No segundo ciclo, a ADM apresentou tendência de queda quando o  $\Psi_{wf}$  atingiu o valor aproximado de -1,65 MPa (Figura 14B).

O retardamento do decréscimo de  $\Psi_{wf}$ , concomitantemente com o aumento da ADM e também um valor limite do  $\Psi_{wf}$  mais negativo para a queda da ADM, pode ser explicado pela queda da área foliar total das plantas tratadas (Quadro 2). Após o estresse hídrico no primeiro ciclo, as plantas tratadas foram reidratadas. Ainda assim, a área foliar total apresentada no início do segundo ciclo foi aproximadamente de 34%, menor do que no início do experimento.

Essa redução na área foliar total pode ter causado uma diminuição na superfície transpirante das plantas, diminuindo a perda de água da planta para a atmosfera, mantendo o  $\Psi_{wf}$  e também a ADM das plantas tratadas iguais às plantas controles, por um determinado tempo (Santos e Carlesso, 1998).

Observa-se também que, antes da ADM começar a aumentar, as plantas tratadas não apresentaram diferença significativa da condutância estomática ( $g_s$ ) e também da taxa de assimilação fotossintética ( $A$ ), em relação às plantas controle (Figuras 17A e 17B), o que pode explicar a demora do aparecimento dos sintomas do estresse hídrico.

O aumento da ADM só começou a surgir quando a diminuição da  $g_s$  e  $A$  das plantas tratadas se tornaram mais evidentes, pois a diminuição da água disponível no solo acarretou a diminuição da  $g_s$ , diminuindo o fluxo de água para a planta e entre os tecidos da mesma, indicando um importante grau de regulação estomática. Esse comportamento foi observado em plantas de milho, onde após o corte da irrigação, houve decréscimo na  $g_s$  e aumento da ADM (Katerji et al., 1994).

Outra hipótese é que as plantas apresentaram algum mecanismo de proteção morfológica (murchamento das folhas) e aclimatação (ajustamento osmótico) em resposta ao estresse hídrico, retardando o aparecimento dos sintomas do estresse hídrico, como o  $\Psi_{wf}$  mais negativo e aumento da ADM.

Quando as plantas estão submetidas ao estresse hídrico, os solutos como a prolina, glicina-betaína, ácidos orgânicos ou açúcares no citoplasma são concentrados no interior das células e levam à diminuição do potencial osmótico (Meloni et al., 2004). Em estudos realizados com diferentes genótipos de *C. arabica*, entre eles o Catuaí Vermelho, submetidos ao estresse hídrico, foi observado um ajustamento osmótico via prolina, como forma de aclimatação às condições de seca (Almeida et al., 2007).

A variação diária da densidade de fluxo de seiva ( $J_s$ ) durante o primeiro ciclo indicou uma menor sensibilidade na detecção do estresse hídrico por esse parâmetro, em relação à ADM. Já no primeiro dia após o estresse hídrico, a ADM das plantas tratadas apresentou um aumento em relação ao controle (Figura 12A), fato não indicado para a  $J_s$ , onde somente três dias após início do estresse hídrico, ocorreu uma diminuição da transpiração das plantas tratadas em relação ao controle (Figura 15). Situação semelhante foi encontrada em outros estudos em diferentes espécies lenhosas como pessegueiro (Remorini e Massai, 2003; Conejero et al., 2007), limoeiro (Ortuño et al., 2005) e macieira (Naor e Cohen, 2003).

Porém, a  $J_s$  se mostrou mais sensível em detectar o estresse hídrico do que o  $\Psi_{wf}$ , visto que quando as plantas tratadas apresentaram uma queda brusca da transpiração (Figura 15), não havia diferença significativa entre tratamentos para o  $\Psi_{wf}$  (Figura 12B), resultado também encontrado em pessegueiro (Remorini e Massai, 2003).

Valores relativos de ADM para o primeiro ciclo (tratamento/controle) foram utilizados, juntamente com valores relativos da densidade do fluxo de seiva ( $J_s$ ), com o objetivo de avaliar a ADM com a taxa transpiratória da planta (Figura 16). Por ser um indicador da própria planta, é desejável utilizar os parâmetros derivados da variação do diâmetro do caule na forma de valores relativos, ou seja, valores das plantas tratadas em função dos valores de plantas controle. Estes valores de plantas controles podem ser obtidos em plantas sem limitações hídricas (Goldhamer e Fereres, 2001).

