

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

**Padrões de resposta termal ao déficit hídrico na cultura do café  
irrigado por gotejamento**

**Jéfferson de Oliveira Costa**

Dissertação apresentada para obtenção do título de  
Mestre em Ciências. Área de concentração:  
Engenharia de Sistemas Agrícolas

**Piracicaba  
2016**

**Jéfferson de Oliveira Costa**  
**Engenheiro Agrônomo**

**Padrões de resposta termal ao déficit hídrico na cultura do café irrigado por  
gotejamento**

versão revisada de acordo com a resolução CoPGr 6018 de 2011

Orientador:  
Prof. Dr. **RUBENS DUARTE COELHO**

Dissertação apresentada para obtenção do título de  
Mestre em Ciências. Área de concentração:  
Engenharia de Sistemas Agrícolas

**Piracicaba**  
**2016**

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

Costa, Jéfferson de Oliveira

Padrões de resposta termal ao déficit hídrico na cultura do café irrigado por gotejamento / Jéfferson de Oliveira Costa. - - versão revisada de acordo com a resolução CoPGr 6018 de 2011. - - Piracicaba, 2016.

98 p. : il.

Dissertação (Mestrado) - - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz".

1. *Coffea arabica* 2. Câmara térmica 3. CWSI 4. Potencial hídrico I. Título

CDD 633.73  
C837p

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

Aos meus pais, Veraldino Gomes e Maria de Oliveira, que são a base da minha vida pessoal e profissional.

**DEDICO**

Às minhas irmãs Karla e Geicilene e aos meus irmãos Cleiton, Josuelmo e Jeison, companheiros eternos na minha jornada da vida.

**OFEREÇO**



## AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, por me possibilitar chegar até aqui e por nunca ter permitido que eu abandonasse a minha fé.

Agradeço aos meus pais, meus irmãos e demais familiares, pelo apoio e o carinho.

À Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” (ESALQ-USP), pela oportunidade de melhorar a minha formação.

Ao professor Dr. Rubens Duarte Coelho, por acreditar no meu potencial, pela orientação, pela amizade e pelo apoio total.

Aos amigos Dr. André Luís Teixeira Fernandes e Dr. Eusímio Felisbino Fraga Júnior pelo incentivo e pelas contribuições na realização deste trabalho.

Aos professores do Departamento de Engenharia de Biosistemas, pelos ensinamentos e por serem exemplos de profissionalismo, em especial aos professores Dra. Patrícia Alves Angélica Marques, Dr. Paulo César Sentelhas e Dr. Marcos Vinícius Folegatti pelas sugestões dadas nas etapas de plano de pesquisa, qualificação e defesa.

Aos funcionários deste mesmo departamento, pela disposição, generosidade e companheirismo.

Aos amigos da pós-graduação: Alex Nunes, Timóteo Herculino, Marcos Amaral, Lucas Santos, Daniel Leal, Fernando Barbosa, Nathália Lopes, Ailson Maciel, Asdrubal Farias, Maria Alejandra, Jefferson Vieira, Débora Pantojo, Wagner Wolff, Artur Carniato, Luiz Sobenko, Danilo Gomes, Bruno Araújo, Pedro Rony, José Leôncio, Osvaldo Nogueira, Hermes Rocha, Livia Previatello, João Paulo, Éder Duarte, Irineu Pedro, Otávio Neto, Rogério Lavanholi, Fabrício de Oliveira, Luís Carvalho, Acácio Perboni e outros, pela amizade e ensinamentos.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pela concessão da bolsa de estudos.

Por fim, agradeço a todos que de forma direta ou indireta contribuíram para a realização deste trabalho.



## BIOGRAFIA

Jéfferson de Oliveira Costa, nasceu na cidade de Taiobeiras, estado de Minas Gerais, no dia 17 de maio de 1988, filho de Veraldino Gomes Costa e Maria de Oliveira Costa. Coursou o ensino fundamental na Escola Estadual Deputado Chaves Ribeiro (1ª a 4ª série) e na Escola Estadual Osvaldo Lucas Mendes (5ª a 8ª). Em 2003, entrou na Escola Agrotécnica Federal de Salinas-MG onde cursou o ensino médio concomitante ao ensino técnico em agropecuária. No ano de 2008 ingressou nas Faculdades Associadas de Uberaba no curso de agronomia e obteve o título de Engenheiro Agrônomo em 2011. Em julho de 2014, iniciou o curso de mestrado no programa de pós-graduação de Engenharia de Biosistemas da ESALQ-USP. Dois anos depois, submeteu-se à defesa de dissertação para obtenção do título de “Mestre em Ciências”.





**“Em seu coração o homem planeja o seu caminho,  
mas o Senhor determina os seus passos”.**

**Provérbios 16:9**



## SUMÁRIO

RESUMO.....	13
ABSTRACT .....	15
LISTA DE FIGURAS .....	17
LISTA DE TABELAS .....	21
1 INTRODUÇÃO .....	23
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	25
2.1 Cultura do café (aspectos gerais).....	25
2.2 Relações hídricas.....	28
2.2.1 Potencial de água na folha .....	29
2.3 Relações radiométricas .....	31
2.3.1 Termometria por infravermelho .....	32
2.3.2 <i>Crop Water Stress Index</i> (CWSI) .....	34
3 MATERIAL E MÉTODOS.....	37
3.1 Localização e caracterização da área experimental.....	37
3.2 Implantação e condução do experimento.....	38
3.2.1 Plantio e manejo nutricional .....	38
3.2.2 Manejo fitossanitário e cultural .....	44
3.2.3 Manejo da irrigação .....	45
3.2.4 Delineamento experimental e tratamentos .....	50
3.3 Análises das plantas .....	52
3.3.1 Fração de radiação fotossinteticamente ativa .....	52
3.3.2 Potencial de água na folha .....	54
3.3.3 Temperatura foliar .....	55
3.3.4 <i>Crop Water Stress Index</i> (CWSI) .....	56
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	61
4.1 Dados meteorológicos.....	61
4.2 Dados da irrigação .....	65
4.3 Fração de radiação fotossinteticamente ativa .....	66
4.4 Potencial de água na folha .....	70
4.5 Temperatura foliar .....	74
4.6 CWSI x potencial de água na folha .....	80
5 CONCLUSÕES .....	87

REFERÊNCIAS ..... 89  
APÊNDICES ..... 95

## RESUMO

### Padrões de resposta termal ao déficit hídrico na cultura do café irrigado por gotejamento

O Brasil é destaque mundial na produção, na exportação e no consumo de café. Esta cultura ocupa cerca de dois milhões de hectares no território brasileiro, sendo plantada principalmente nos estados de MG, ES, SP e BA. A irrigação está presente em cerca de 10% da área plantada do cafeeiro arábica, já para o café robusta, este valor chega a 35%, o que torna o café uma das principais culturas irrigadas do Brasil. Porém, o déficit hídrico tornou-se o principal fator limitante da produção cafeeira, devido a expansão da cafeicultura para áreas consideradas marginais. A resposta do cafeeiro ao estresse hídrico pode ser avaliada utilizando-se medidas de potencial de água na folha no pré amanhecer, no entanto, essa metodologia restringe-se a atividades de pesquisa. O uso do CWSI (*Crop Water Stress Index*) calculado através da temperatura foliar como indicativo do potencial hídrico pode ser uma alternativa. O objetivo deste trabalho foi definir as relações entre o potencial de água na folha da cultura do café com o CWSI calculado através de medidas de temperatura com canhão infravermelho e com câmara térmica e analisar se estas relações apresentam bons índices de correlação, de precisão e de acurácia. O estudo foi realizado em um ambiente protegido localizado na área de pesquisa do Departamento de Engenharia de Biosistemas na Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”. A espécie plantada foi a *Coffea arabica* da variedade Catuaí Vermelho IAC 144, o sistema de irrigação adotado foi o gotejamento e o manejo foi feito por tensiometria. Utilizou-se o delineamento em blocos casualizados, sendo este formado por quatro blocos e quatro lâminas de irrigação (L130%, L100%, L70% e L40%) aplicadas em quatro épocas distintas (30/03 a 24/04, 07/06 a 02/07, 17/08 a 11/09 e 10/10 a 04/11) ao longo do ano de 2015. A unidade experimental foi representada por uma caixa com uma planta. Foram avaliadas a fração de radiação fotossinteticamente ativa interceptada, o potencial de água na folha e a temperatura foliar. A partir dos dados de temperatura foliar e dos dados meteorológicos calculou-se o CWSI. As três variáveis avaliadas apresentaram relações significativas com os tratamentos impostos. O CWSI calculado para as diferentes situações e o potencial de água na folha apresentaram correlações bem representadas pelos modelos linear e cúbico. Os mesmos modelos apresentaram altos índices de precisão e acurácia. Conclui-se que o CWSI é um bom indicador do potencial hídrico da cultura do cafeeiro e pode substituir medidas do potencial de água na folha realizadas na câmara de Scholander.

Palavras-chave: *Coffea arabica*; Câmera térmica; CWSI; Potencial hídrico



## ABSTRACT

### Standards of thermal response to drought in irrigated coffee crop drip

Brazil is the world featured in production, export and consumption of coffee. This crop occupies about two million hectares in our country, it is mainly planted in state MG, ES, SP and BA. Irrigation is present in about 10% of the area planted arabica coffee, as for robusta coffee, this figure reaches 35%, which makes coffee one of the main irrigated crops in Brazil. But the drought has become the main limiting factor of coffee production due to the coffee growing expansion into areas considered marginal. The coffee response to water stress can be evaluated using water potential measurements on the sheet in the pre dawn, however, this methodology is limited to research activities. The use of CWSI (*Crop Water Stress Index*) calculated by leaf temperature as an indicator of water potential may be an alternative. The objective of this study was to define the relationship between the potential of water in the coffee culture of the sheet with the CWSI calculated from temperature measurements with infrared gun and thermal camera and analyze if these relations have good levels of correlation, accuracy and accuracy. The study was conducted in a protected environment located in the area of research in the Department of Biosystems Engineering at the School of Agriculture "Luiz de Queiroz". The planted species was the *Coffea arabica* variety Catuaí IAC 144, the adopted irrigation system was dripping and management was made by tensiometers. We used the randomized block design, which is made up of four blocks and four irrigation levels (L130%, L100%, L70% and L40%) applied in four different times (30/03 a 24/04, 07/06 a 02/07, 17/08 a 11/09 e 10/10 a 04/11) the 2015 year long. The unit experimental was represented by a box with a plant. We evaluated the intercepted photosynthetically active radiation fraction, water potential in the leaf and the leaf temperature. From the leaf temperature data and meteorological data we calculated the CWSI. The three variables evaluated showed significant relationships with tax treatments. The CWSI calculated for different situations and the potential of water in the sheet showed correlations well represented by linear and cubic models. The same models showed high precision and accuracy. It is concluded that the CWSI is a good indicator of water potential of the coffee crop and can replace water potential measurements on the sheet held in Scholander chamber.

Keywords: *Coffea arabica*; Camera thermal; CWSI; Water potential





## LISTA DE FIGURAS

- Figura 1 – Esquemática das fases fenológicas em ciclo bianual do cafeeiro arábica para as condições climáticas do Brasil.....26
- Figura 2 – Localização da área de pesquisa do Departamento de Engenharia de Biosistemas e visão interna do ambiente protegido onde o experimento foi conduzido .....37
- Figura 3 – Imagens da estruturação da área experimental. Vista da distribuição das caixas de fibrocimento em quatro faixas (A); Camada de brita posta no fundo das caixas (B); Revestimento feito com manta geotêxtil “Bidim” e tubo de acesso para drenagem (C); Solo utilizado no interior das caixas (D) .....38
- Figura 4 – Imagens das atividades do plantio. Aplicação a lanço do calcário dolomítico (A); Abertura de covas para o plantio das mudas (B); Mudanças utilizadas no plantio apresentando boa sanidade (C); Sistema radicular com bom desenvolvimento proporcionado pelo recipiente de plantio das mudas (D) .....41
- Figura 5 – Imagens da condução da cultura após o plantio. Vista da superfície das caixas cobertas com fibra de coco (A); Cultura com sete meses de idade, quando se realizou a 2ª amostragem de solo (B); Trado utilizado para retirar as amostras de solo (C); Caixa d’água utilizada para mistura de fertilizantes aplicados via água de irrigação (D); Cultura com um ano e meio de idade (E); Cultura com dois anos de idade (F) .....43
- Figura 6 – Esquema do sistema de irrigação utilizado no experimento .....46
- Figura 7 – Curvas de retenção de água no solo nas profundidades 0-20, 20-40 e 40-60 cm .....46
- Figura 8 – Tensiômetros instalados nas três profundidades (A); Tensímetro digital utilizado nas leituras de tensão de água no solo (B).....48
- Figura 9 – Esquema da distribuição dos blocos e dos tratamentos na área experimental.....51
- Figura 10 – Imagens das avaliações da fração de radiação fotossinteticamente ativa interceptada. Equipamento SunScan utilizado nas avaliações (A); Detalhe do momento da leitura com a barra de sensores (B); Detalhe do sensor de radiação solar incidente sobre o dossel montado em base

nivelada (C); Esquema dos quadrantes avaliados no dossel da planta (D)..... 53

- Figura 11 – Imagens das avaliações do potencial de água na folha. Câmara de pressão utilizada nas medidas de potencial de água na folha (A); Detalhe da aferição do potencial de água na folha (B); Coleta das folhas para avaliação (C); Caixa térmica utilizada no transporte das amostras (D)..... 54
- Figura 12 – Canhão infravermelho (A); Câmera térmica utilizada no experimento (B); Imagem térmica no software FLIR Tools (C) ..... 56
- Figura 13 – Variação diária da temperatura máxima, mínima e média ao longo do ano de 2015 (A); Variação diária da radiação solar global e da umidade relativa média no mesmo período (B); Variação diária da evapotranspiração de referência estimada pelos métodos de Penman-Monteith e Priestley Taylor também no mesmo período (C)..... 62
- Figura 14 – Variação diária da temperatura máxima, mínima e média nas quatro épocas de imposição dos tratamentos (A); Variação diária da radiação solar global e da umidade relativa média no mesmo período (B); Variação diária da evapotranspiração de referência estimada pelos métodos de Penman-Monteith e Priestley Taylor também no mesmo período (C) ..... 64
- Figura 15 – Tensão de água no solo medida nas profundidades de 20, 40 e 60 cm nas quatro épocas de imposição dos tratamentos..... 66
- Figura 16 – Lâminas de irrigação aplicadas nos tratamentos L130%, L100%, L70% e L40% nas quatro épocas de imposição dos tratamentos ..... 66
- Figura 17 – Mapas do percentual de radiação fotossinteticamente ativa incidente em cada quadrante amostrado no dossel do cafeeiro. Mapa com média das plantas submetidas ao tratamento L130% (A); Mapa com média das plantas submetidas ao tratamento L100% (B); Mapa com média das plantas submetidas ao tratamento L70% (C); Mapa com média das plantas submetidas ao tratamento L40% (D)..... 68
- Figura 18 – Porcentagem de radiação fotossinteticamente ativa incidente no terço superior (T.S), no terço médio (T.M) e no terço inferior (T.I) de plantas submetidas a diferentes lâminas de irrigação (L130%, L100%, L70% e L40%). Letras maiúsculas distintas dentro da mesma lâmina de

- irrigação e letras minúsculas distintas dentro da mesma parte da planta diferem entre si a um nível de 5% de probabilidade pelo teste de Tukey .....69
- Figura 19 – Gráficos box-plot para valores de potencial de água na folha em diferentes lâminas de irrigação medidos aos 6 dias após a imposição dos tratamentos (A); 12 dias após a imposição dos tratamentos (B); 18 dias após a imposição dos tratamentos (C); 24 dias após a imposição dos tratamentos (D). Letras distintas diferem entre si a um nível de 5% de probabilidade pelo teste de Tukey.....72
- Figura 20 – Potencial de água na folha em função de diferentes lâminas de irrigação .....73
- Figura 21 – Gráficos box-plot para valores de temperatura foliar medida com o canhão infravermelho em diferentes lâminas de irrigação aos 6 dias após a imposição dos tratamentos (A); aos 12 dias após a imposição dos tratamentos (B); aos 18 dias após a imposição dos tratamentos (C); aos 24 dias após a imposição dos tratamentos (D). Letras distintas diferem entre si a um nível de 5% de probabilidade pelo teste de Tukey .....75
- Figura 22 – Gráfico box-plot para valores de temperatura foliar medida com a câmara térmica em diferentes lâminas de irrigação nas quatro épocas de imposição dos tratamentos. Letras distintas diferem entre si a um nível de 5% de probabilidade pelo teste de Tukey .....77
- Figura 23 – Temperatura foliar medida com a câmara térmica (o) e com o canhão infravermelho ( $\Delta$ ) em função de diferentes lâminas de irrigação.....79
- Figura 24 – Potencial de água na folha em função do CWSI observado (A) e estimado (B) obtidos a partir dos dados de temperatura foliar do canhão infravermelho.....81
- Figura 25 – Gráficos de correlação entre o potencial de água na folha medido (MPa) e o potencial de água na folha estimado através das equações definidas quando utilizou-se o canhão infravermelho. Gráficos da correlação citada utilizando a equação definida para o CWSI observado no modelo linear (A) e no modelo cúbico (B); Gráficos da correlação citada utilizando a equação definida para o CWSI estimado no modelo linear (C) e no modelo cúbico (D) .....82

- Figura 26 – Potencial de água na folha em função do CWSI observado (A) e estimado (B) obtidos a partir dos dados de temperatura foliar da câmara térmica ..... 84
- Figura 27 – Gráficos de correlação entre o potencial de água na folha medido (MPa) e o potencial de água na folha estimado através das equações definidas quando utilizou-se a câmara térmica. Gráfico da correlação citada utilizando a equação definida para o CWSI observado no modelo linear (A); Gráfico da correlação citada utilizando a equação definida para o CWSI estimado no modelo linear (B) ..... 85

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Parâmetro para a definição da aptidão hídrica do cafeeiro arábica .....	27
Tabela 2 – Área colhida e porcentagem de área irrigada de café arábica e robusta no Brasil .....	28
Tabela 3 – Resultado da análise química do solo para macronutrientes feita antes do plantio.....	39
Tabela 4 – Resultado da análise química do solo para micronutrientes feita antes do plantio.....	39
Tabela 5 – Produtos, quantidades e nutrientes fornecidos pelos fertilizantes e corretivos utilizados no plantio .....	40
Tabela 6 – Quantidades e épocas de aplicação dos fertilizantes pelo sistema de fertirrigação para nutrição das plantas via solo no 1º ano.....	41
Tabela 7 – Resultado da análise química do solo para macronutrientes feita no 2º ano .....	42
Tabela 8 – Resultado da análise química do solo para micronutrientes feita no 2º ano .....	42
Tabela 9 – Resultado da análise foliar para macro e micronutrientes feita no 2º ano .....	42
Tabela 10 – Quantidades e épocas de aplicação dos fertilizantes pelo sistema de fertirrigação para nutrição das plantas via solo no 2º ano.....	43
Tabela 11 – Produtos utilizados no manejo fitossanitário e nas adubações foliares no período de condução do experimento .....	44
Tabela 12 – Caracterização físico-hídrica do solo utilizado no experimento .....	47
Tabela 13 – Valores de umidade de saturação ( $\theta_s$ ) e residual ( $\theta_r$ ), e dos parâmetros empíricos ( $\alpha$ , $n$ e $m$ ) do modelo de Van Genuchten (1980) .....	47
Tabela 14 – Distribuição dos graus de liberdade (G.L.) para as fontes de variação (F.V.), de acordo com o delineamento experimental adotado.....	50
Tabela 15 – Resumo da análise de variância da fração de radiação fotossinteticamente ativa incidente em diferentes porções do dossel do cafeeiro .....	67
Tabela 16 – Resumo da análise de variância do potencial de água na folha.....	70
Tabela 17 – Resumo da análise de variância da temperatura foliar utilizando o canhão infravermelho.....	74

Tabela 18 – Resumo da análise de variância da temperatura foliar utilizando a câmara térmica.....	76
---	----

## 1 INTRODUÇÃO

O Brasil é o maior produtor e exportador de café do mundo, no ano de 2015 o país atingiu 44,2 milhões de sacas produzidas, o que representou 35% de toda a produção global. O total exportado no mesmo ano foi de 35,9 milhões de sacas. Além disso, é o segundo maior mercado consumidor desse grão (FNP CONSULTORIA E COMÉRCIO, 2016).

A área plantada de café no território brasileiro é de aproximadamente dois milhões de hectares, tendo como destaques os estados de Minas Gerais (52% da área plantada), Espírito Santo (23%), São Paulo (9%) e Bahia (8%) (FNP CONSULTORIA E COMÉRCIO, 2016).

Nesta cultura de elevada importância para a economia brasileira, o déficit hídrico é um fator limitante responsável pela maior parte da variabilidade final da produção. Dessa forma, o conhecimento das relações hídricas do cafeeiro se faz necessária, uma vez que reduções na disponibilidade da água podem diminuir substancialmente o seu crescimento, ainda que não se observem sintomas de murcha nas folhas ou quaisquer outros sinais visíveis de déficit hídrico (DAMATTA; RAMALHO, 2006).

Para avaliar a resposta do cafeeiro ao estresse hídrico podem ser usadas diversas metodologias, destacando-se o potencial de água na folha no pré amanhecer, que de acordo Rena e Maestri (2000), indica com precisão o estado hídrico da planta.

No entanto, este método é destrutivo, não sendo possível sua automatização, requerendo um número de folhas consideravelmente elevado para uma boa análise e cuidados especiais na coleta e no transporte das folhas que serão avaliadas, o que requer mão de obra qualificada, restringindo seu uso mais para atividades de pesquisa.

O parâmetro *Crop Water Stress Index* (CWSI), determinado através da temperatura foliar, pode ser uma alternativa para obtenção do estado hídrico das plantas e este tem sido estudado em diversas culturas como cana-de-açúcar (TRENTIN, 2010), citrus (ZARCO-TEJADA; GONZÁLEZ-DUGO; BERNI, 2012), uva (BELLVERT et al., 2014), oliveira (BERNI et al., 2009), algodão (COHEN et al., 2014), tomate (RAMÍREZ et al., 2015a) e outras. Nestes estudos, o CWSI tem se mostrado um bom indicador do estado hídrico das plantas. Para a cultura do café,



ainda não existe na literatura trabalhos que relacionem o CWSI com o potencial de água na folha.

Diante da hipótese de que o CWSI pode substituir medidas do potencial de água na folha realizadas na câmara de Scholander, e assim, ser um bom indicador do estado hídrico da cultura do cafeeiro, o objetivo deste trabalho foi definir as relações entre o potencial de água na folha do cafeeiro com o CWSI derivado de medidas de temperatura com canhão infravermelho e com câmera térmica e, mais especificamente, analisar a correlação entre as duas variáveis.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Nesta revisão serão abordados os tópicos de aspectos gerais (histórico, morfologia, fenologia, necessidades climáticas e irrigação), relações hídricas e relações radiométricas do cafeeiro.

### 2.1 Cultura do café (aspectos gerais)

O gênero *Coffea* é representado por mais de 100 espécies, destacando-se a *Coffea arabica* e a *Coffea canephora*, devido às suas características comerciais. Estas espécies são designadas comumente de café arábica e café robusta, respectivamente (DAVIS et al., 2006).

O café arábica é originário da Etiópia, nordeste da África, e ainda hoje faz parte da vegetação nativa desta região. A Arábia Saudita foi a responsável pela propagação da cultura do café. O nome café não é originário da Kaffa, local de origem da planta, e sim da palavra árabe *qahwa*, que significa vinho. Por esse motivo, o café era conhecido como "vinho da Arábia" quando chegou à Europa no século XIV (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DE CAFÉ - ABIC, 2016).

A sua entrada no Brasil foi pela região norte, mais precisamente em Belém, em 1727, trazido da Guiana Francesa pelo Sargento-Mor Francisco de Mello Palheta a pedido do governador do Maranhão e Grão Pará, que o enviara às Guianas com essa missão (MATIELLO, 1991).

O cultivo de café se espalhou rapidamente, com produção voltada para o mercado doméstico. Em sua trajetória pelo Brasil, o café passou pelo Maranhão, Bahia, Rio de Janeiro, São Paulo, Paraná e Minas Gerais. Em um espaço de tempo relativamente curto, o café passou de uma posição relativamente secundária para a de produto base da economia brasileira (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DE CAFÉ - ABIC, 2016).

Atualmente, o Brasil é o maior produtor e exportador mundial de café, tendo exportado, em 2015, mais de 35 milhões de sacas, equivalentes a 10,8 bilhões de dólares, sendo responsável por 5,6% do total das exportações brasileiras (BRASIL, 2016).

Quanto a sua morfologia, o cafeeiro é uma planta perene que apresenta porte arbustivo ou arbóreo, com caule lenhoso, folhas persistentes e flores

hermafroditas. Os ramos são dimórficos, sendo o seu dimorfismo relacionado à direção dos ramos em seu crescimento. Aqueles que crescem em sentido vertical são os ramos ortotrópicos, que formam as hastes ou tronco. Os ramos laterais (produtivos) saem destas hastes, crescem na horizontal e são chamados ramos plagiotrópicos (MATIELLO et al., 2002).

O café apresenta seis fases fenológicas distintas, realizando dois processos concorrentes em cada ano, sendo um processo referente à frutificação no segmento de ramo formado no ano anterior e o outro processo é relativo à formação de novo ramo para frutificação no ano seguinte, conforme a Figura 1 (CAMARGO; CAMARGO, 2001).

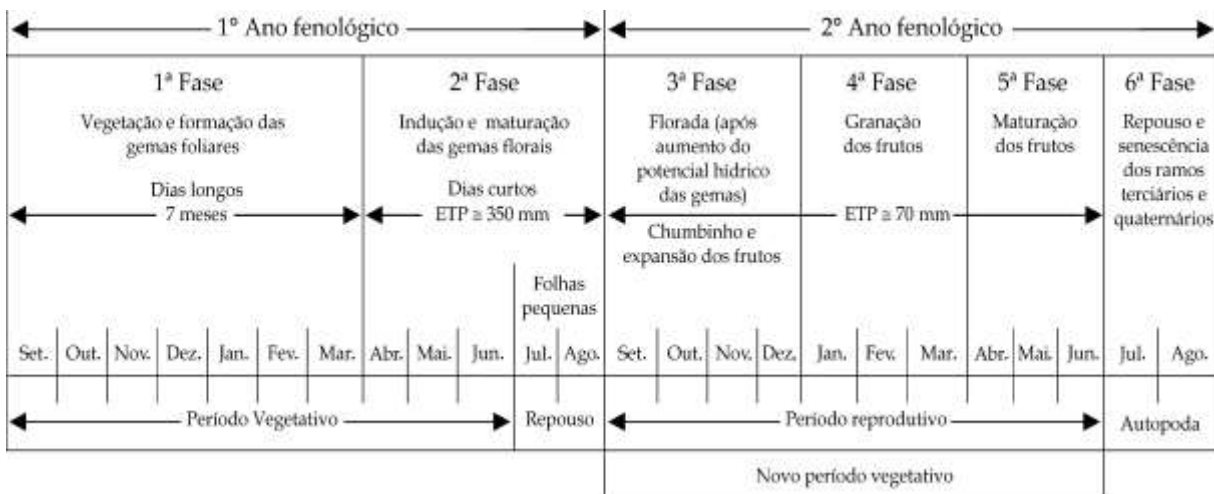


Figura 1 – Esquematização das fases fenológicas em ciclo bianual do cafeeiro arábica para as condições climáticas do Brasil

Fonte: Camargo e Camargo (2001)

A definição da duração de determinadas fases fenológicas do cafeeiro foi feita por Camargo e Camargo (2001) com base na evapotranspiração potencial acumulada. Os autores constataram que a 2ª fase de indução e maturação das gemas florais termina quando a evapotranspiração potencial acumulada a partir do mês de abril atinge os 350 mm, ou seja, varia de acordo as condições do local de implantação da cultura.

Quanto aos aspectos climáticos, a cultura do café é afetada pelas condições ambientais, como variação fotoperiódica, altitude e latitude, que originam diferentes condições meteorológicas, interferindo, principalmente, na distribuição pluviométrica

e temperatura do ar, com reflexos não apenas na fenologia, mas, também, na produtividade e na qualidade da bebida (FERNANDES et al., 2012).

A espécie *Coffea arabica* não tolera variações muito amplas de temperatura, sendo que as médias abaixo de 16°C e acima de 24°C não são adequadas, e a temperatura ótima, está entre 18 e 21°C (RENA; MAESTRI, 1987).

Quanto à altitude para a produção de café arábica, são recomendados locais variando entre 800 e 1300 metros (FERNANDES et al., 2012).

A precipitação ótima está entre 1200 e 1800 mm, mas o cafeeiro cresce e produz bem tanto na precipitação de 800 mm, como em locais onde a precipitação é maior que 2000 mm anuais. Há indicações que o cafeeiro pode suportar bem um período de deficiência hídrica de até 150 mm, especialmente quando ela não se estende até a fase de floração, como pode ser visto na Tabela 1 (KIM et al., 1986).

Tabela 1 – Parâmetro para a definição da aptidão hídrica do cafeeiro arábica

Deficiências hídricas (mm)	Aptidão e Tipo de Irrigação	Observação
<100	Apto sem irrigação	Deficiências hídricas sem prejuízos
100-150	Apto com irrigação OCASIONAL	Perdas na florada Irrigação: Ago/Set
150-200	Apto com irrigação COMPLEMENTAR	Perdas na pré-florada e no crescimento vegetativo Irrigação: Abr/mai e set/out
>200	Apto com irrigação OBRIGATÓRIA	Perdas totais Irrigação: ano todo

Fonte: Kim et al. (1986)

Na região com déficit hídrico anual superior a 150 mm, ou nos locais os quais estão sujeitas à ocorrência de veranicos ou seca prolongada, a adoção da irrigação para fornecimento de água nos períodos críticos da cultura é essencial para a obtenção de altas produtividades.

Nos últimos anos o interesse pela adoção da técnica de irrigação na cafeicultura vem crescendo de forma considerável. Isso se deve a vários fatores, destacando-se a expansão da cafeicultura para novas fronteiras agrícolas, a evolução da técnica da irrigação, a diminuição dos custos no sistema de irrigação e

pela nova mentalidade do sistema de produção priorizando a eficiência e a qualidade da produção (MANTOVANI; SOARES, 2003).

A cafeicultura irrigada é uma realidade no cenário nacional, ocupando cerca de 10% da área plantada do cafeeiro arábica. Já para o café robusta, este valor chega a 35%, permitindo situar o cafeeiro entre as principais culturas irrigadas do Brasil. Levantamentos do último censo agropecuário avaliam que há aproximadamente 262 mil hectares de café irrigado no nosso país (INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE, 2006). Na Tabela 2 observa-se a área colhida e a porcentagem de área irrigada de café arábica e robusta no Brasil.

Tabela 2 – Área colhida e porcentagem de área irrigada de café arábica e robusta no Brasil

	Arábica		Robusta	
	Área colhida (hectares)	% Irrigada	Área colhida (hectares)	% Irrigada
Norte	19 073	5,31	106 457	6,09
Nordeste	88 781	24,13	23 243	30,09
Sudeste	1 098 407	8,86	250 397	49,06
Sul	81 513	3,69	7 425	2,28
Centro-Oeste	4 499	44,54	8 026	11,01
Brasil	1 292 293	9,65	395 557	34,73

Fonte: (IBGE, 2006)

## 2.2 Relações hídricas

Um das condições que mais limitam o rendimento das culturas é a deficiência hídrica, pois impõe restrições nas taxas de assimilação de gás carbônico, na transpiração, na condutância estomática e, conseqüentemente, no crescimento das mesmas (RENA; MAESTRI, 2000).

Nos diversos tipos de culturas, a produtividade é considerada mais intimamente relacionada com a água disponível para as plantas do que com qualquer outro fator ambiental. Portanto, a capacidade das plantas se manterem túrgidas é tida como uma característica necessária para a garantia da produção, em locais onde ocorre déficit hídrico (SALISBURY; ROSS, 1991).

A água é um fluido que se move pelo sistema solo-planta-atmosfera em grandes quantidades, não sendo permanente nos tecidos vegetais. Dependendo do clima da região, um hectare de café adensado adulto pode transpirar mais de 10000 metros cúbicos de água por ano (RENA; MAESTRI, 2000).

O cafeeiro tem o seu desenvolvimento expressivamente influenciado pelo estresse hídrico com a conseqüente redução da produtividade. Segundo Gutierrez e Meinzer (1994), estimativas precisas da necessidade de água para o cafeeiro são essenciais, pois a escassez pode reduzir substancialmente o crescimento da planta sem que se percebam sinais de murchamento.

Diversas variáveis têm sido estudadas para avaliar a resposta das espécies vegetais ao estresse hídrico, destacando-se o potencial de água na folha, o potencial osmótico, o conteúdo relativo de água, a condutância estomática, a transpiração, a temperatura foliar e a acumulação de prolina (NOGUEIRA et al., 2001).

Rena e Maestri (2000) afirmam que o potencial hídrico das folhas no pré amanhecer parece indicar com precisão o estado hídrico do cafeeiro, pois independe das condições atmosféricas diurnas, sendo apontado como índice hídrico mais adequado para a estimativa da necessidade de irrigação da cultura.

### **2.2.1 Potencial de água na folha**

A medida de potencial de água na folha é importante para a determinação do estado hídrico da planta, variando de valores próximos de zero, quando as plantas se apresentam sem déficit, a valores bem negativos (-3 MPa a -4,5 MPa), quando estas se apresentam em déficit severo (KRAMER; BOYER, 1995).

Da mesma maneira, o potencial de água nas folhas oscila durante o dia, de acordo com a demanda evaporativa e a abertura estomática. Os maiores valores são encontrados no amanhecer, logo antes dos primeiros raios solares e os menores valores em torno do meio dia (TARDIEU; SIMONNEAU, 1998).

Para medir o potencial de água na planta, a metodologia mais utilizada é a da câmara de pressão. Este método baseia-se no fato da pressão hidrostática da seiva xilemática de plantas poder ser medida em uma câmara de pressão e a partir daí, correlacionada com o potencial hídrico foliar (SCHOLANDER et al., 1964).

Para a cultura do café, o potencial da água na planta pode ser utilizado como indicativo para o manejo adequado da irrigação, promovendo floradas uniformes e, conseqüentemente, resultando em um produto final de melhor qualidade. Segundo Silva et al. (2001) é provável que o florescimento e o desenvolvimento dos frutos estejam associados às variações edafoclimáticas, principalmente no que se refere às alterações no potencial hídrico das plantas de café.

Soares et al. (2005) avaliaram o efeito do déficit hídrico em diferentes períodos de imposição em cafeeiros adultos na região de Viçosa-MG e verificaram que à medida que se aumentou o período de imposição do déficit hídrico, os valores de potencial de água na folha medidos foram diminuindo.

Kobayashi et al. (2008) estudaram o potencial de água em plantas de café arábica na região de Mococa-SP, durante um ano, utilizando uma câmara de pressão Scholander e verificaram que o potencial de água na folha é altamente variável em função da umidade no solo e, conseqüentemente, das precipitações, sendo um fator indicativo do nível de armazenamento de água no solo.