Logo no terceiro dia após imposição do estresse hídrico, a ADM das plantas tratadas apresentou elevação, apresentando valores 22% maiores que as plantas controle, enquanto que a densidade de fluxo de seiva permanecia inalterada, bem próxima da unidade (Figura 16). À medida que o estresse hídrico se tornava mais severo, o valor da ADM das plantas tratadas foi aumentando até atingir seu valor máximo, cerca de 370% do controle, enquanto que a densidade de fluxo de seiva caiu aproximadamente 65% em relação ao controle, indicando a alta sensibilidade da ADM.

Em limoeiros, foi detectado que a ADM apresentou resposta ao estresse hídrico mais cedo do que o fluxo de seiva (Ortuño et al., 2005). Em outro estudo, observou-se que a ADM é mais sensível do que o fluxo de seiva na detecção do estresse hídrico e, também, um indicador mais adequado para a programação da irrigação (Conejero et al., 2007).

Outros parâmetros da variação do diâmetro do caule foram analisados, o mínimo e máximo diâmetro do caule (Mndt e Mxdt) e, também, a variação do diâmetro mínimo e máximo do caule (Dmin e Dmax). Tanto o Mndt quanto a Dmin apresentaram padrão de variação semelhante à ADM nos dois ciclos, indicando o estresse hídrico no mesmo intervalo de tempo, através da diminuição de seus valores até atingirem valores negativos (Figuras 18 e 19A). Estudos em limoeiros indicaram situação semelhante, ocorrendo aumento da ADM concomitantemente com a diminuição da Dmin das plantas tratadas (Ortuño et al., 2004a).

A Dmax e o Mxdt também apresentaram resultados satisfatórios, indicando o estresse hídrico através da diminuição de seus valores, após a imposição do estresse hídrico. Porém, se mostraram menos sensíveis que a ADM e o Mndt e a Dmin, pois a queda dos valores após o estresse hídrico se deu em

um período de tempo maior (Figuras 18 e 19B), fato ocorrido também na cultura do pessegueiro (Goldhamer et al., 1999).

Esses parâmetros (Mndt, Mxdt, Dmin e Dmax) se mostraram satisfatórios na indicação do estresse hídrico por se tratarem de plantas jovens, onde ocorreu um crescimento mais rápido do caule, diferentemente de plantas adultas, com crescimento lento do caule, onde estes parâmetros não respondem muito bem ao estresse hídrico (Goldhamer e Fereres, 2001).

Correlação entre Dmin e Dmax e a densidade de fluxo de seiva (Js) foi realizada para o primeiro ciclo, indicando que houve uma relação direta e linear, à medida que a Dmin e Dmax diminuíram o valor de Js também diminuiu (Figuras 20A e 20B). Resultado semelhante foi encontrado em limoeiros, indicando que ambos os parâmetros podem ser diretamente influenciados pela quantidade de água disponível no solo (Ortuño et al., 2004a, 2004b).

## 6. RESUMO E CONCLUSÕES

Na busca de um manejo racional da irrigação, novas técnicas para detectar a deficiência hídrica nas plantas estão sendo desenvolvidas. As técnicas mais promissoras são aquelas baseadas nas próprias plantas, pois estas se mostraram mais eficientes do que as técnicas que utilizam fatores ambientais na indicação do déficit hídrico.

As medições do fluxo de seiva e o monitoramento do diâmetro do caule (medido através de dendrômetros) estão sendo avaliados para a detecção do estresse hídrico. Assim sendo, este trabalho foi desenvolvido com o objetivo de desenvolver um dendrômetro eventualmente comercializável de baixo custo, capaz de realizar confiavelmente o monitoramento do diâmetro do caule de plantas de café, e verificar se este monitoramento pode ser utilizado na detecção do estresse hídrico, visando sua utilização na programação da irrigação.

O experimento foi conduzido sob condições de casa de vegetação em Viçosa, MG. O material vegetal utilizado foi o cafeeiro (*Coffea arabica*) cv Catuaí Vermelho IAC 44, com aproximadamente um ano de idade. Foi utilizado um delineamento experimental simples, onde foram realizados dois tratamentos, com duas repetições (duas plantas irrigadas e duas sem irrigação). No primeiro ciclo, foram realizadas as seguintes avaliações: medições do diâmetro do caule, densidade de fluxo de seiva,  $\Psi_{wf}$  e área foliar total. Para o segundo ciclo, foram mantidas as seguintes avaliações: medições do diâmetro do caule,  $\Psi_{wf}$  e área

foliar total e foi acrescentada a determinação das trocas gasosas. Concluiu-se que:

O dendrômetro construído no LEAG/UENF mostrou-se adequado para o acompanhamento das microvariações do diâmetro do caule de plantas de café, para fins de detecção do déficit hídrico.