Oliveira, Oliveira e Castro (2009) avaliaram o comportamento fisiológico de diferentes cultivares de café, submetidos às diferentes disponibilidades de água no solo, para as condições edafoclimáticas da região de Goiânia-GO e verificaram que houve uma dependência entre o potencial hídrico das folhas dos cultivares de cafeeiros avaliados, com o potencial matricial do solo nos diferentes manejos de irrigação.

Ronchi et al. (2015) avaliaram o potencial hídrico foliar no pré amanhecer nas cultivares Catuaí Vermelho IAC 144 e Bourbon Amarelo J9 submetidas a tratamentos não irrigado, irrigado continuamente e com diferentes períodos de suspensão da irrigação e observaram que o tratamento não irrigado proporcionou o déficit hídrico mais intenso, com valores mínimos de potencial de água na folha de -0,59 e -0,82 MPa, para as cultivares Catuaí Vermelho IAC 144 e Bourbon Amarelo J9, respectivamente. No tratamento com 85 dias de suspensão da irrigação, observaram valores de déficit muito semelhantes aos do tratamento não irrigado, entre -0,53 e -0,79 MPa. Já no tratamento com 54 dias de suspensão da irrigação, foi observado um potencial hídrico das folhas de apenas -0,34 e -0,49 MPa, respectivamente, para as cultivares Catuaí Vermelho IAC 44 e Bourbon Amarelo J9.

E no tratamento irrigado continuamente, observaram potenciais de água nas folhas entre -0,10 e 0 MPa, não apresentando grandes variações ao longo do período de imposição dos tratamentos.

Estes trabalhos mostram que o potencial de água na folha obtido a partir da câmara de Scholander, pode ser considerado um bom indicativo do estado hídrico atual do cafeeiro, mesmo com as limitações de operação do equipamento.

### **2.3 Relações radiométricas**

A radiação solar é a única fonte de energia para a fotossíntese e demais processos, sendo que, ao ser interceptada pela cobertura vegetal, pode ser absorvida, refletida e transmitida em proporções variáveis, influenciando no crescimento e desenvolvimento das plantas em função da intensidade, qualidade e duração (BECKMANN et al., 2006).

A forma como a radiação solar é interceptada afeta a eficiência fotossintética de uma copa, isso porque, esta interceptação altera o balanço de radiação e de energia, e depende das características da copa, ou seja, sua arquitetura e dimensão (BERNARDES; CASTRO; MARTINS, 1996).

O cafeeiro adulto possui uma arquitetura adequada para a interceptação da luz. Em espaçamentos adensados apresenta o dossel com boas características de transmissão de luz, galhos superiores com ângulos pequenos em relação à vertical, folhas distribuídas em grandes distâncias verticais e estruturas cônicas, fazendo com que a parte inferior do dossel receba uma sombra moderada, sendo uma necessidade, visto que as folhas do cafeeiro têm sua máxima fotossíntese a baixas intensidades de radiação (CANNELL, 1976).

A transmissão da radiação solar em uma comunidade de plantas, de acordo com a *Lei de Beer*, é uma função exponencial negativa do produto do índice de área foliar (IAF) pelo coeficiente de extinção (k), que depende das propriedades óticas das folhas e do dossel vegetativo, sendo assim, necessário medidas de área foliar no dossel acima do sensor de radiação para a determinação da interceptação da mesma (SCHOFFEL; VOLPE, 2001).

A temperatura de uma cobertura vegetal é o resultado da interação entre esta e a energia radiante que atinge o sistema. A radiação líquida de um sistema se divide em diversos processos: evaporativo (fluxo de calor latente), de aquecimento



do ar e do solo (fluxo de calor sensível), além de participar de outros processos, como a fotossíntese. Desta forma, uma cobertura vegetal tem sua temperatura determinada pelo balanço de energia entre a superfície e a camada de ar logo acima (MAGIOTTO, 1996).

### 2.3.1 Termometria por infravermelho

Sendo uma resposta às trocas de energia, a temperatura da superfície da cobertura vegetal pode ser expressa em termos da radiação por ela emitida. Segundo a *Lei de Stefan-Boltzmann*, a energia emitida por um corpo qualquer é proporcional à quarta potência da temperatura absoluta de sua superfície. Assim, conhecendo-se o fluxo de radiação emitido pela superfície do corpo pode-se determinar sua temperatura (MAGIOTTO, 1996).

Termometria por infravermelho é uma técnica na qual se utiliza radiômetros que medem a energia na faixa do infravermelho para estimar a temperatura nesta faixa de radiação (CAMPBELL; NORMAN, 1998).

Através da termometria por infravermelho pode-se obter a temperatura do dossel vegetativo sem que haja contato com a folha da planta. O desenvolvimento de termômetros a infravermelho portáteis e de baixo custo, no início dos anos 70, permitiu o aumento das pesquisas sobre o uso de sensores remotos para a medição da temperatura do dossel vegetativo e sobre a detecção de ocorrência de estresse hídrico (GARCIA et al., 2000).

Dentre as vantagens da termometria por infravermelho estão a relativa facilidade de uso, a rapidez nas medições e o fato de ser um método não destrutivo. Para a determinação da temperatura do dossel das plantas com termômetros a infravermelho alguns procedimentos devem ser observados, como a limpeza da lente do sensor a infravermelho, a calibração regular, a escolha correta da emissividade do objeto e o posicionamento do sensor em relação à superfície a ser medida (KIRKHAN, 2014).

Dentre os equipamentos que podem ser utilizados na medição da temperatura da folha, estão o canhão portátil infravermelho e as câmeras térmicas, que possuem sensores de captação de energia em forma de raios infravermelhos, a qual é emitida pela superfície de um objeto e pode variar em função da temperatura do mesmo.

As câmeras térmicas foram desenvolvidas a partir de tecnologias utilizadas em equipamentos militares, e com o barateamento da tecnologia, essa passou a ser utilizada em diversos campos de pesquisa, destacando-se o setor agrícola, por apresentar rápida resposta, aliada a facilidade de operação. Todos os corpos com temperatura acima de zero absoluto emitem radiação térmica, e a intensidade da emissão de energia depende somente da temperatura e da natureza da superfície emitente (GADE; MOESLUND, 2014).

Segundo Jackson, Kustas e Choudhury (1988), dentre as técnicas utilizadas para monitorar o estresse de água das plantas, a temperatura foliar é um método indireto fundamentado na hipótese de que a transpiração resfria as folhas em relação ao ar adjacente. À medida que a água torna-se limitante, a transpiração é reduzida e, em consequência, ocorre aumento da temperatura foliar pela absorção da radiação solar incidente.

Nas mesmas condições ambientais, uma planta sob condições de estresse hídrico apresenta temperatura foliar superior quando comparada à cultivada sob condições plenas de disponibilidade hídrica (TESTI et al., 2008).

Iaffe et al. (2003) avaliaram a aplicação da termometria a infravermelho como indicativo da recuperação do potencial hídrico (medido com a câmara de pressão de Scholander) da folhagem de cafeeiros irrigados e não irrigados durante a floração na cidade de Garça-SP e obtiveram resultados que mostraram que a diferença de temperatura da folhagem e do ar diferenciou as parcelas segundo seu déficit hídrico.

Fernandes (2010) utilizando um termômetro infravermelho portátil realizou leituras diárias de temperatura da cobertura vegetal da cultura do feijoeiro submetida a quatro regimes de dotação hídrica, a fim de se calcular o índice de estresse hídrico diário. Concluiu que a cultura estressada apresentou sempre maiores diferenças entre a temperatura da folha e a temperatura do ar quando comparadas as não estressadas.

Nunes (2012) avaliou a utilização da termometria por infravermelho como indicador do estresse hídrico na cultura do feijão-caupi, a partir da diferença entre a temperatura do dossel vegetativo da cultura e a temperatura do ar, realizando ensaio em casa de vegetação e observou que a termometria por infravermelho pode ser utilizada na cultura do feijão-caupi para estimar indiretamente a disponibilidade hídrica no solo.

### 2.3.2 Crop Water Stress Index (CWSI)

Jackson (1982) fez uma revisão sobre a evolução do uso da técnica da temperatura de folhas e da cobertura vegetal como indicador do estresse hídrico nas plantas. Citou que, na literatura, vários autores argumentaram que a temperatura das folhas é sempre maior que a temperatura do ar circundante. Outros argumentaram que as folhas podem tornar-se muito mais frias que o ar. O primeiro argumento prevaleceu por vários anos e numerosas citações deste ponto de vista foram apresentadas como evidência de que a temperatura das folhas não é um sensível indicador de estresse hídrico. O oposto também foi observado analisando a perspectiva histórica. O avanço da tecnologia para a determinação da temperatura da cobertura vegetal possibilitou a comprovação de sua adequabilidade na detecção do estresse hídrico, e mesmo na estimativa da evapotranspiração, apesar de existirem ainda muitos pontos de discussão.

Combinando a equação do balanço de energia e a equação de Penman-Monteith, Jackson et al. (1981) apresentaram as considerações teóricas para o desenvolvimento do *Crop Water Stress Index* (CWSI) baseado na diferença entre a temperatura foliar e a temperatura do ar e, comparando, esta diferença em condições de déficit hídrico severo e de ausência de limitação de água, denominados, respectivamente, linha base superior e linha base inferior.

Desta forma, o limite superior experimental representa o estresse hídrico máximo tolerado pela cultura, sendo definido quando os estômatos estariam completamente fechados. Já o limite inferior representa uma situação na qual a planta está sem nenhuma restrição hídrica. A posição da linha de estresse hídrico máximo pode ser determinada experimentalmente quando a umidade no solo está próxima do ponto de murcha permanente. Assim, segundo os limites experimentais, o índice de estresse hídrico para a cultura estará compreendido entre 0 (estresse nulo) e 1 (estresse máximo) (TRENTIN, 2010).

Quando uma cultura tem estresse hídrico, os estômatos permanecem fechados e a transpiração diminui de modo que a temperatura da folha apresenta um determinado incremento. Quando uma planta está sem estresse hídrico, a temperatura da folha é de 1 a 4°C mais baixo do que a temperatura ambiente e, neste caso, o CWSI é igual a zero. Quando a transpiração diminui, a temperatura da folha sobe e pode ficar entre 4 a 6°C mais elevada do que a temperatura do ar.

Neste caso, o déficit hídrico é alto, e a transpiração foliar é drasticamente reduzida e o CWSI fica próximo a 1 (TRENTIN, 2010).

As linhas base superior e inferior podem ser definidas de diversas maneiras. Jackson et al. (1981) sugeriram equações para estimativas dessas linhas baseadas em dados meteorológicos locais. Jesus et al. (2015) utilizaram a maior e a menor diferença entre a temperatura do ar e a temperatura da planta para definir as linhas base superior e inferior, respectivamente, e encontraram altos valores de correlação entre o CWSI calculado com as linhas base estimadas pelas equações de Jackson et al. (1981) e o CWSI calculado com as linhas base adotadas.

Outros autores também substituíram os limites teóricos, inferior e superior, por meio de medições de temperatura em superfícies de referência molhadas e secas, respectivamente. Assim, Moller et al. (2007) adotaram painéis artificiais molhados, feitos com espuma de poliestireno revestida com uma mistura de poliéster e viscosa, para obter o limite inferior.

Por outro lado, Wang et al. (2005) utilizaram folhas cobertas por uma camada de resina, que obstrui os estômatos, eliminando a transpiração, para obter o limite superior.

Sepaskhah e Kashefipour (1994) utilizando termômetro infravermelho e diferentes tratamentos de lâminas de irrigação, estudaram a correlação entre o potencial hídrico foliar e o CWSI na cultura do citrus irrigado por gotejamento e verificaram que essa relação é dependente do déficit de pressão de vapor.

Berni et al. (2009) determinaram o CWSI de um cultivo de oliveiras a partir de imagens termais, utilizando um modelo que levava em conta o déficit de pressão de vapor, o saldo de radiação e a velocidade do vento, bem como, outros parâmetros conhecidos por afetarem as diferenças de temperatura entre o ar e a copa das plantas. Observaram que o CWSI calculado para as oliveiras com e sem déficit de água apresentou alta correlação com o potencial de água medido nas mesmas árvores.

Bellvert et al. (2014) compararam termômetro infravermelho e imagens termais de sensoriamento remoto a partir de um veículo aéreo não tripulado na determinação do CWSI em videiras com e sem déficit hídrico nos anos de 2009 e 2010. Observaram altas correlações entre o CWSI e o potencial de água nas folhas da videira nas duas situações e concluíram que os dois métodos são eficazes na determinação da variabilidade do estresse hídrico dessas plantas.

Cohen et al. (2014) estudaram a relação entre o estado hídrico da cultura do algodão em diferentes fases fenológicas e em diferentes condições edafoclimáticas, utilizando imagens térmicas e encontraram uma relação linear, entre as duas variáveis, com elevado coeficiente de determinação. Por fim, concluíram que imagens térmicas terrestres podem ser utilizadas em decisões ligadas ao manejo da irrigação.

### 3 MATERIAL E MÉTODOS

#### 3.1 Localização e caracterização da área experimental

O experimento foi realizado em um ambiente protegido localizado na área de pesquisa do Departamento de Engenharia de Biosistemas (LEB) na Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” (ESALQ/USP) (Figura 2), situada no município de Piracicaba, no estado de São Paulo. As coordenadas geográficas da área experimental são: 22° 42' 45" de latitude Sul e 47° 37' 54" de longitude Oeste. A altitude local é de aproximadamente 543 metros.



Figura 2 – Localização da área de pesquisa do Departamento de Engenharia de Biosistemas e visão interna do ambiente protegido onde o experimento foi conduzido

A estufa possui área total de 160 m<sup>2</sup> e pé direito de 3 m, tendo cobertura de filme plástico polietileno transparente de 150 micras e laterais fechadas com tela tipo “sombrite” com 30% de interceptação. A estrutura é provida de 56 caixas de cimento amianto de 500L, com área de aproximadamente de 1 m<sup>2</sup>, em quatro faixas espaçadas em dois agrupamentos equidistantes e 50 cm entre caixas, mantendo uma distância de 100 cm das laterais da estufa (Figura 3A).

Estas caixas possuem dimensões de 0,92 m de largura, 1,08 m de comprimento e altura de 0,65 m. No fundo das caixas, foi posta uma camada de brita com 5 cm de espessura (Figura 3B), revestida por uma manta geotêxtil “Bidim”. Foi instalado um tubo de PVC, de 25 mm de diâmetro, perfurado e revestido na parte inferior pela mesma manta e enterrado verticalmente no solo, servindo como tubo de

acesso para drenagem dos vasos em casos de excesso de aplicação de água, conforme a Figura 3C.

O solo utilizado no interior das caixas é classificado como Nitossolo Vermelho Eutrófico (Figura 3D), fase argilosa, denominado “Série Luiz de Queiroz”, disponível na região de Piracicaba-SP, o que facilitou o transporte para a montagem do experimento.

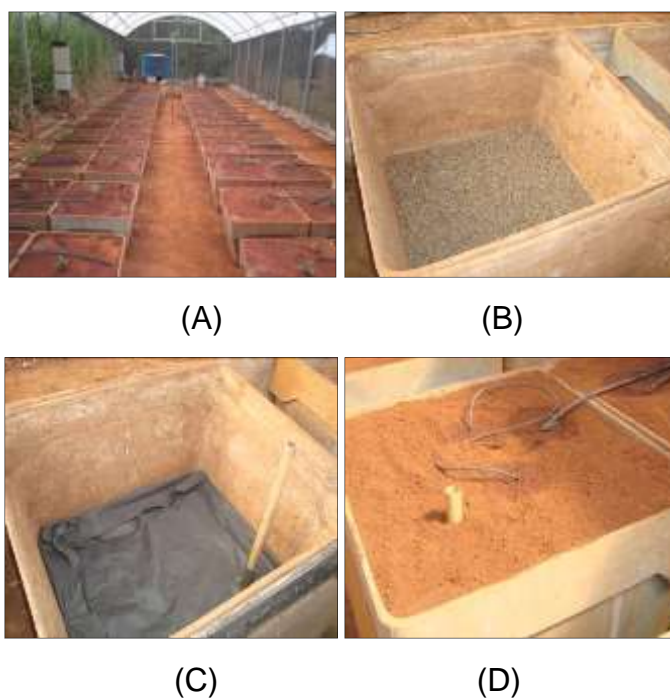


Figura 3 – Imagens da estruturação da área experimental. Vista da distribuição das caixas de fibrocimento em quatro faixas (A); Camada de brita posta no fundo das caixas (B); Revestimento feito com manta geotêxtil “Bidim” e tubo de acesso para drenagem (C); Solo utilizado no interior das caixas (D)

## 3.2 Implantação e condução do experimento

### 3.2.1 Plantio e manejo nutricional

Para o plantio foi feita uma amostragem de solo na profundidade de 0-40 cm e esta foi levada para análise química. Com os resultados da análise de macronutrientes (Tabela 3) e de micronutrientes (Tabela 4), procedeu-se a correção da fertilidade química do solo, procurando-se alcançar os níveis adequados e recomendados por Santinato, Fernandes e Fernandes (2008).

Tabela 3 – Resultado da análise química do solo para macronutrientes feita antes do plantio

Prof.	pH	M.O.	P-resina	S	K	Ca	Mg	H + Al	S.B.	CTC	V
cm	CaCl <sub>2</sub>	g dm <sup>-3</sup>	----mg dm <sup>-3</sup> ----	-----mmolc dm <sup>-3</sup> -----							%
0-40	5,5 c	6,5 e	27 d	65 e	0,6 a	22 c	5 b	25	26,7	51,6	52 b

Potencial hidrogeniônico (pH); matéria orgânica (M.O.); fósforo (P-resina); potássio (K); cálcio (Ca); magnésio (Mg); hidrogênio + alumínio (H+Al); soma de bases (S.B.); capacidade de troca catiônica (CTC); enxofre (S). Letras minúsculas indicam as classes de teores de nutrientes: a - teores muito baixos; b - teores baixos; c - teores médios; d - teores altos; e - teores muito altos, segundo Santinato, Fernandes e Fernandes (2008)

Tabela 4 – Resultado da análise química do solo para micronutrientes feita antes do plantio

Prof.	Cu	Fe	Mn	Zn	B (água quente)
cm	-----mg dm <sup>-3</sup> -----				
0-40	1,8 a	4 a	4,8 b	0,3 a	0,06 a

Cobre (Cu); ferro (Fe); zinco (Zn); manganês (Mn); boro (B). Letras minúsculas indicam as classes de teores de nutrientes: a - teores muito baixos; b - teores baixos; c - teores médios; d - teores altos; e - teores muito altos, segundo Santinato, Fernandes e Fernandes (2008)

As quantidades e os tipos de fertilizantes e corretivos utilizados no plantio estão descritos na Tabela 5. O fertilizante potássico que seria utilizado no plantio foi dispensado, isso porque, de acordo Santinato e Ferreira (2011), com o uso da palha de café, esterco de curral ou esterco de galinha, a demanda por potássio na ocasião do plantio, já é atendida. Para o cálculo da quantidade de calcário em área total, utilizou-se a Equação 1:

$$QC = \frac{CTC (V1 - V2) p}{PRNT} \quad (1)$$

Em que:

QC – quantidade de calcário, t/ha;

CTC – capacidade de troca catiônica, cmolc dm<sup>-3</sup>;

V1 – índice de saturação de bases que se deseja alcançar com a calagem, %;

V2 – índice atual de saturação no solo, %;

p – fator de profundidade de incorporação do calcário, decimal; e

PRNT – poder relativo de neutralização do calcário, %.

O calcário foi aplicado a lanço sobre toda a superfície do solo presente nas caixas (Figura 4A) com 60 dias de antecedência em relação a data do plantio. Os



outros fertilizantes foram aplicados na cova de plantio (Figura 4B), sendo realizada a mistura destes com o solo evitando-se problemas de salinização e consequentes danos às mudas. Santinato e Ferreira (2011) fizeram recomendações das quantidades de fertilizantes a serem aplicados com base na unidade de área hectare. No entanto, nas condições do experimento, essas recomendações foram convertidas para quantidade caixa<sup>-1</sup>, para isso, considerou-se uma densidade de plantas usual de 5700 plantas ha<sup>-1</sup>.

Tabela 5 – Produtos, quantidades e nutrientes fornecidos pelos fertilizantes e corretivos utilizados no plantio

Produto	Quantidade	Nutrientes
Calcário dolomítico PRNT 90%	250 g caixa <sup>-1</sup>	Ca (42%); Mg (14%)
Yoorin Master 1*	90 g cova <sup>-1</sup>	P (17,5%); Ca (18%); Mg (7%); B (0,1%); Cu (0,05%); Mn (0,3%); Zn (0,55%)
Esterco de galinha	900 g cova <sup>-1</sup>	K (3,5%)

\* Além de fornecer os macronutrientes P, Ca e Mg, o fertilizante Yoorin Master 1 possui na sua formulação determinadas porcentagens de micronutrientes.

O plantio foi realizado no final do ano de 2012, sendo as mudas da espécie *Coffea arabica* e da variedade Catuaí Vermelho IAC 144 (Figura 4C). Essas mudas foram adquiridas em um viveiro certificado quanto à qualidade e a sanidade, com aproximadamente 20 cm de altura, apresentando bom aspecto vegetativo (3 a 5 pares de folhas, coloração verde-escuro e caule ereto) e formadas em sacos plásticos com as seguintes dimensões 11 cm de diâmetro, 22 cm de altura x 0,06 cm de espessura (Figura 4D).

Na condução pós plantio (0 a 6 meses) utilizou-se o fertilizante de liberação lenta Producote (37-00-00). Este foi aplicado em superfície 25 dias após o plantio em uma só parcela de 30 g planta<sup>-1</sup>. Visando a redução da temperatura do solo, a manutenção da umidade e o controle de plantas invasoras, utilizou-se cobertura morta de fibra de coco sobre a superfície das caixas (Figura 5A).

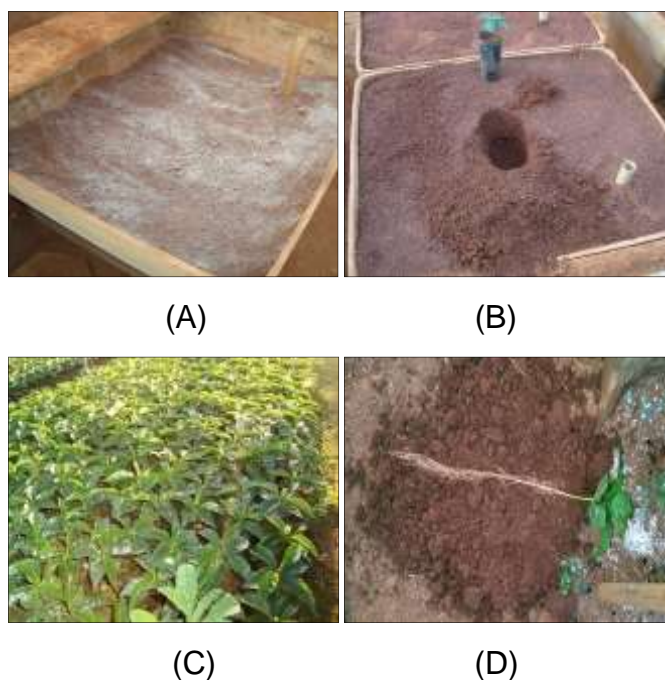


Figura 4 – Imagens das atividades do plantio. Aplicação a lanço do calcário dolomítico (A); Abertura de covas para o plantio das mudas (B); Mudas utilizadas no plantio apresentando boa sanidade (C); Sistema radicular com bom desenvolvimento proporcionado pelo recipiente de plantio das mudas (D)

Para a condução no 1º ano (7 aos 18 meses), foi realizada uma nova amostragem de solo nas profundidades de 0-20 cm e 20-40 cm a uma distância de 40 cm da cova de plantio (Figura 5B e Figura 5C). As épocas e as quantidades de fertilizantes utilizadas na adubação da cultura neste período estão de acordo às recomendações de Santinato e Ferreira (2011) e podem ser vistas na Tabela 6. Estas adubações foram feitas através do sistema de irrigação, ou seja, por meio de fertirrigações (Figura 5D).

Tabela 6 – Quantidades e épocas de aplicação dos fertilizantes pelo sistema de fertirrigação para nutrição das plantas via solo no 1º ano

Adubações		Quantidades de adubos (g planta <sup>-1</sup> )		
Parcela	Época	Uréia	Sulfato de amônio	Cloreto de potássio
1º	Out/Nov	0	25	15
2º	Nov/Dez	30	0	15
3º	Jan/Fev	0	25	15
4º	Fev/Mar	30	0	15
Total		60	50	60

Na condução do 2º ano (19 aos 30 meses), foi realizada outra amostragem de solo, também nas profundidades de 0-20 cm e 20-40 cm e a uma distância de 40 cm da cova de plantio para macronutrientes (Tabela 7) e para micronutrientes (Tabela 8). Neste período (Figura 5E e Figura 5F), também foram realizadas análises foliares para verificação dos níveis nutricionais presentes nas plantas (Tabela 10). O material enviado para análise foi coletado em quatro plantas escolhidas aleatoriamente, no 3º e no 4º par de folhas, na altura média da copa, colhendo-se dois pares, um de cada lado da planta.

Tabela 7 – Resultado da análise química do solo para macronutrientes feita no 2º ano

Prof.	pH	M.O.	P-resina	S	K	Ca	Mg	H + Al	S.B.	CTC	V	
Cm	CaCl <sub>2</sub>	g dm <sup>-3</sup>	---mg dm <sup>-3</sup> ---	-----mmolc dm <sup>-3</sup> -----								%
0-20	5,8 d	20 e	74 e	67 e	3,4 c	31 c	6 b	25	40	65	62 d	
20-40	6 d	20 e	41 e	65 e	2,4 b	31 c	7 b	20	40	60	67 d	

Potencial hidrogeniônico (pH); matéria orgânica (M.O.); fósforo (P-resina); potássio (K); cálcio (Ca); magnésio (Mg); hidrogênio + alumínio (H+Al); soma de bases (S.B.); capacidade de troca catiônica (CTC); enxofre (S). Letras minúsculas indicam as classes de teores de nutrientes: a - teores muito baixos; b - teores baixos; c - teores médios; d - teores altos; e - teores muito altos, segundo Santinato, Fernandes e Fernandes (2008)

Tabela 8 – Resultado da análise química do solo para micronutrientes feita no 2º ano

Prof.	Cu	Fe	Mn	Zn	B (água quente)
cm	-----mg dm <sup>-3</sup> -----				
0-20	3,7 e	13 c	16 e	1,3 a	0,38 b
20-40	3,5 e	13 c	14 e	1,1 a	0,46 c

Cobre (Cu); ferro (Fe); zinco (Zn); manganês (Mn); boro (B). Letras minúsculas indicam as classes de teores de nutrientes: a - teores muito baixos; b - teores baixos; c - teores médios; d - teores altos; e - teores muito altos, segundo Santinato, Fernandes e Fernandes (2008)

Tabela 9 – Resultado da análise foliar para macro e micronutrientes feita no 2º ano

N	P	K	Ca	Mg	S	Cu	Fe	Zn	Mn	B
----- g/kg -----					----- mg/kg -----					
24 b	2 b	24 b	13 b	2,8 b	4 c	13 b	360 b	17 a	260 b	76 b

Nitrogênio (N), fósforo (P); potássio (K); cálcio (Ca); magnésio (Mg); enxofre (S); cobre (Cu); ferro (Fe); zinco (Zn); manganês (Mn); boro (B). Letras minúsculas indicam as classes de teores de nutrientes: a - teores baixos; b - teores médios; c - teores altos, segundo Malavolta et al. (1993)

Os dados das análises foram interpretados e, assim, se baseando nas recomendações de Santinato e Ferreira (2011), foram definidas as épocas e as quantidades de fertilizantes utilizadas na adubação da cultura neste período (Tabela 10). Estas adubações também foram feitas através de fertirrigações.

Tabela 10 – Quantidades e épocas de aplicação dos fertilizantes pelo sistema de fertirrigação para nutrição das plantas via solo no 2º ano

Adubações		Quantidades de adubos (g planta <sup>-1</sup> )		
Parcela	Época	Uréia	Sulfato de amônio	Cloreto de potássio
1º	Out/Nov	0	50	60
2º	Nov/Dez	45	0	60
3º	Jan/Fev	45	0	0
4º	Fev/Mar	45	0	0
Total		135	50	120

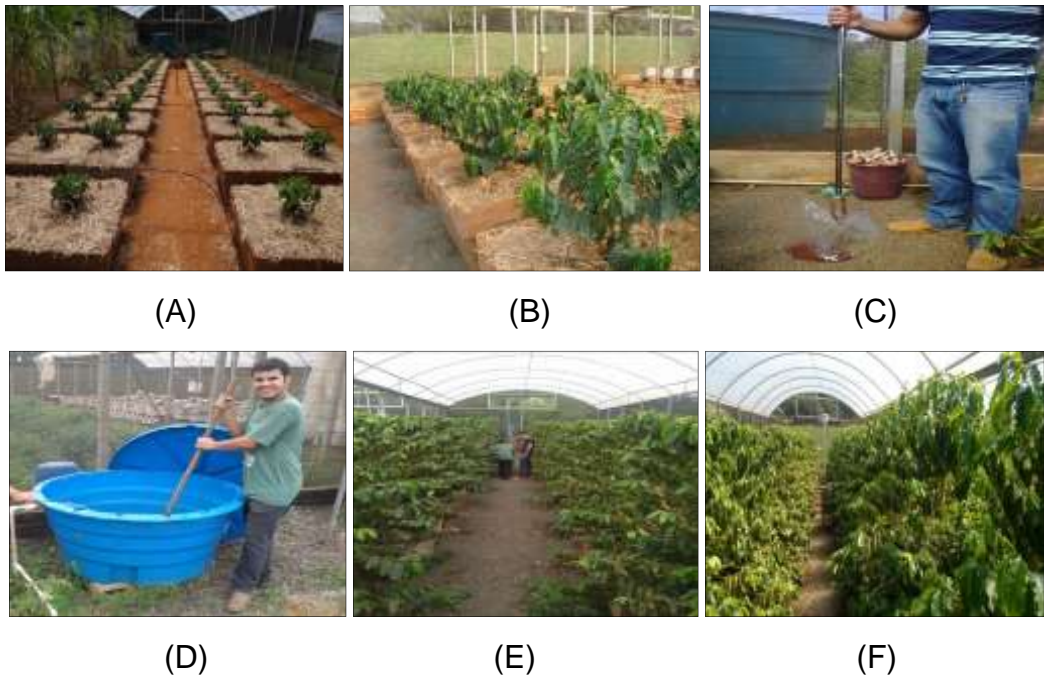


Figura 5 – Imagens da condução da cultura após o plantio. Vista da superfície das caixas cobertas com fibra de coco (A); Cultura com sete meses de idade, quando se realizou a 2ª amostragem de solo (B); Trado utilizado para retirar as amostras de solo (C); Caixa d'água utilizada para mistura de fertilizantes aplicados via água de irrigação (D); Cultura com um ano e meio de idade (E); Cultura com dois anos de idade (F)

Na condução do 3º ano (31 aos 42 meses) adotaram-se as mesmas recomendações nutricionais do 2º ano, porém, a análise anual de solo não foi dispensada.

### 3.2.2 Manejo fitossanitário e cultural

O manejo fitossanitário iniciou-se 40 dias após o plantio com a aplicação do inseticida sistêmico Tiametoxan. Essa aplicação foi feita através do sistema de irrigação por microaspersão instalado sobre a cultura.

A partir daí, foram feitas cinco pulverizações intercalando defensivos distintos associados a adubos foliares, a cada 25 dias, visando proteger as mudas de doenças e pragas. Os produtos utilizados no controle fitossanitário e nas adubações foliares no período de condução do experimento podem ser vistos na Tabela 11. A aplicação desses produtos foi feita através do sistema de irrigação por microaspersão até a cultura atingir um ano e meio. Depois dessa idade, aplicou-se os defensivos e fertilizantes foliares com uma bomba costal de 20 L para possibilitar um maior alcance das gotas dentro da copa do cafeeiro.

Tabela 11 – Produtos utilizados no manejo fitossanitário e nas adubações foliares no período de condução do experimento

Produtos	Ingrediente ativo/ Nutrientes fornecidos	Classe
Actara WG	Tiametoxan	Inseticida sistêmico
Opera	Epoxiconazol	Fungicida
Provado SC	Imidacloprido	Inseticida sistêmico
Rimon	Novaluron	Inseticida fisiológico
Kocide	Hidróxido de cobre	Fungicida/Bactericida
Copper	14,5% Cu	Adubo foliar
Triunfo	6% N e 12% P	Adubo foliar
Phytogard	30% P e 4% Mg	Adubo foliar
Concorde	9% N; 2% P; 1% K; 0,04% B; 0,1% Cu; 0,1% Mn e 0,1% Zn	Adubo foliar

O controle das plantas daninhas foi realizado de forma manual durante toda a condução da cultura. Como já foi mencionado, utilizou-se fibra de coco como

cobertura morta sobre a superfície das caixas, o que facilitou o controle dessas plantas invasoras.

A primeira desbrota foi realizada 60 dias após o plantio deixando somente uma haste principal por planta. Essa operação foi feita antes de uma pulverização com fungicida, para não favorecer a ocorrência de doenças. Aos 120 e 180 dias após o plantio foram feitas outras duas desbrotas, adotando-se o mesmo procedimento da primeira.

Foram realizadas colheitas aos 18 e aos 30 meses de forma manual. Na ocasião da colheita não foram mensurados os efeitos da aplicação dos tratamentos sobre a produtividade e nem sobre a qualidade da bebida.

### **3.2.3 Manejo da irrigação**

O sistema de irrigação adotado foi o gotejamento, utilizando tubo gotejador com emissor autocompensante. Cada caixa possuía dois gotejadores com vazão de  $8 \text{ L h}^{-1}$  totalizando uma vazão de  $16 \text{ L h}^{-1}$  (Figura 6). Esta vazão era dividida em quatro pontos da caixa por mini-estacas, resultando em  $4 \text{ L h}^{-1}$  em cada ponto. A pressurização do sistema foi feita por uma motobomba KSB com potência do motor de 0,5 cv e o reservatório de água utilizado tinha capacidade de  $5 \text{ m}^3$ .

Válvulas solenóides foram instaladas em cada caixa possibilitando um tempo de irrigação independente entre estas unidades. A abertura e fechamento dessas válvulas eram controlados por um software (Apêndice A) desenvolvido pelo INCT-EI (Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia-Engenharia da Irrigação).

Para comprovar o bom funcionamento do sistema de irrigação instalado, foram realizados testes de uniformidade considerando todos os gotejadores do experimento, utilizando os coeficientes de uniformidade de distribuição CUC e CUD. Estes testes foram realizados antes da implantação da cultura e no 2º ano da condução desta, sendo que, foram obtidas uniformidades de 97,4% no primeiro e de 94,8% no último.

Para caracterização físico-hídrica do solo, foram coletadas amostras indeformadas no início do trabalho. Para isto, foi utilizado um trado para amostra indeformada com cilindros de aço inox de  $50 \text{ cm}^3$ . As amostras foram retiradas em três profundidades, 10, 30 e 50 cm, representando as camadas de 0-20, 20-40 e 40-60 cm, respectivamente. A determinação das curvas de retenção de água no

solo (Figura 7) se deu através de mesa de tensão e extratores de “Richards” com placas porosas (para tensões de 10, 30, 50, 100, 500, 1000 e 1500 kPa).