A amplitude diária máxima (ADM) das plantas sem restrição hídrica refletiu diretamente as mudanças das variáveis climáticas (Temperatura média do ar e Déficit de pressão de vapor) e também da evapotranspiração de referência. Assim, valores de referência para ADM podem ser obtidos a fim de usar este parâmetro na programação da irrigação.

A ADM mostrou-se um indicador da planta satisfatório na detecção do estresse hídrico de plantas jovens de café, visto que indicou precocemente a falta de água, antes mesmo do  $\Psi_{wf}$ .

Outros parâmetros derivados da variação do diâmetro do caule (Mndt, Mxdt, Dmin e Dmax) também se mostraram indicadores do estresse hídrico satisfatórios, sendo a Dmin mais sensível que a Dmax.

## 7. RECOMENDAÇÕES

Recomenda-se realizar um melhor acabamento no dendrômetro construído no LEAG/UENF, especialmente no acoplamento do sensor ao instrumento e também no tipo de material utilizado onde o extensômetro é instalado.

Na utilização do dendrômetro para outras culturas ou plantas de café adultas, em diferentes estádios de desenvolvimento, é importante realizar novos experimentos, pois a magnitude da microvariação do caule varia conforme idade da planta, estágio de desenvolvimento e espécie (Huguet et al., 1985; Génard et al., 2001; Goldhamer e Fereres, 2001; Intrigliolo e Castel, 2006).

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABC – ANUÁRIO BRASILEIRO DO CAFÉ. Santa Cruz do Sul. Editora Gazeta Santa Cruz. 136p. 2007.

ABIC – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DE CAFÉ. **Dados gerais.** Disponível em <http://www.abic.com.br/>. Acesso em Dezembro de 2007.

Allen, R.G., Pereira, R.S., Raes, D., Smith, M. (1998) Crop evapotranspiration-guidelines for computing crop water requirements. *Irrigation and Drainage* 56. FAO, Roma.

Almeida, J.A.S., Carvalho, C.R.L., Silvarolla, M.B., Arruda, F., Braghini, M.T., Lima, V.B., Fazuoli, L.C. (2007) Caracterização de respostas morfológicas e fisiológicas de diferentes genótipos de *Coffea* submetidos a estresse hídrico. In: *Simpósio de Pesquisa dos Cafés do Brasil*, 5, Águas de Lindóia, SP: Embrapa Café, CD-ROM, 5p.

Améglio, T., Archer, P., Cruiziat, P., Daudet, F.A., Cohen, M., Valancogne, C., Dayau, S. (1997) A limit in the use of predawn leaf water potential for tree irrigation. *Acta Horticulturae*, 449:431-436.

Améglio, T., Archer, P., Cohen, M., Valancogne, C., DaudeT, F.A., Dayau, S., Cruiziat, P. (1999) Significance and limits in the use of predawn leaf water potential for tree irrigation. *Plant Soil*, 207:155-167.

Angelocci, L.R. (2002) *Água na planta e trocas gasosas/energéticas com a atmosfera: Introdução ao tratamento biofísico*. Piracicaba: O autor, 268p.

Barbosa, D. H. S. G., Vieira, H. D., Partelli, F. L., Souza, R. M. (2006) Estabelecimento de normas DRIS e diagnóstico nutricional do cafeeiro arábica na região noroeste do Estado do Rio de Janeiro. *Ciência Rural*, 36(6):1717-1722.

Barros, R.S, Mota, J.W.S., Damatta F.M., Maestri, M. (1997) Decline of vegetative growth in *Coffea Arabica* L. in relation to leaf temperature, water potential and stomatal conductance. *Field Crops Research*, 54:65-72.

Bernardo, S., Soares, A.A., Mantovani, E.C. (2005) *Manual de Irrigação*. 7. ed. Viçosa, MG: Editora UFV, 611p.

Bridson, D.M. (1982) Studies in *Coffea* and *Psilanthus* (Rubiaceae subfam. Cinchonoideae) fo part 2 of flora of tropical East Africa: Rubiaceae. *Kew Bulletin*, 4:817-859.