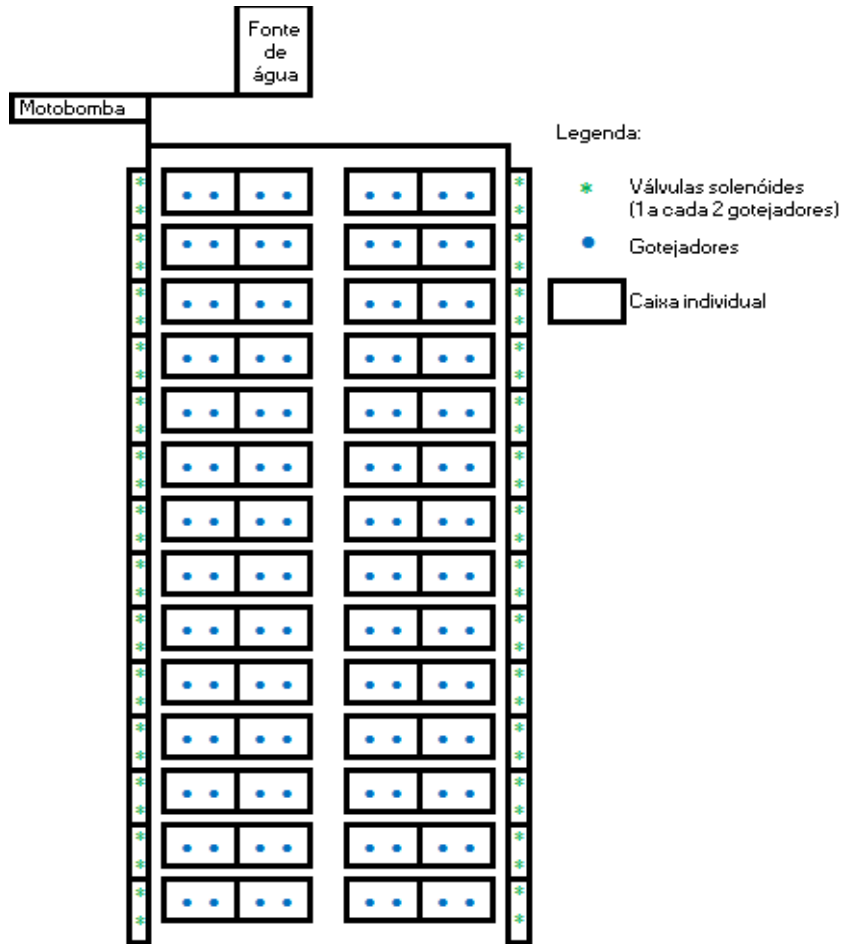


Figura 6 – Esquema do sistema de irrigação utilizado no experimento

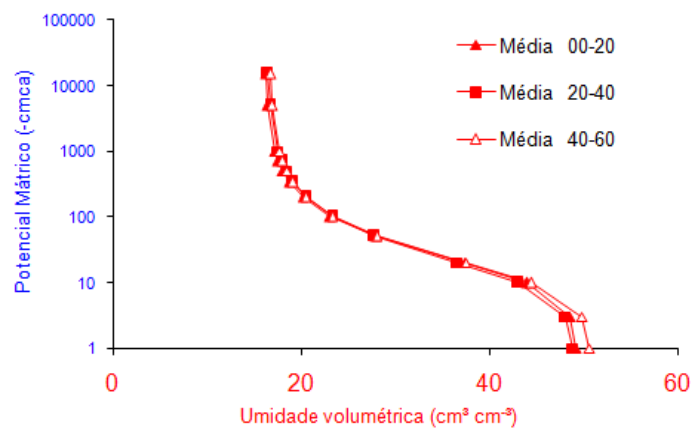


Figura 7 – Curvas de retenção de água no solo nas profundidades 0-20, 20-40 e 40-60 cm

As características físico-hídricas do solo determinadas a partir das análises laboratoriais podem ser vistas na Tabela 12. Em seguida, na Tabela 13, são apresentados os valores dos parâmetros necessários para a utilização do modelo de Van Genuchten (1980).

Tabela 12 – Caracterização físico-hídrica do solo utilizado no experimento

Prof.	$\theta_{cc}$	$\theta_{pmp}$	CAD	Ds	Dp	PT	Frações granulométricas (%)		
cm	$\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$		mm	$\text{g cm}^{-3}$		%	Areia	Silte	Argila
0-20	0,321	0,205	23,2	1,28	2,70	52,6	31,3	14,8	53,9
20-40	0,333	0,207	25,2	1,27	2,70	53,0	31,0	16,1	52,9
40-60	0,340	0,218	24,4	1,31	2,71	51,7	30,1	17,3	52,6

$\theta_{cc}$ : umidade na capacidade de campo (correspondente ao potencial mátrico ( $\psi_m$ ) de -4,85 KPa).

$\theta_{pmp}$ : umidade no ponto de murcha permanente (correspondente ao potencial mátrico ( $\psi_m$ ) de -1500 KPa). CAD: capacidade de água disponível. Ds: densidade do solo. Dp: densidade de partículas do solo. PT: porosidade total do solo

Fonte: Chaves (2008)

Tabela 13 – Valores de umidade de saturação ( $\theta_s$ ) e residual ( $\theta_r$ ), e dos parâmetros empíricos ( $\alpha$ , n e m) do modelo de Van Genuchten (1980)

Prof. (cm)	$\theta_s$ ( $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ )	$\theta_r$ ( $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ )	$\alpha$ ( $\text{KPa}^{-1}$ )	m	n
0-20	0,529	0,246	0,4144	0,5187	0,8650
20-40	0,564	0,246	0,2187	0,8555	0,6068
40-60	0,561	0,261	0,2799	0,5997	0,6985

Fonte: Chaves (2008)

O manejo da irrigação adotado foi via solo, repondo o volume de água consumido pela planta, em função dos dados de tensão de água no solo (tensiometria), medidos em 12 tensiômetros instalados em três profundidades (20 cm, 40 cm e 60 cm) e em quatro caixas (Figura 8A). As leituras da tensão de água no solo foram feitas com tensímetro digital de punção (Figura 8B) devidamente calibrado em um manômetro de coluna de mercúrio. O intervalo entre as leituras foi de três dias, coletando-se os dados das 7 às 8 horas, quando a variação nos dados é menor. Para realização dos cálculos do manejo da irrigação, utilizou-se uma planilha montada no software Microsoft Excel®.



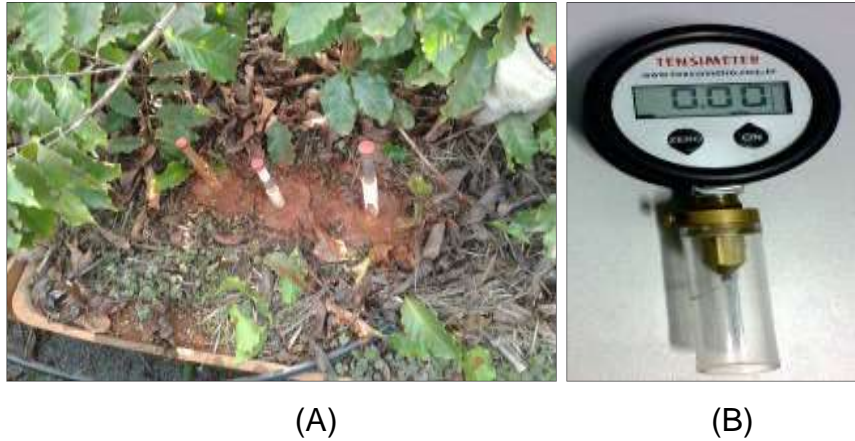


Figura 8 – Tensiômetros instalados nas três profundidades (A); Tensímetro digital utilizado nas leituras de tensão de água no solo (B)

Os dados coletados com o tensímetro digital foram transformados em potencial matricial da água no solo ( $\psi_m$ ) utilizando a Equação 2, na qual desconta-se a pressão equivalente à altura da coluna d'água no tensiômetro para cada profundidade medida. A pressão equivalente descontada foi de 3, 5 e 7 KPa para os tensiômetros que representam as camadas de 0-20, 20-40 e 40-60 cm, respectivamente.

$$\Psi_m = L_t - h_c \quad (2)$$

Em que:

$\psi_m$  – potencial matricial da água no solo, KPa;

$L_t$  – tensão da água no solo (leitura do tensiômetro), KPa; e

$h_c$  – pressão equivalente à altura da coluna d'água no tensiômetro, KPa.

Depois de calculado o potencial matricial da água no solo ( $\psi_m$ ) calculou-se a média entre as leituras das quatro caixas nas três profundidades, obtendo uma leitura para cada camada do solo. A partir destes valores, foi estimada a umidade ( $\theta$ ), em  $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ , através do modelo proposto por Van Genuchten (1980), que relaciona os valores de  $\psi_m$  com os respectivos valores de  $\theta$ , utilizando os parâmetros característicos deste solo apresentados na Tabela 13 (Equação 3).

$$\theta(\Psi_m) = \theta_r + \frac{(\theta_s - \theta_r)}{(1 + (\alpha \Psi_m)^n)^m} \quad (3)$$

Em que:

$\theta$  ( $\psi_m$ ) – umidade volumétrica em função do potencial mátrico,  $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ ;

$\theta_r$  – umidade volumétrica residual do solo,  $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ ;

$\theta_s$  – umidade volumétrica do solo saturado,  $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ ;

$m$  e  $n$  – parâmetros de regressão da equação, adimensionais;

$\alpha$  – parâmetro com dimensão igual ao inverso da tensão,  $\text{KPa}^{-1}$ ; e

$\psi_m$  – potencial mátrico,  $\text{KPa}$ .

Com os dados de umidade estimados e a caracterização físico-hídrica do solo de cada camada (Tabela 12), as lâminas de irrigação necessárias para elevar a umidade do solo até a capacidade de campo ( $\theta_{cc}$ ) foram calculadas através da Equação 4.

$$L_x = \theta_{cc} - (\theta Z) \quad (4)$$

Em que:

$L_x$  – lâmina necessária para elevar a umidade da camada  $x$  até a capacidade de campo, mm;

$\theta_{cc}$  – umidade volumétrica na capacidade de campo para a camada  $x$ ,  $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ ;

$\theta$  – umidade volumétrica atual estimada para a camada  $x$ ,  $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ ; e

$Z$  – espessura da camada  $x$ , mm.

A soma das lâminas necessárias de cada camada resultou na lâmina de irrigação a ser aplicada, conforme a Equação 5.

$$LI = L_{0-20} + L_{20-40} + L_{40-60} \quad (5)$$

Em que:

$LI$  – lâmina de irrigação necessária para elevar a umidade do solo até a capacidade de campo, mm;

$L_{0-20}$  – lâmina necessária para elevar a umidade da camada 0-20 cm até a capacidade de campo, mm;

$L_{20-40}$  – lâmina necessária para elevar a umidade da camada 20 a 40 cm até a capacidade de campo, mm; e

$L_{40-60}$  – lâmina necessária para elevar a umidade da camada 40 a 60 cm até a capacidade de campo, mm.

Por fim, calculou-se o tempo de irrigação necessário usando a Equação 5. Para este cálculo, adotou-se a vazão do sistema de  $16 \text{ L h}^{-1}$  para cada caixa, área de superfície do solo de  $1 \text{ m}^2$  e eficiência de aplicação do sistema de 95%.

$$TI = \frac{LI \cdot A}{Q \cdot Ea} \cdot 60 \quad (6)$$

Em que:

TI – tempo de irrigação, minutos;

LI – lâmina de irrigação necessária para elevar a umidade do solo até a capacidade de campo, mm;

A – área de solo da parcela,  $\text{m}^2$ ;

Q – vazão do sistema, em  $\text{L h}^{-1}$ ; e

Ea – Eficiência de aplicação, decimal.

### 3.2.4 Delineamento experimental e tratamentos

O delineamento em blocos casualizados foi o adotado no experimento. Este foi formado por quatro blocos e quatro lâminas de irrigação aplicadas em quatro épocas distintas (30/03 a 24/04, 07/06 a 02/07, 17/08 a 11/09 e 10/10 a 04/11) ao longo do ano de 2015. A unidade experimental foi representada por uma caixa com uma planta, ou seja, foram utilizadas 16 plantas por época de avaliação (Figura 9). Na Tabela 14 é apresentada a distribuição dos graus de liberdade para as fontes de variação experimental.

Tabela 14 – Distribuição dos graus de liberdade (G.L.) para as fontes de variação (F.V.), de acordo com o delineamento experimental adotado

Fontes de variação (F.V.)	Graus de liberdade (G.L.)
Blocos (B)	3
Lâminas de irrigação (LI)	3
Épocas (E)	3
Lâminas x Épocas (LI x E)	9
Resíduo (R)	45
Total	63

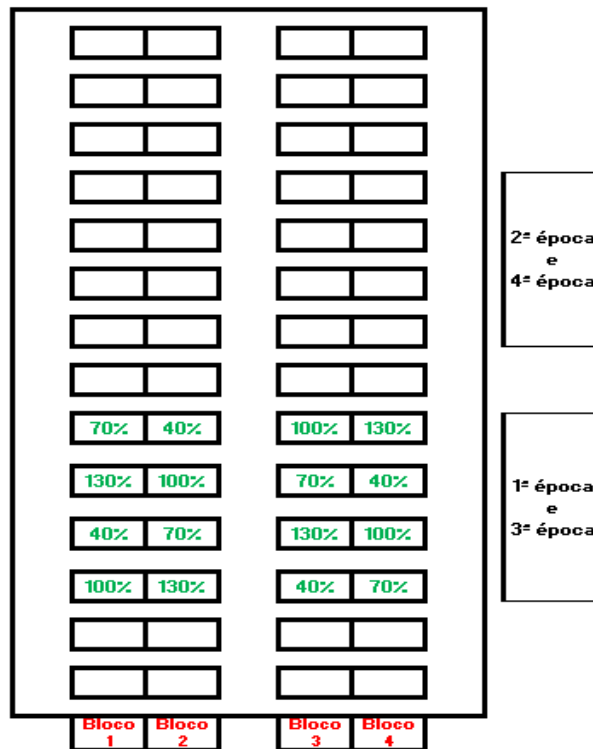


Figura 9 – Esquema da distribuição dos blocos e dos tratamentos na área experimental

As lâminas de irrigação aplicadas foram: L130 – lâmina de irrigação de 130%, L100 – lâmina de irrigação de 100%, L70 – lâmina de irrigação de 70% e L40 – lâmina de irrigação de 40%. O nível de referência (L100) manteve a umidade do solo próxima à capacidade de campo ( $\theta_{cc}$ ) ao longo de todo experimento, sendo este correspondente à reposição de 100% da ET<sub>c</sub>. Os demais níveis de lâminas (L40, L70 e L130) foram variações na fração aplicada tomando como referência o tratamento L100. A imposição desses tratamentos foi realizada em quatro épocas com duração de 25 dias cada uma. Essa duração da aplicação dos tratamentos foi definida a partir de um experimento prévio que mostrou ser este um tempo suficiente para haver alterações na temperatura e no potencial de água da folha e ao mesmo tempo não comprometer a cultura que seria utilizada em avaliações futuras. Após o período de aplicação dos tratamentos, todas as plantas receberam irrigação plena.

Para a análise de variância dos resultados utilizou-se o software Sisvar versão 5.4 (FERREIRA, 2008). As variáveis que apresentaram valores de F significativo, a 5% de probabilidade na análise de variância foram submetidas à análise de regressão e ao teste de médias de Tukey a 5% de probabilidade. Também foi avaliada a ocorrência de respostas atípicas, utilizando gráficos do tipo box-plot criados no softwares Microsoft Excel®, Action Stat® e R®.

### 3.3 Análises das plantas

As análises das plantas foram realizadas em quatro épocas distintas (30/03 a 24/04, 07/06 a 02/07, 17/08 a 11/09 e 10/10 a 04/11) ao longo do ano de 2015. As variáveis avaliadas foram a fração de radiação fotossinteticamente ativa interceptada, o potencial de água na folha e a temperatura foliar (utilizando a câmera térmica e o canhão infravermelho). A partir dos dados de temperatura foliar e dos dados meteorológicos calculou-se o *Crop Water Stress Index* (CWSI).

#### 3.3.1 Fração de radiação fotossinteticamente ativa

Para avaliação da fração de radiação fotossinteticamente ativa (RFA) interceptada pelo dossel da planta utilizou-se o equipamento SunScan, que é composto por uma barra de sensores de RFA com 1 metro de comprimento, um computador de mão que armazena as leituras dos sensores e um sensor de radiação solar (direta e difusa) incidente sobre o dossel (Figura 10A).

O sensor de radiação incidente sobre o dossel registra uma leitura ao mesmo tempo em que é feita a leitura com a barra de sensores no dossel da cultura. Isso possibilita o cálculo da porcentagem de radiação interceptada pelas porções superiores do dossel e da porcentagem de radiação não interceptada (radiação incidente) em cada ponto da planta (Figura 10B e Figura 10C).

As avaliações foram realizadas uma vez a cada época após a aplicação dos tratamentos. Foram realizadas leituras em 36 pontos diferentes, definidos por quadrantes de 20 cm x 30 cm do dossel, conforme a Figura 10D.

Com os dados obtidos calculou-se a porcentagem da radiação não interceptada em cada ponto da planta, utilizando-se a Equação 7. A opção por esse cálculo se deu pelo fato da possibilidade de elaboração do mapa de radiação incidente ao longo dos quadrantes amostrados na planta.

$$RFAi = \frac{PAR_{dossel}}{PAR_{topo}} 100 \quad (7)$$

Em que:

RFAi – radiação fotossinteticamente ativa incidente, %;

PAR<sub>dossel</sub> – radiação fotossinteticamente ativa incidente em determinada porção do dossel,  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ; e

PAR<sub>topo</sub> – radiação fotossinteticamente ativa incidente no topo interno do ambiente protegido,  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ .

Com os dados de radiação fotossinteticamente ativa incidente em cada ponto da planta, realizou-se o cálculo da média entre os pontos amostrados no terço superior, no terço médio e no terço inferior do dossel, definindo-se assim uma média para cada porção da planta.

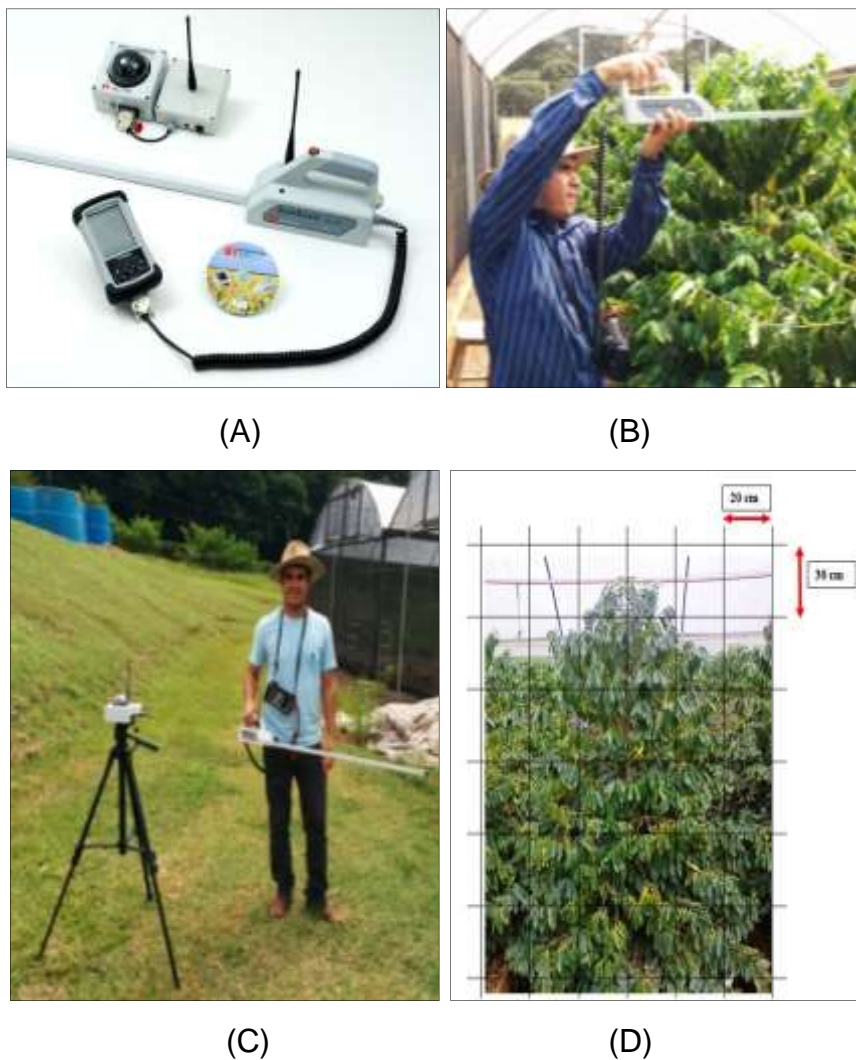


Figura 10 – Imagens das avaliações da fração de radiação fotossinteticamente ativa interceptada. Equipamento SunScan utilizado nas avaliações (A); Detalhe do momento da leitura com a barra de sensores (B); Detalhe do sensor de radiação solar incidente sobre o dossel montado em base nivelada (C); Esquema dos quadrantes avaliados no dossel da planta (D)

### 3.3.2 Potencial de água na folha

Para obtenção do potencial de água na folha foram efetuadas medidas utilizando uma câmara de pressão modelo 3005 (SCHOLANDER et al., 1964) (Figura 11A e Figura 11B). Foram coletadas três folhas do 3º e/ou 4º par do terço superior de todas as plantas antes do amanhecer (Figura 11C). Essas amostras foram acondicionadas e transportadas em recipientes apropriados, conforme a Figura 11D (MELO; GRUBER; COELHO, 2007).

Foram feitas quatro avaliações durante o período de imposição dos tratamentos, sendo estas realizadas com 6, 12, 18 e 24 dias após o início da imposição. Com os dados coletados foram feitas as médias de potencial de água na folha de cada planta nos determinados dias de avaliação.

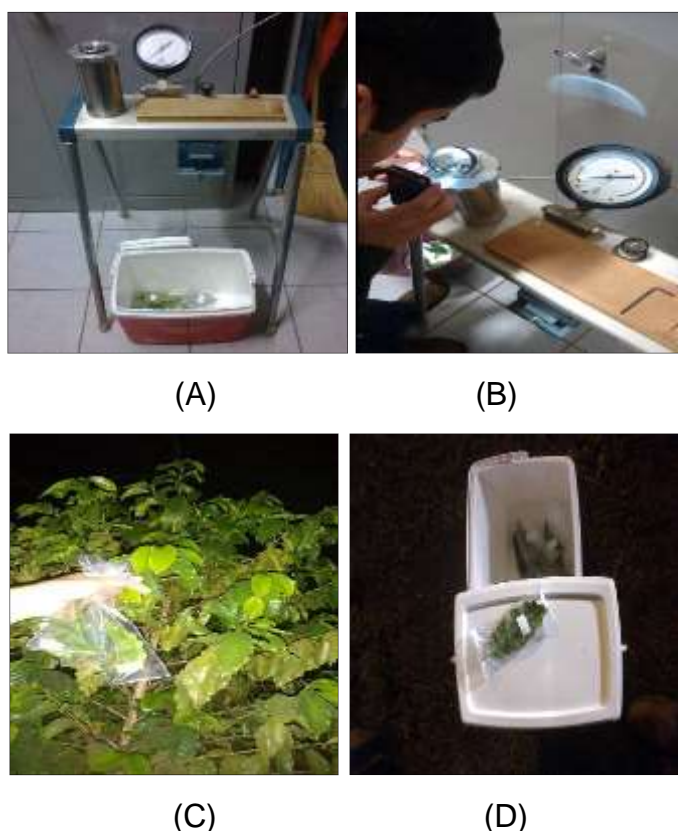


Figura 11 – Imagens das avaliações do potencial de água na folha. Câmara de pressão utilizada nas medidas de potencial de água na folha (A); Detalhe da aferição do potencial de água na folha (B); Coleta das folhas para avaliação (C); Caixa térmica utilizada no transporte das amostras (D)

### 3.3.3 Temperatura foliar

Para avaliação da temperatura foliar foram utilizados o canhão infravermelho (*quick TEMP*) (Figura 12A) e a câmera térmica (FLIR T640) (Figura 12B). O uso de dois equipamentos para medida de temperatura foliar foi feito para comparação de metodologias na determinação do Crop Water Stress Index (CWSI).

As avaliações utilizando o canhão infravermelho foram realizadas nas folhas do 3º e/ou 4º par de ramos plagiotrópicos do terço superior da planta, expostas ao sol e com ângulo de inserção em relação ao plano vertical semelhante, em três repetições por planta, sendo realizadas em dias de céu claro e em torno de meio-dia (horário onde a radiação incidente apresenta pouca variação).

Foram realizadas quatro avaliações durante o período de imposição dos tratamentos (6, 12, 18 e 24 dias após a imposição). Todas essas avaliações foram repetidas em quatro épocas distintas (30/03 a 24/04, 07/06 a 02/07, 17/08 a 11/09 e 10/10 a 04/11) ao longo do ano de 2015. A partir dos dados coletados foram feitas as médias de temperatura por planta em cada dia de avaliação.

As medidas de temperatura foliar com o canhão infravermelho foram corrigidas através da multiplicação dos valores coletados pelo fator de calibração do equipamento utilizado (Apêndice B), conforme a Equação 8:

$$T_c = 1,023 T_m \quad (8)$$

Em que:

$T_c$  – temperatura corrigida, °C; e

$T_m$  – temperatura medida, °C.

As avaliações utilizando a câmera térmica foram realizadas ao final da imposição dos tratamentos e em quatro épocas. Todas as plantas submetidas aos tratamentos foram fotografadas e as imagens foram analisadas no software FLIR Tools (Figura 12C).

A análise dentro do programa foi feita selecionando-se uma área da imagem de 100 x 100 pixels do terço superior da planta, considerada uma porção representativa do dossel. Depois de selecionar essa área, calculou-se, através do mesmo software, a temperatura média da planta com base nos valores de



temperatura de 10000 pixels. Assim, foram feitas as médias de temperatura por planta em cada dia de avaliação.

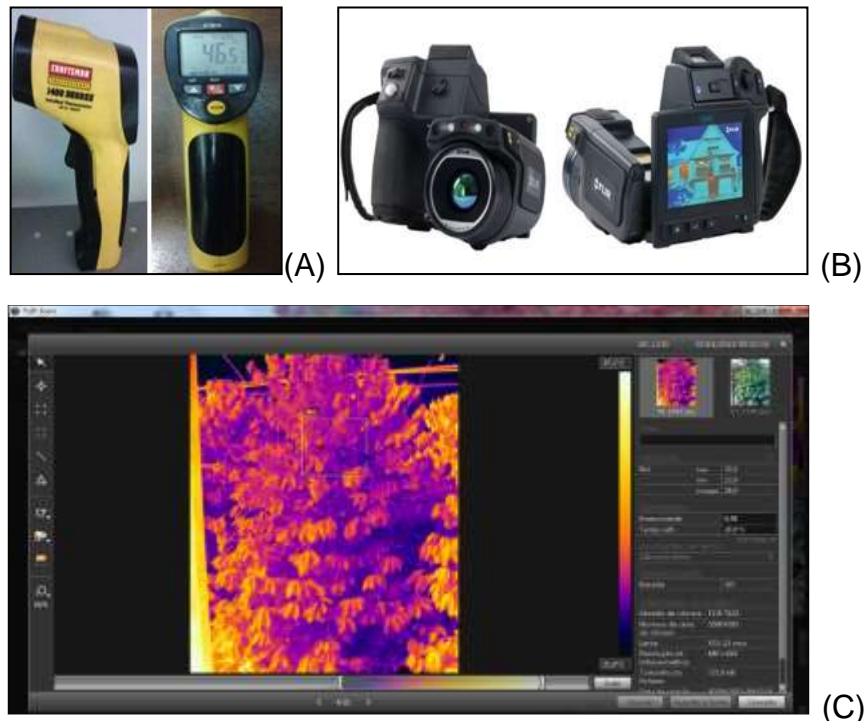


Figura 12 – Canhão infravermelho (A); Câmera térmica utilizada no experimento (B); Imagem térmica no software FLIR Tools (C)

### 3.3.4 Crop Water Stress Index (CWSI)

Com os dados de temperatura foliar e os dados meteorológicos calculou-se o *Crop Water Stress Index* (CWSI). Os dados meteorológicos foram obtidos em uma estação automática (Campbell Scientific) instalada no interior da estufa, com sensores a uma altura de dois metros em relação ao solo. Esta registrava a temperatura do ar (°C), a umidade relativa do ar (%) (sensor Vaissala HMP45C-L12) e a radiação solar global (Piranômetro LP02-L12). Os dados foram adquiridos a cada 30 segundos e integrados a cada 15 minutos por meio de sistema de aquisição ou “datalogger” (Campbell CR1000).

O CWSI foi calculado de acordo a metodologia de Jackson, Kustas e Choudhury (1988), conforme a Equação 9:

$$CWSI = \frac{(T_c - T_a) - (T_c - T_a)LBI}{(T_c - T_a)LBS - (T_c - T_a)LBI} \quad (9)$$

Em que:

CWSI – *Crop Water Stress Index*, adimensional;

Tc – temperatura da cultura, °C;

Ta – temperatura média do ar, °C;

$(Tc - Ta)_{LBI}$  - linha base de temperatura inferior, corresponde a diferença de temperatura do ar para uma cultura bem irrigada quando a resistência para a perda de água é igual a zero, ou também, corresponde a temperatura da superfície molhada, °C; e

$(Tc - Ta)_{LBS}$  - linha base de temperatura superior, corresponde a diferença de temperatura do ar para uma cultura com déficit hídrico quando a resistência para a perda de água do dossel aumentar sem limites, ou também, corresponde a temperatura da superfície seca, °C.

As linhas base de temperatura, inferior e superior, foram determinadas de duas maneiras. A primeira maneira, chamada de linha de base observada, foi obtida através da mínima e da máxima diferença entre a temperatura da cultura observada (Tc) e a temperatura média do ar (Ta). Neste caso, o CWSI foi chamado de *Crop Water Stress Index* observado (CWSIobs).

A outra maneira foi através do método teórico de Jackson et al. (1981), nesta situação o CWSI foi chamado de *Crop Water Stress Index estimado* (CWSIest). Jackson et al. (1981) sugerem que a linha base inferior  $(Tc - Ta)_{LBI}$  seja estimada considerando a resistência estomática igual a zero, ou seja, cultura bem irrigada, conforme a Equação 10:

$$(Tc - Ta)_{LBI} = \frac{(Rn - G)ra}{\rho ar Cp (1 + \frac{\Delta}{\gamma})} - \frac{DPV}{\gamma(1 + \frac{\Delta}{\gamma})} \quad (10)$$

Em que:

Rn – radiação solar líquida, W m<sup>-2</sup>;

G – fluxo de calor do solo, W m<sup>-2</sup>;

ra – resistência aerodinâmica, s m<sup>-1</sup>;

DPV – déficit de pressão de vapor, KPa;

par – densidade do ar, Kg m<sup>-3</sup>;

γ – constante psicrométrica, KPa °C<sup>-1</sup>;

Cp – capacidade de calor do ar, KJ Kg<sup>-1</sup> °C<sup>-1</sup>; e

Δ - inclinação da curva que relaciona a pressão de vapor saturado à temperatura, KPa °C<sup>-1</sup>.

A radiação solar líquida (Rn) foi estimada em função da radiação solar global utilizando a Equação 11 para cafezal, proposta por Marin (2003):

$$R_n = 0,49 Q_g \quad (11)$$

Em que:

$Q_g$  – radiação solar global,  $W m^{-2}$ .

O fluxo de calor do solo ( $G$ ) foi estimado segundo Allen et al. (1998), através da Equação 12, para períodos durante o dia:

$$G = 0,1 R_n \quad (12)$$

A resistência aerodinâmica ( $r_a$ ) foi calculada a partir da Equação 13 proposta por Allen et al. (1998). A altura de planta adotada foi de 1,8 metros. A velocidade do vento medida a dois metros foi fixada a  $0,5 m s^{-1}$ , pois segundo Allen et al. (1998) isso melhora a precisão da estimativa nas condições de velocidade do vento muito baixa.

$$r_a = \frac{(\ln(\frac{z-d}{z_0}))^2}{K^2 u} \quad (13)$$

Em que:

$z$  – altura de referência da medida, m;

$d$  – altura de deslocamento do plano zero ( $d = 2/3$  da altura da cultura), m;

$z_0$  – comprimento da rugosidade da superfície ( $z_0 = 0,123$  da altura da cultura), m;

$K$  – constante de Von Karman ( $K = 0,4$ ), adimensional; e

$u$  – velocidade do vento ( $m s^{-1}$ ).

O déficit de pressão de vapor (DPV), a densidade do ar ( $\rho_a$ ), a constante psicrométrica ( $\gamma$ ), a capacidade de calor do ar ( $C_p$ ), e a inclinação da curva que relaciona a pressão de vapor saturado à temperatura ( $\Delta$ ) também foram calculados de acordo Allen et al. (1998), conforme as Equações 14, 15, 16, 17 e 18, respectivamente.

$$DPV = e_s - e_a \quad (14)$$

Em que:

es – pressão parcial saturante de vapor, KPa; e  
 ea – pressão parcial atual de vapor, KPa.

No cálculo da densidade do ar foram utilizadas equações parciais para se obter a pressão atmosférica local e a temperatura virtual, estas estão disponíveis em Allen et al. (1998).

$$p_{ar} = 3,486 \frac{P}{TK_v} \quad (15)$$

Em que:

P – pressão atmosférica local, KPa; e  
 TK<sub>v</sub> – temperatura virtual, K.

$$\gamma = 0,00163 \frac{P}{\lambda} \quad (16)$$

Em que:

λ – calor latente de vaporização, MJ Kg<sup>-1</sup>.

$$C_p = \frac{\gamma \varepsilon \lambda}{P} \quad (17)$$

Em que:

ε – relação do peso molecular da água e do ar seco (0,622), decimal.

$$\Delta = \frac{4098 e^{(T_a)}}{(T_a + 237,3)^2} \quad (18)$$

Em que:

T<sub>a</sub> – temperatura média do ar, °C.

Para a estimativa da linha base superior (T<sub>c</sub> – T<sub>a</sub>)<sub>LBS</sub>, seguiu-se as recomendações de Jackson et al. (1981), considerando a situação na qual a resistência para a perda de água aproxima-se do infinito, conforme a Equação 19:

$$(T_c - T_a)_{LBS} = \frac{(R_n - G) r_a}{\rho_{ar} C_p} \quad (19)$$

As diferenças entre a temperatura da cultura e a temperatura média do ar ( $T_c - T_a$ ) acima de 7°C e abaixo de -10°C foram descartadas, isso porque, de acordo Meron et al. (2013), esses valores relacionam-se com a temperatura do solo e com a temperatura de objetos frios, respectivamente. Por isso, estes valores não devem ser considerados.

O CWSI observado e estimado foi correlacionado com o potencial de água na folha e o estudo dessas correlações foram feitas através do coeficiente de Pearson e dos índices de concordância proposto por Willmott (1982) e de confiança proposto por Camargo e Sentelhas (1997).

Com os dados meteorológicos coletados foram feitas estimativas de evapotranspiração de referência ( $ET_o$ ) utilizando os métodos de Penman-Monteith e Priestley Taylor. O segundo método utilizado foi escolhido pelo fato de considerar o componente aerodinâmico como um percentual fixo do componente energético, o que permite comparações com as condições de desenvolvimento do trabalho, nas quais a velocidade do vento foi fixada em  $0,5 \text{ m s}^{-1}$ .

As lâminas de irrigação aplicadas no tratamento L100% ao longo das quatro épocas de avaliação (30/03 a 24/04, 07/06 a 02/07, 17/08 a 11/09 e 10/10 a 04/11) e as estimativas de evapotranspiração de referência ( $ET_o$ ) utilizando os métodos de Penman-Monteith e Priestley Taylor foram usadas para o cálculo dos coeficientes de cultura ( $K_c$ ) nas diferentes situações.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

O tópico resultados e discussão foi dividido nos seguintes sub-tópicos: dados meteorológicos, dados de irrigação, fração de radiação fotossinteticamente ativa, potencial de água na folha, temperatura foliar e CWSI x potencial de água na folha.

### 4.1 Dados meteorológicos

Os dados meteorológicos do ano de 2015 (ano em que foram feitas as avaliações deste trabalho) são apresentados na Figura 13. A temperatura mínima diária oscilou entre 8,9 °C (29 de julho) e 24,5 °C (20 de janeiro) e fechou o ano de 2015 com uma média de 18,2 °C. A temperatura média diária variou entre 15,4 °C (06 de julho) e 33,5 °C (19 de janeiro) e teve uma média anual de 24,3 °C, a qual está acima da faixa ótima para o bom desenvolvimento vegetativo e reprodutivo do cafeeiro, que fica entre 18 °C e 21 °C para o café arábica (RENA; MAESTRI, 1987). A temperatura máxima diária variou entre 18,8 °C (06 de julho) e 47,2 °C (19 de janeiro) e teve uma média anual de 34,9 °C. Analisando as médias mensais, o mês de julho teve a menor média, com valor de 19,8 °C, e o mês de janeiro a maior média, com valor de 29,4 °C.

O valor de umidade relativa do ar média anual foi de 76,9%, oscilando entre a máxima de 99,0% (8 de julho) e a mínima de 51,4% (12 de agosto) (Figura 13B). A radiação solar variou de 1,2 MJ m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup> (28 de agosto) a 20,7 MJ m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup> (3 de março) e teve uma média anual de 11,43 MJ m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>. O valor mínimo de radiação solar coincide com os menores valores de ETo, confirmando o papel determinante dessa variável física na taxa de transpiração das plantas.

Os valores extremos de evapotranspiração de referência (ETo) estimados pelo método de Penman-Monteith oscilaram entre 0,23 mm d<sup>-1</sup> (28 de agosto) e 5,07 mm d<sup>-1</sup> (11 de janeiro), e a média para o período de avaliação foi de 2,65 mm d<sup>-1</sup> (Figura 13C). Já os valores de ETo estimados pelo método de Priestley Taylor variaram entre 0,22 mm d<sup>-1</sup> (28 de agosto) e 5,76 mm d<sup>-1</sup> (9 de janeiro), e a média para o período de avaliação foi de 2,93 mm d<sup>-1</sup>.

As estimativas pelos dois métodos apresentaram valores bem próximos ao longo de ano. Isso permite afirmar que o uso da medida de velocidade do vento

fixada em  $0,5 \text{ m s}^{-1}$ , que segundo Allen et al. (1998) pode ser usada em condições de velocidade do vento muito baixa, permitiu a obtenção de estimativas de ETo coerentes com os valores calculados pelo método de Priestley Taylor que é um método que considera o componente aerodinâmico como um percentual fixo do componente energético.

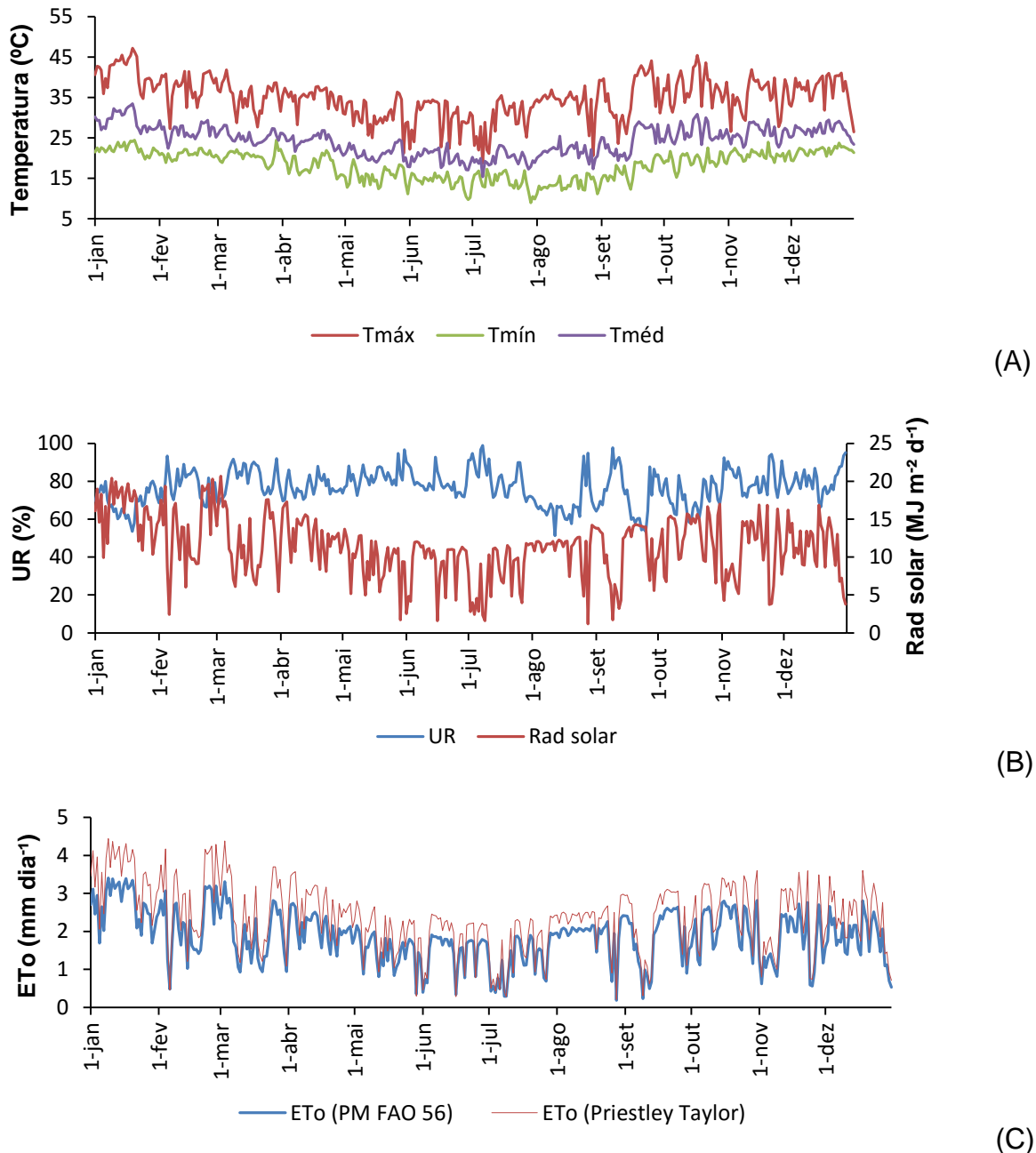


Figura 13 – Variação diária da temperatura máxima, mínima e média ao longo do ano de 2015 (A); Variação diária da radiação solar global e da umidade relativa média no mesmo período (B); Variação diária da evapotranspiração de referência estimada pelos métodos de Penman-Monteith e Priestley Taylor também no mesmo período (C)

Os dados meteorológicos de cada época de imposição dos tratamentos podem ser vistos na Figura 14. A temperatura mínima na época 1 foi de 18,9 °C em média, enquanto que a média da temperatura máxima nesta mesma época foi de 35,5 °C. A temperatura média nesse período de avaliação variou entre 21,6 °C (07 de abril) e 26,8 °C (20 de abril) e a média nesta época 1 foi de 24,8 °C. Na época 2 a temperatura mínima foi de 14,0 °C em média e a média da temperatura máxima no mesmo período foi de 30,8 °C. Nesta mesma época de imposição dos tratamentos a temperatura média oscilou entre 17,0 °C (29 de junho) e 23,8 °C (19 de junho) e a média foi de 20,2 °C. Na 3ª época de avaliação a temperatura mínima e a temperatura máxima foram, em média, 14,7 °C e 33,0 °C, respectivamente. A temperatura média do período foi de 21,7 °C e variou entre 17,3 °C (28 de agosto) e 25,1 °C (01 de setembro). E na época 4 a temperatura mínima foi em média 19,6 °C, enquanto que a temperatura máxima média foi de 36,9 °C. A temperatura média nessa época oscilou entre 23,3 °C (19 de outubro) e 30,8 °C (17 de outubro) e a média do período foi de 26,5 °C (Figura 14A).

A umidade relativa média na época 1, 2 3 e 4 foi de 78,0%, 77,5%, 72,5% e 71,9%, na devida ordem. Já a radiação solar foi em média 12,9 MJ m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>, 9,7 MJ m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>, 10,3 MJ m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup> e 12,6 MJ m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup> na 1ª, 2ª, 3ª e 4ª época, respectivamente (Figura 14B).

Os valores de ETo pelo método de Penman-Monteith na época 1, 2, 3 e 4 foram em média 2,86 mm d<sup>-1</sup>, 1,86 mm d<sup>-1</sup>, 2,31 mm d<sup>-1</sup> e 3,14 mm d<sup>-1</sup>, respectivamente. Já pelo método de Priestley Taylor a evapotranspiração de referência foi em média 3,22 mm d<sup>-1</sup>, 1,94 mm d<sup>-1</sup>, 2,38 mm d<sup>-1</sup> e 3,44 mm d<sup>-1</sup> para as épocas 1, 2, 3 e 4, na ordem devida (Figura 14C).



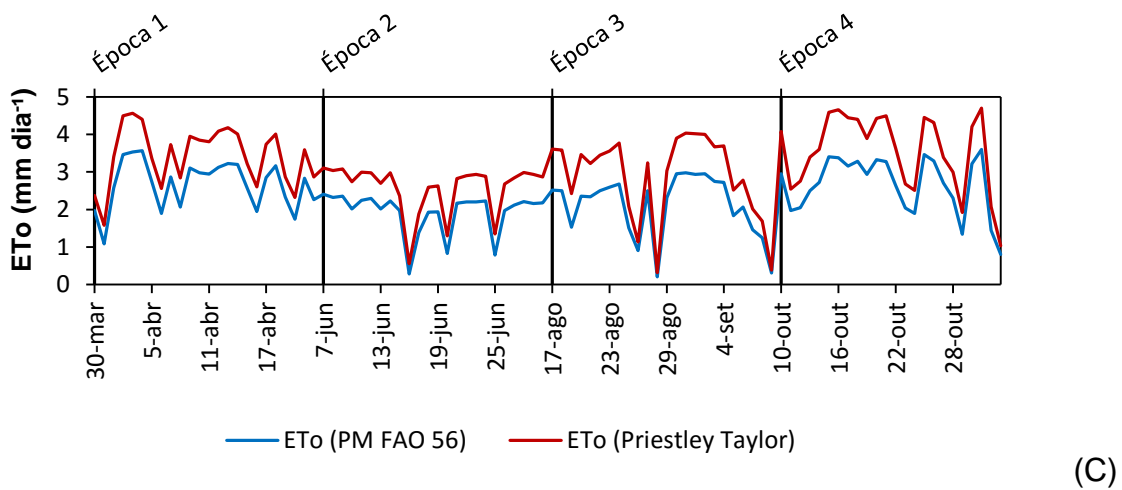
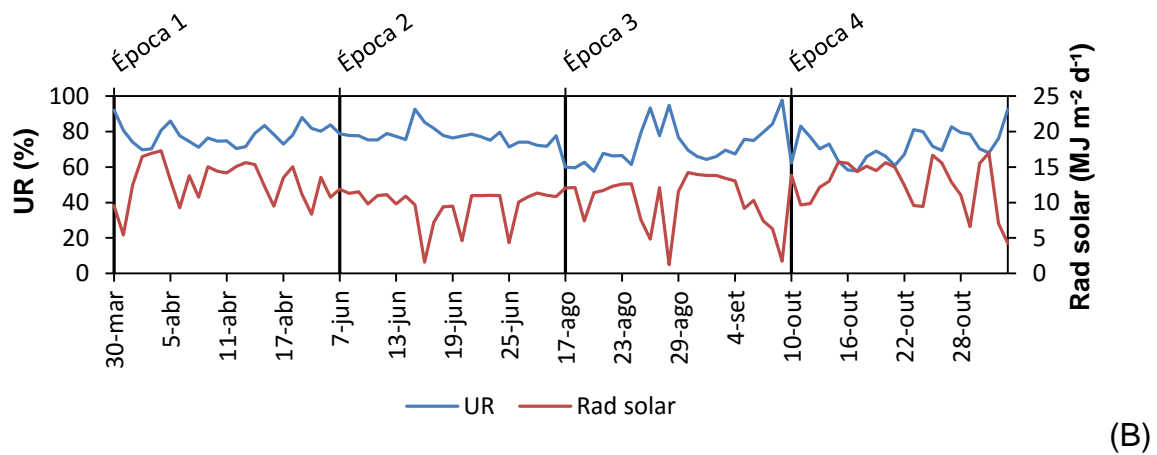
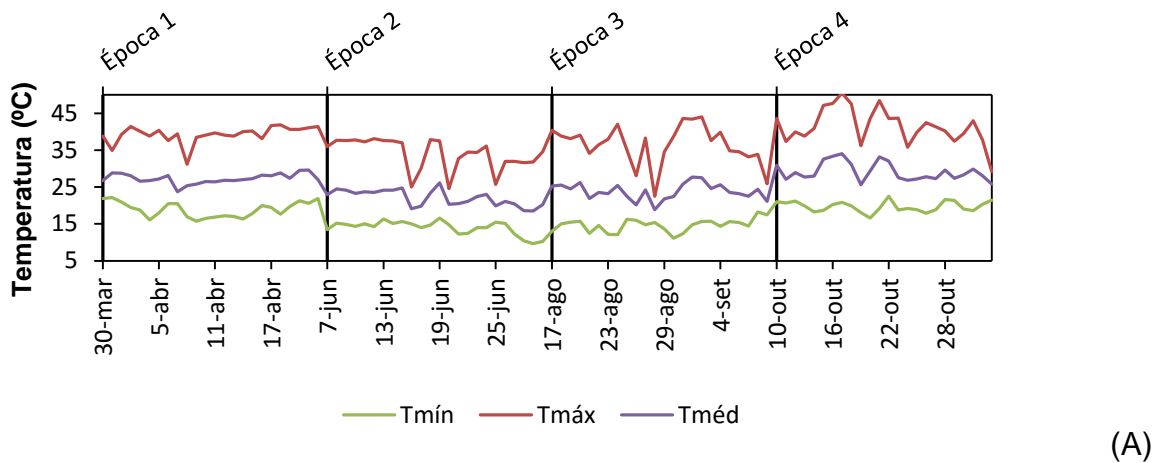


Figura 14 – Variação diária da temperatura máxima, mínima e média nas quatro épocas de imposição dos tratamentos (A); Variação diária da radiação solar global e da umidade relativa média no mesmo período (B); Variação diária da evapotranspiração de referência estimada pelos métodos de Penman-Monteith e Priestley Taylor também no mesmo período (C)

## 4.2 Dados da irrigação

Na Figura 15 são apresentados os valores de tensão de água no solo, medidos nos dias de aplicação das lâminas de irrigação, nas três profundidades durante as quatro épocas de imposição dos tratamentos. Na época 1 as tensões de água no solo medidas a cada três dias foram em média 15 KPa, 9,7 KPa e 4,5 KPa para as profundidades de 20, 40 e 60 cm, respectivamente. Já para a época 2 esses valores foram de 13,3 KPa, 8,8 KPa e 4,4 KPa para as mesmas profundidades citadas. Na época 3 a média das tensões coletadas nas profundidades 20, 40 e 60 cm foram de 13,1 KPa, 8,5 KPa e 4,5 KPa, na ordem devida. Por fim, na 4ª época esses valores foram de 14 KPa, 9,1 KPa e 4,5 KPa para as profundidades 20, 40 e 60 cm, respectivamente.

As lâminas de irrigação aplicadas nos tratamentos impostos nas quatro épocas de avaliação são apresentadas na Figura 16. Observa-se que na época 1 as lâminas de irrigação aplicadas a cada três dias foram em média 10,4 mm, 8,0 mm, 5,6 mm e 3,2 mm para os tratamentos L130%, L100%, L70% e L40%, respectivamente. Já para a época 2 esses valores foram de 7,1 mm, 5,5 mm, 3,8 mm e 2,2 mm para os mesmos tratamentos citados. Na época 3 a média das lâminas de irrigação aplicadas nos tratamentos L130%, L100%, L70% e L40% foram de 6,8 mm, 5,2 mm, 3,6 mm e 2,1 mm, na ordem devida. Por fim, na 4ª época esses valores foram de 7,9 mm, 6,1 mm, 4,2 mm e 2,4 mm para os tratamentos L130%, L100%, L70% e L40%, respectivamente.