Cabibel, B., Isberie, C. (1997). Flux de se`ve et alimentation hydrique de cerisiers irrigue´s ou non en localisation. *Agronomie* 17:97–112.

Carrier, A. (1978) La structure genetique des caféiers spontanés de la region Malgashe (Mascarocoffea). Leer relations avec les caféiers d'origine africaine (Eucoffea). *Memoires ORSTOM*, Paris, 97:1-223.

Chaves, M. M., Flexas, J., Pinheiro, C. (2008). Photosynthesis under Drought and Salt Stress: Regulation Mechanisms from Whole Plant to Cell. *Annals of Botany*, 1-10.

Choné, X., Van Leeuwen, C., Dubourdieu, D., Gaudillere, J.P. (2001) Stem water potential is a sensitive indicator of grapevine water status. *Ann. Bot.* 87:477-483.

Cohen, Y., Amelio, T., Cruiziat, P., Archer, P., Valancogne, C., Dayau, S. (1997) Yield and physiological responses of walnut trees in semiarid conditions: application to irrigation scheduling. *Acta Horticulturae* 449:273-280.

Cohen, M., Goldhamer, D., Fereres, E., Girona J., Mata M. (2001) Assessment of peach tree responses to irrigation water deficits by continuous monitoring of trunk diameter changes. *J. Hort. Sci. Biotech.* 76:55-60.

Conejero, W., Alarcón, J.J., Garcia-Orellana, Y., Nicolas, E., Torrecilas, A. (2007) Evaluation of SAP flow and trunk diameter sensors for irrigation scheduling in early maturing peach trees. *Tree Physiology*, 27(12):1753-1759.

Damatta, F.M., Rena, A.B. (2000) Relações hídricas no cafeeiro. In: *SIMPÓSIO DE PESQUISA DE CAFÉS DO BRASIL*, 1, Poços de Caldas, p.9-44.

Doorenbos, J., Pruitt, W. O. (1977) Las necesidades de agua de los cultivos. *Irrigation and Drainage* 33. FAO, Roma.

Doorenbos, J., Kassam, A.H. (1979) Yeld response to water. *Irrigation and Drainage* 33. FAO, Roma.

Eastman, J., Gray, S.A. (1998) A preliminary evaluation of the suitability of sap flow sensors for use in scheduling vineyard irrigation. *Am. J. Enol. Vitic.* 49:171-176.

- Faria, M.A., Rezende, F.A. (1997) *Irrigação na Cafeicultura*. Lavras: UFLA/FAEPE, 75p.
- Fereres, E., Goldhamer, D., Cohen, M., Girona, J., Mata, M. (1999) Continuous trunk diameter recording can reveal water stress in peach trees. *California Agriculture*. 53(4):21-25.
- Fereres, E., Goldhamer, D. (2003) Suitability of stem diameter variations and water potential as indicators for irrigation scheduling of almond trees. *Journal of Horticultural Science & Biotechnology*. 78(2):139-144.
- Fernández, J.E., Palomo, M.J., Díaz-Espejo, A., Clothier, B.E., Green, S.R., Girón, I.F., Moreno, F. (2001) Heat-pulse measurements of sap flow in olives for automating irrigation: tests, root flow and diagnostics of water stress. *Agr. Water Manage.* 51:99-123.
- Fernandes, A.L.T., Santinato, R., Santo, J.E., Amaral, R. (1998) Comportamento vegetativo-reprodutivo do cafeeiro catuaí cultivado no Oeste Baiano sob irrigação por pivô central. In: *SIMPÓSIO BRASILEIRO DE PESQUISA EM CAFEICULTURA IRRIGADA*, 1, Araguari. Uberlândia: UFU/DEAGO, p.40-44.
- Ferreira, M.I., Zitscher, H. (1996) Measurements performed with Granier method in short trunks near the soil. *Anais do WORKSHOP ON MEASURING SAP FLOW IN INTACT PLANT*, Barcelona, 3p.
- Garnier, E., Berger, A. (1986) Effect of water stress on stem diameter changes of peach trees growing in the field. *Journal of Applied Ecology*, 23:193-209.
- Ginestar, C., Castel, J.R. (1998) Use of stem dendrometers as indicators of water stress in drip-irrigated citrus trees. *Acta Horticulturae*, 421:209-216.
- Goldhamer, D.A., Fereres, E., Mata, M., Girona, J., Cohen, M. (1999) Sensitivity of continuous and discrete plant and soil water status monitoring in peach trees subjected to deficit irrigation. *Journal American Soc. Hort. Sci.* 124:437-444.
- Goldhamer, D.A., Fereres, E. (2001) Irrigation scheduling protocols using continuously recorded trunk diameter measurements. *Irrig. Sci.* 20:115-125.
- Goldhamer, D.A., Fereres, E., Salinas, M. (2003) Can almond trees directly dictate their irrigations needs? *Calif. Agric.* 57:138-144.
- Goldhamer, D.A., Fereres, E. (2004) Irrigation scheduling of almond trees with trunk diameter sensors. *Irrig. Sci.* 23:11-19.
- Granier, A. (1985) Une nouvelle méthode pour la mesure du flux de seve brute dans le tronc des arbres. *Annales des Sciences Forestières*, 42(2):193-200.
- Granier, A., Bréda, N. (1996) Modeling canopy conductance and stand transpiration of an oak forest from sap flow measurements. *Annales des Sciences Forestières*, 53:537-546.

Hanson, B.R., Lamm, F.R. (1995) Drip irrigation of row crops: an overview. *In: INTERNATIONAL MICROIRRIGATION CONGRESS*, 5, Orlando. St. Joseph: ASAE, p.651-655.

Hatfield, J.L., Fuchs, M.F. (1990) Evapotranspiration models. *In: Fereres, E., Goldhamer, D. Management of farm irrigation systems*. Journal of Horticultural Science & Biotechnology. 78(2):139-144.

Higgs, K.H., Jones, H.G. (1984) A microcomputer-based system for continuous measurement and recording fruit diameter in relation to environmental factor. *Journal of Experimental Botany*, 35(160):1646-1655.

Hilgeman, H. (1962) Trunk growth of the Valencia orange in relation to soil moisture and climate. *Proceedings of the American Society for Horticultural Science*, 82:193-199.

Howell, T.A. (1996) Irrigation scheduling research and its impact on water use. *In: Proc. Intl. Conf. Evapotranspiration and Irr. Scheduling*, San Antonio, Texas: Amer. Soc. Agr. Eng, p.21-33.

Hsiao, T.C. (1990) Measurements of plant water status. *In: Irrigation of Agricultural Crops*, Madison: American Society of Agronomy, p.243-279.

Huguet, J.G. (1985) Apréciation de l'état hydrique d'une plante à partir des variations micrométriques de la dimension des fruits ou des tiges au cours de la journée. *Agronomie*, 5(8):733-741.

Huguet, J.G., Orlando, P. (1987) Les besoins en eau et la bioprogrammation. *L'Arboriculture Fruitière*, 396:19-24.

Huguet, J.G., Li, S.H., Lorendeau, J.Y., Pelloux, G. (1992) Specific micromorphometric reactions of fruit trees to water stress and irrigation scheduling automation. *J. Hort. Sci.* 67:631-640.

Intrigliolo, D.S., Castel, J.R. (2006) Usefulness of diurnal trunk shrinkage as a water stress indicator in plum trees. *Tree Physiology*. 26:303-311.

Irvine, J., Grace, J. (1997) Continuous measurement of water tensions in the xylem of trees based on the elastic properties of wood. *Planta*. 202:455-461.

Jackson, R.D. (1982) Canopy temperature and crop water stress: Water Resour. *Journal of Experimental Botany*, 132:67-77.

Jensen, M.E., Burman, R.D., Allen, R.G. (1990) Evapotranspiration and irrigation water requirements. *Manual and reports on engineering practice*, 70. New York: ASCE, 332p.

Karasawa, S. (2001) *Crescimento e produtividade do cafeeiro (Coffea arabica L. cv. Topázio MG-1190) sob diferentes manejos de irrigação localizada*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Lavras – MG, Universidade Federal de Lavras, 72p.

- Katerji, N., Itier, B., Ferreira, I. (1988) Etude de quelques critères indicateurs de l'état hydrique d'une culture de tomate em région semi-aride. *Agronomie*, 8(5):425-433.
- Katerji, N., Tardieu, F., Bethenod, O., Quetin, P. (1994) Behavior of maize stem diameter during drying cycles: comparison of two methods for detecting water stress. *Crop Sci.*, 34:165-169.
- Klepper, B. (1968) Diurnal pattern of water potential in woody plants. *Plant Physiol.* 43:1931-1934.
- Klepper, B., Browning, V.D., Taylor, H.M. (1971) Stem diameter in relation to plant water status. *Plant Physiol.* 48:683-685.
- Kramer, P.J., Boyer, P.J. (1995) *Water relation of plant and soils*. Orlando: Academic Press, 494p.
- Li, S.H., Huguet, J.G., Schoch, P.G., Bussi, C. (1990) Réponse de jeunes pêchers cultivés en pots à différents régimes d'alimentation hydrique. I: Conséquences sur la transpiration, la résistance sotmatique, le potential hydrique foliaire, la photosynthèques et les variations micromorphométriques des tiges. *Agronomie*, 10:263-272.
- Lu, P., Müller, W.J., Chacro, E.K. (2000) Spatial variations in xylem sap flux density in the trunk of orchard-grown, mature mango trees under changing soil water conditions. *Tree Physiology*, 20:683-692.
- Maestri, M., Barros, R.S., Rena, A.B. (2001) Coffee. In: LAST, F.T. *Tree crop ecosystems*. Amsterdam: Elsevier, p.339-360.
- Mantovani, E.C. (1996) Gerenciamento e manejo da irrigação. In: *CURSO DE GESTÃO DE RECURSOS HÍDRICOS PARA O DESENVOLVIMENTO SUSTENTADO DE PROJETOS HIDROAGRÍCOLAS*. Módulo 08. Brasília: ABEAS, 75 p.
- Mantovani, E.C., Soares, A.R. (2003) *Irrigação do cafeeiro: informações técnicas e coletânea de trabalhos*. Viçosa: Associação dos Engenheiros Agrícolas de Minas Gerais, 260p.
- Mantovani, E.C., Bernardo, S., Palaretti, L.F. (2007) *Irrigação princípios e métodos*. 2. ed. Viçosa: UFV, 358p.
- Marin, F.B., Angelocci, L.R., Righi, E.Z., Sentelhas, P.C. (2005) Evapotranspiration and irrigation requirements of a coffee plantation in southern Brazil. *Expl. Agric.* 41:187-197.
- Marsal, J., Mata, M., Arbones, A., Rufat, J., Girona, J. (2002) Regulated déficit irrigation and rectification of irrigation scheduling in young pear trees: na evaluation base on vegetative and productive response. *Europ. J. Agron.* 17:111-122.

Martins, C.P., Vilela, L.A.A., Gomes, N.M. (2002) Influência de diferentes lâminas de irrigação aplicadas nos parâmetros de crescimento do cafeeiro. *In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE PESQUISA EM CAFEICULTURA IRRIGADA*, 5, Araguari-MG, 5:111-115.

Matiello, J. B. (1991) *O café – Do cultivo ao consumo*. São Paulo: Globo, 320p.

Meloni, D.A., Gulotta, M.R., Martínez, C.A., Oliva, M.A. (2004) The effects of salt stress on growth, nitrate reduction and proline and glycinebetaine accumulation in *Prosopis alba*. *Braz.J.Plant Physiol.* 16(1):39-46.

Mendes, A.N.G., Abrahão, E.J., Cambraia, J.F., Guimarães, R.J. (1995) Recomendações Técnicas para a cultura de cafeeiros no sul de Minas. *In: ENCONTRO SUL MINEIRO DE CAFEICULTORES*, Lavras: UFLA, 76p.

Michelakis, N. (1997) Daily stem radius variations as indicators to optimize olive tree irrigation scheduling. *Acta Horticulturae*, 449:297-305.

Molz, F.J., Klepper, B. (1973) On the mechanism of water-stress-induced stem deformation. *Agronomy Journal*. 65:304-306.

Moreno, F., Fernández, J.E., Clothier, B.E., Green, S.R. (1996) Transpiration and root water uptake by olive trees. *Plant Soil*. 184:85-96.

Moreno, F., Conejero, W., Martín-Palomo, M.J., Girón, I.F., Torrecillas, A. (2006) Maximum daily trunk shrinkage reference values for irrigation scheduling in olive trees. *Agricultural Water Management*. 84:290-294.

Moriana, A., Fereres, E., Orgaz, F., Castro, J., Humanes, M.D., Pastor, M. (2000) The relations between trunk diameter fluctuations and the water status in olive trees (*Olea europea* L.). *Acta Horticulturae*, 537:293-297.

Mudrik, A.S. (2005) *Manejo da irrigação por gotejamento em cafeeiros nas condições edafoclimáticas do cerrado do Triângulo Mineiro*. Tese (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Viçosa – MG, Universidade Federal de Viçosa - UFV, 75p.

Naor, A. (1999) Midday stem water potential as a plant water stress indicator for irrigation scheduling in fruit trees. *Acta Hort.* 537:447-454.

Naor, A. (2003) Sensitivity and variability of maximum trunk shrinkage, midday stem water potential, and transpiration rate in response to withholding irrigation from field-grown apple trees. *Hort. Sci.* 38(4):547-551.

Naor, A. (2006) Irrigation scheduling and evaluation of tree water status in deciduous orchards. *Hort. Rev.* 32:111-166.

Naor, A., Klein, I., Doron, I. (1995) Stem water potential and apple fruit size. *J. Amer. Soc. Hort. Sci.* 120:577-582.

Naor, A., Klein, I., Doron, I., Gal, Y., Ben-David, Z., Bravdo, B. (1997) The effect of irrigation and crop load on stem water potential and apple fruit size. *J. Hort. Sci.* 72:765-771.

Naor, A., Klein, I., Hupert, H., Greenblat, Y., Peres, M., Kaufman, A. (1999) Water stress and crop level interactions in relation to nectarine yield, fruit size distribution and water potentials. *J. Amer. Soc. Hort. Sci.* 124:189-193.

Naor, A., Cohen, S. (2003). Sensitivity and variability of maximum trunk shrinkage, midday stem water potential and transpiration rate in response to withholding irrigation from field-grown apple trees. *HortScience.* 38:547-551.

Nicolás, E., Torrecillas, A., Ortuño, M.F., Domingo, R., Alarcón, J.J. (2005) Evaluation of transpiration in adult apricot trees from sap flow measurements. *Agr. Water Manage.* 72:131-145.

Ortuño, M.F., Alarcón, J.J., Nicolás, E., Torrecillas, A. (2004a) Comparison of continuously recorded plant-based water stress indicators for young lemon trees. *Plant and Soil.* 267:263-270.

Ortuño, M.F., Alarcón, J.J., Nicolás, E., Torrecillas, A. (2004b) Interpreting trunk diameter changes in Young lemon trees under deficit irrigation. *Plant Sci.* 167:275-280.

Ortuño, M.F., Garcia-Orellana, Y., Conejero, W., Ruiz-Sánchez, M.C., Alarcón, J.J., Torrecillas, A. (2005) Stem and leaf water potentials, gas exchange, sap flow, and trunk diameter fluctuations for detecting water stress in lemon trees. *Springer-Verlag.* p.1-8.

Ortuño, M.F., Garcia-Orellana, Y., Conejero, W., Ruiz-Sánchez, M.C., Mounzer, O., Alarcón, J.J., Torrecillas, A. (2006) Relationships between climatic variables and sap flow, stem water potential and maximum daily trunk shrinkage in lemon trees. *Plant and Soil.* 279:229-242.

Parlange, J.Y., Turner, N.C., Waggoner, P.E. (1975) Water uptake, diameter change and nonlinear diffusion in tree stems. *Plant Physiology,* 55:247-250.

Phene, C.J., Reginato, R.J., Itier, B., Tanner, B.R. (1990) Sensing irrigation needs. *In: Management of farm irrigation system,* St. Joseph, Mich.: Amer. Soc. Agr. Eng., p.207-261.

Remorini, D., Massai, R. (2003) Comparison of water status indicators for young peach trees. *Irrig. Sci.* 22:39-46.

Rena, A.B., Maestri, M. (1987) Ecofisiologia do cafeeiro. *In: Ecofisiologia da Produção Agrícola.* Piracicaba: Associação Brasileira para Pesquisa da Potassa e do Fosfato, p.34-41.

Rojas, J.S.D. (2003) *Avaliação do uso do fluxo de seiva e da variação do diâmetro do caule e de ramos na determinação das condições hídricas de citros, como base para o manejo de irrigação.* Tese (Doutorado em Agronomia) – Piracicaba –

SP, Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, 110p.

Rotondano, A.K.F. (2004) *Desenvolvimento vegetativo, produção e qualidade dos grãos do cafeeiro (Coffea arabica L.) sob diferentes lâminas de irrigação*. Dissertação (Mestrado) – Uberlândia – MG, Universidade Federal de Uberlândia, 60p.

Russo, D., Bresler, E. (1982) Soil hydraulic properties as a stochastic process: II. Error of estimates in a heterogenous field. *Soil. Sci. Soc. Amer. J.* 46:20-26.

Santos, R.F., Carlesso, R. (1998) Déficit hídrico e os processos morfológico e fisiológico das plantas. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*. 2(3):287-294.

Scaloppi, E.D. (1986) Características dos principais sistemas de irrigação. *Irrigação e Tecnologia Moderna - ITEM*, 25:22-27.

Sediyama, G.C. (1996) Evapotranspiração: necessidade de água para as plantas cultivadas. *Curso de Engenharia e Manejo de Irrigação, módulo 2*, Brasília, DF: ABEAS; Viçosa, MG: DEA/UFV, 173p.

Sevanto, S., Vesala, T., Perämäki, M., Nikinmaa, E. (2003) Sugar transport together with environmental conditions controls time lags between xylem and stem diameter changes. *Plant, Cell and Environment*. 26:1257-1265.

Shackel, K.A., Ahmadi, H., Biasi, W. (1997) Plant water status as an index of irrigation need in deciduous fruit trees. *HortTechnology*, 7(1):23-29.

Silva, M.G. (2008) *Desenvolvimento de sensor de fluxo de seiva e de coeficiente indicador de estresse hídrico para plantas de cafeeiro arábica*. Tese (Doutorado em Produção Vegetal) – Campos dos Goytacazes – RJ, Universidade Estadual do Norte Fluminense – UENF, 100p.

Silva, A.M. da, Lima, E.P., Silva, E.L. da, Coelho, G., Coelho M.R. Coelho, G.S. Castro, F.R. de. (2000) Avaliação do status hídrico do café sob efeito de irrigação através de algumas características fisiológicas. In: *SIMPÓSIO DE PESQUISA DOS CAFÉS DO BRASIL*, 1, Poços de Caldas. Poços de Caldas: EMBRAPA, v.2, p.914-916.

Simonneau, T., Habib, R., Goutouly, J.P., Huguet, J.G. (1993) Diurnal changes in stem diameter depend upon variations in water content: Direct evidence in peach trees. *Journal of Experimental Botany*, 44(260):615-621.

Smith, D.M., Allen, S.J. (1996) Measurement of sap flow in plants stems. *Journal of Experimental Botany*, 47(305):1833-1844.

So, H.B., Reicosky, D.C., Taylor, H.M. (1979) Utility of stem diameter changes as predictors of plant canopy water potential. *Agronomy Journal*, 71:707-713.

Soares, A.R. (2001) *Irrigação, fertirrigação, fisiologia e produção em cafeeiros adultos na região da Zona da Mata de Minas Gerais*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Viçosa – MG, Universidade Federal de Viçosa - UFV, 90p.

Soares, A.R. (2005) *Efeito da lâmina de irrigação e da porcentagem de área molhada no desenvolvimento e produção do cafeeiro em Patrocínio, MG*. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Viçosa – MG, Universidade Federal de Viçosa – UFV, 63p.

Soares, A.R., Mantovani, E.C., Rena, A.B., Soares, A.A. (2005) Irrigação e fisiologia da floração em cafeeiros adultos na região da zona da mata de Minas Gerais. *Acta Scientiarum Agronomy*. 27(1):117-125.

Sofo, A., Dichio, B., Xiloyannis, C., Masia, A. (2004) Lipoxygenase activity and proline accumulation in leaves and roots of olive trees in response to drought stress. *Physiologia Plantarum*. 121:58-65.

Vasconcelos, R.C.; Souza, C.A.S.; Dias, F.P.; Guimarães, R.J. - Cultivo do Cafeeiro em Condições de Adensamento: [http://www.editora.ufla.br/BolExtensao/pdfBE/bol\\_25.pdf](http://www.editora.ufla.br/BolExtensao/pdfBE/bol_25.pdf) em 04/03/2008.

Vélez, J.E. (2004) *Programación de riego en cítricos en base a sensores de medida del estado hídrico del suelo y la planta*. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Valencia, 113 p.

Vicente, J.R. (2004) Evolução das Exportações Brasileiras de café, 1997-2002. *In: SIMPÓSIO DE PESQUISAS DO CAFÉ DO BRASIL*, 3, Porto Seguro, p.379.

Warrick, A.W., Nielsen, D.R. (1980) Spatial variability of soil physical properties in the field. *In: Applications of soil physics*. New York: Academic Press, p.319-344.