Ao comparar as lâminas de irrigação do tratamento L100% ao longo das quatro épocas de avaliação com as estimativas de evapotranspiração de referência pelos dois métodos, observou-se que esta relação, considerando o método de Penman-Monteith foi expressa por coeficientes de cultura ( $K_c$ ) que apresentaram valores de 0,93, 0,98, 0,75 e 0,64 nas épocas 1, 2, 3 e 4, respectivamente. Ao considerar o método de Priestley Taylor, verificou-se valores para o  $K_c$  de 0,82, 0,94, 0,73 e 0,59 nas épocas 1, 2, 3 e 4, na devida ordem.

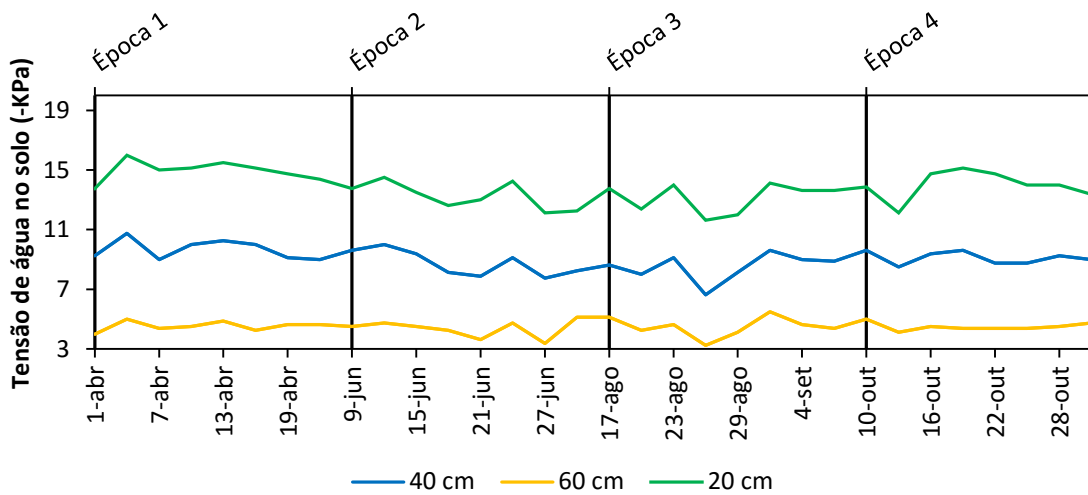


Figura 15 – Tensão de água no solo medida nas profundidades de 20, 40 e 60 cm nas quatro épocas de imposição dos tratamentos

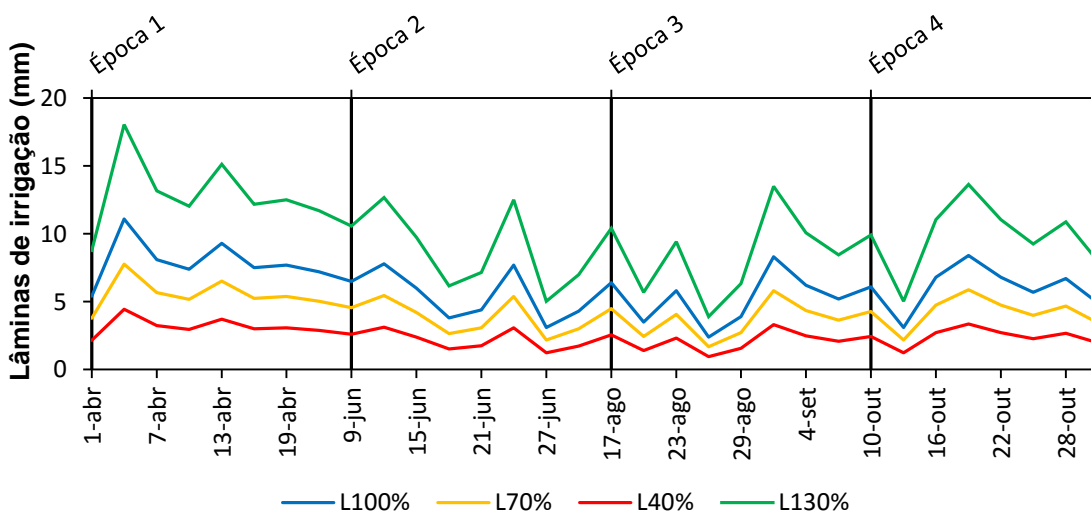


Figura 16 – Lâminas de irrigação aplicadas nos tratamentos L130%, L100%, L70% e L40% nas quatro épocas de imposição dos tratamentos

### 4.3 Fração de radiação fotossinteticamente ativa

Na análise de variância da fração de radiação fotossinteticamente ativa incidente (RFAi) em diferentes porções do dossel do cafeeiro verificou-se que houve efeito significativo ao nível de 5% de probabilidade das fontes de variação blocos, lâminas de irrigação, porções da planta e da interação das lâminas de irrigação com as porções da planta, conforme a Tabela 15.

Tabela 15 – Resumo da análise de variância da fração de radiação fotossinteticamente ativa incidente em diferentes porções do dossel do cafeeiro

Fontes de variação (F.V.)	Graus de liberdade (G.L.)	Quadrado médio (Q.M.)
Blocos (B)	3	9,5517 <sup>*</sup>
Lâminas de irrigação (LI)	3	2095,3089 <sup>*</sup>
Porções da planta (PP)	2	28964,0822 <sup>*</sup>
Lâminas x Porções (LI x PP)	6	534,21556 <sup>*</sup>
Resíduo (R)	49	1,4850

Coefficiente de variação (C.V.) = 2,30 %

\* significativo ao nível de 5% de probabilidade

Nos mapas de percentual de RFAi nos quadrantes amostrados no dossel do cafeeiro observaram-se diferentes padrões de cores em função dos tratamentos de lâminas de irrigação e das porções da planta. No mapa da Figura 17A, criado a partir de dados médios das plantas submetidas ao tratamento L130%, verificou-se que o percentual de RFAi ficou em torno de 90% nos quadrantes superiores. Já nos quadrantes médios e inferiores, esse valor ficou em torno de 35% e 4%, respectivamente. O mapa das plantas submetidas ao tratamento L100% (Figura 17B) apresentou um padrão parecido com o mapa das plantas submetidas ao tratamento L130%. Já nos mapas das plantas submetidas aos tratamentos L70% (Figura 17C) e L40% (Figura 17D) verificaram-se padrões diferentes em relação aos mapas das plantas submetidas aos tratamentos L130% e L100%. Nestes mapas das plantas submetidas aos tratamentos com lâminas de irrigação deficitárias verificou-se que o percentual de RFAi ficou em torno de 90% nos quadrantes superiores, já nos quadrantes médios e inferiores, esse valor ficou em torno de 60% e 27%, respectivamente.

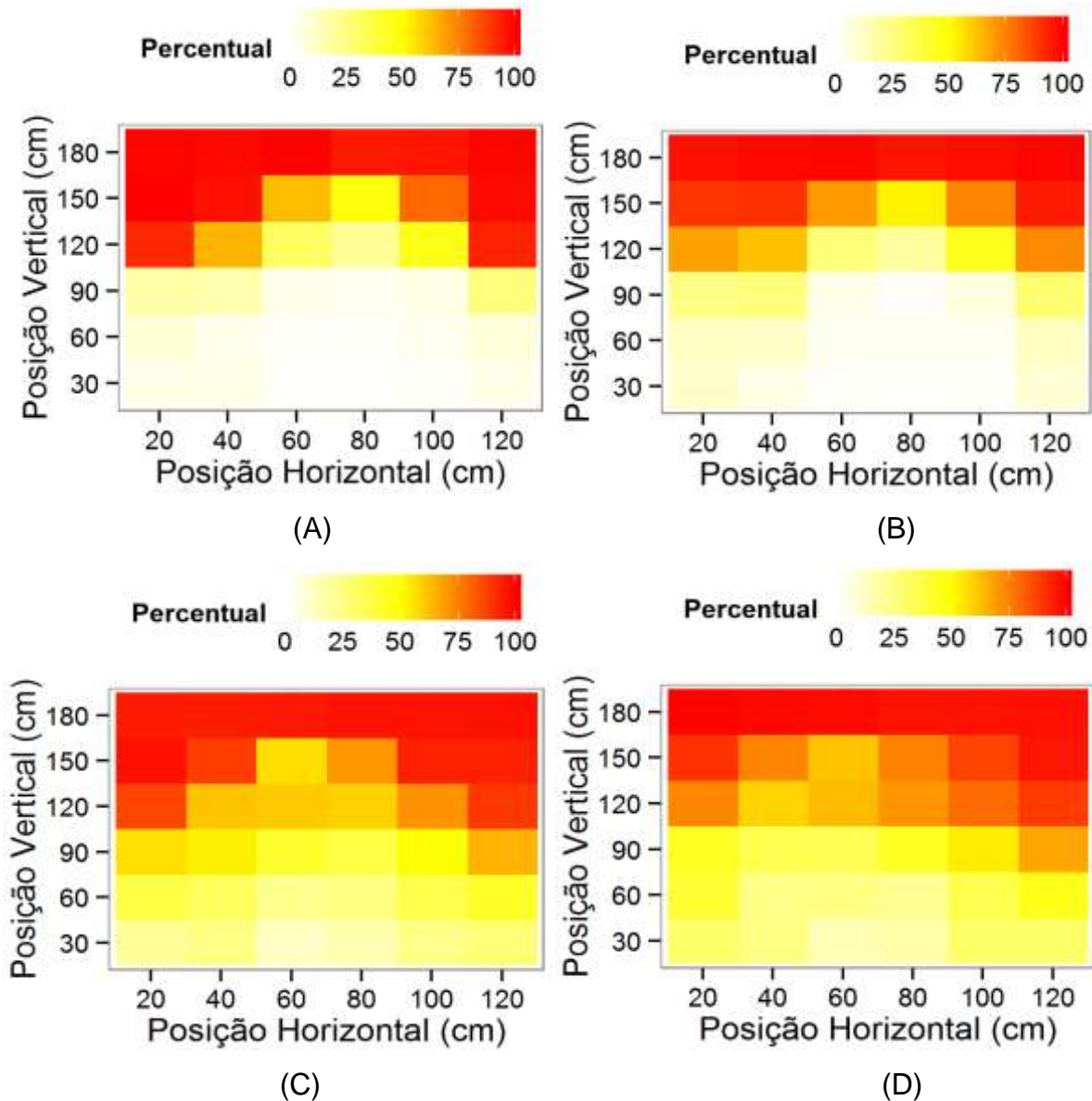


Figura 17 – Mapas do percentual de radiação fotossinteticamente ativa incidente em cada quadrante amostrado no dossel do cafeeiro. Mapa com média das plantas submetidas ao tratamento L130% (A); Mapa com média das plantas submetidas ao tratamento L100% (B); Mapa com média das plantas submetidas ao tratamento L70% (C); Mapa com média das plantas submetidas ao tratamento L40% (D)

O percentual de RFAi no terço superior, no terço médio e no terço inferior das plantas submetidas a diferentes lâminas de irrigação diferiu-se estatisticamente a um nível de 5% de probabilidade pelo teste de Tukey (Figura 18). Como já era esperado, observou-se que em todas as lâminas de irrigação, o percentual de RFAi foi maior no terço superior quando comparado ao terço médio e ao terço inferior. Esses percentuais também foram maiores no terço médio quando comparado ao terço inferior em todas as lâminas de irrigação.

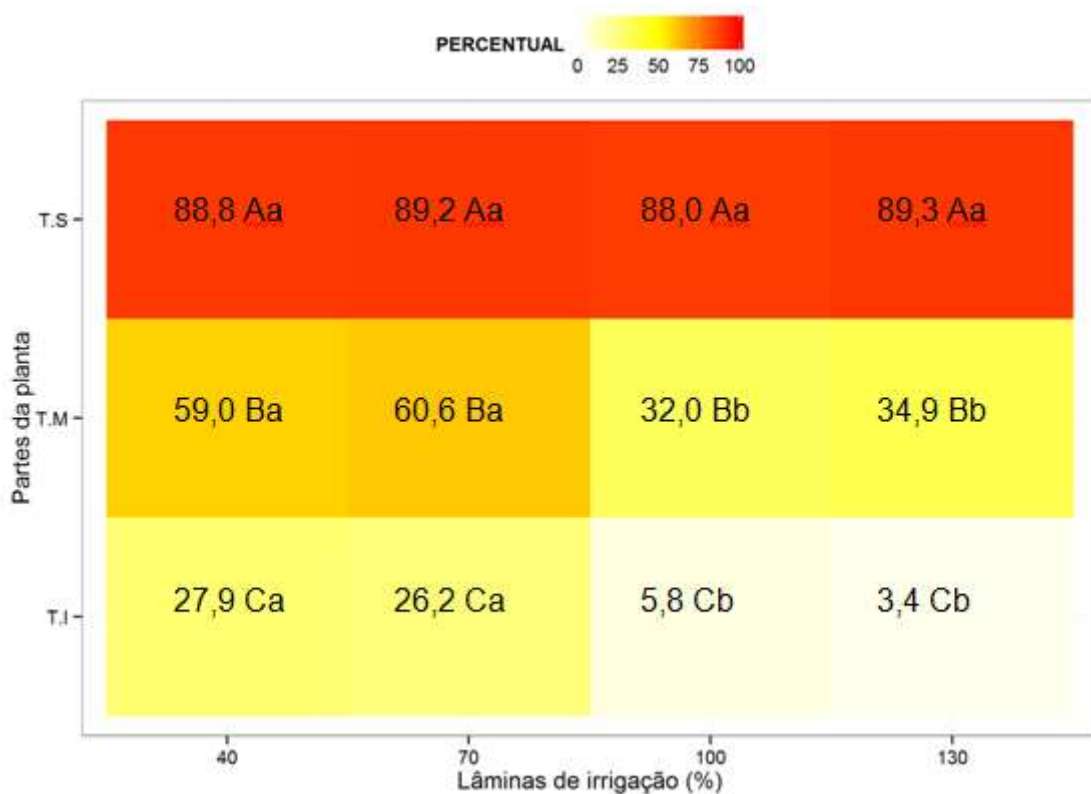


Figura 18 – Porcentagem de radiação fotossinteticamente ativa incidente no terço superior (T.S), no terço médio (T.M) e no terço inferior (T.I) de plantas submetidas a diferentes lâminas de irrigação (L130%, L100%, L70% e L40%). Letras maiúsculas distintas dentro da mesma lâmina de irrigação e letras minúsculas distintas dentro da mesma parte da planta diferem entre si a um nível de 5% de probabilidade pelo teste de Tukey

Estes resultados corroboram com Marin et al. (2003) que estabeleceram que em dosséis de cafezais, um gradiente vertical de irradiância na copa é formado através da atenuação da radiação solar e, também com Righi et al. (2008) que verificaram um gradiente horizontal, em função das dimensões dos renques e do ângulo de incidência da radiação solar.

Segundo Righi et al. (2008) o gradiente vertical constitui a maior fonte energética do processo transpiratório da planta exposta à radiação solar. Assim, a diferença entre a temperatura foliar e a temperatura do ar, que está relacionada à transpiração, ficará mais evidente na porção superior da planta, o que fundamenta a realização de medidas de temperatura nessa parte do dossel do cafeeiro.

Analisando o percentual de RFAi no terço superior, verificou-se que esta não se diferiu estatisticamente nas diferentes lâminas de irrigação. Já no terço médio e inferior, o percentual de radiação fotossinteticamente ativa incidente nos tratamentos

L130% e L100%, foi estatisticamente diferente das porcentagens verificadas nos tratamentos L70% e L40%.

Essa diferença apresentada pelos tratamentos com lâminas de irrigação deficitárias possivelmente foi provocada pela desfolha das porções superiores da planta, o que permitiu um aumento do percentual da RFAi nas porções média e inferior.

Estes resultados estão de acordo com Pilau e Angelocci (2014), que afirmaram que os gradientes verticais e horizontais de irradiância na copa são continuamente alterados por variações da área foliar provocadas por condições ambientais ou processos de condução do cafezal que interferem diretamente na interceptação da radiação solar.

#### 4.4 Potencial de água na folha

Na análise de variância do potencial de água na folha verificou-se que houve efeito significativo ao nível de 5% de probabilidade das fontes de variação lâminas de irrigação, épocas e interação das lâminas de irrigação com as épocas. Nesta situação os blocos não apresentaram efeito significativo, conforme a Tabela 16.

Tabela 16 – Resumo da análise de variância do potencial de água na folha

Fontes de variação (F.V.)	Graus de liberdade (G.L.)	Quadrado médio (Q.M.)
Blocos (B)	3	0,0004 <sup>ns</sup>
Lâminas de irrigação (LI)	3	3,5338*
Épocas (E)	3	0,0554*
Lâminas x Épocas (LI x E)	9	0,0172*
Resíduo (R)	45	0,0006

Coeficiente de variação (C.V.) = 3,56 %

\* significativo ao nível de 5% de probabilidade

<sup>ns</sup> não significativo ao nível de 5% de probabilidade

A variabilidade dos dados de potencial de água na folha em diferentes lâminas de irrigação pode ser vista nos gráficos box-plot da Figura 19. Nas avaliações feitas aos 6 dias após a imposição dos tratamentos (Figura 19A), observa-se que a variabilidade foi semelhante para todas as lâminas aplicadas e que o valor mediano de potencial de água na folha ficou em torno de -0,30 MPa para

todos os tratamentos. Aos 12 dias após a imposição dos tratamentos (Figura 19B) a variabilidade dos dados foi maior nos tratamentos L40% e L70%, mas o valor mediano de potencial de água na folha continuou em torno de -0,30 MPa para todos os tratamentos.

Com essa resposta das plantas é possível inferir que até os 12 dias após a imposição dos tratamentos as lâminas deficitárias não afetaram o potencial de água na folha de forma significativa, nas condições do experimento. Soares et al. (2005) avaliaram cafeeiros adultos com oito anos de plantio e encontraram diferenças de potenciais de água da folha entre plantas irrigadas e não irrigadas somente aos 30 dias após a imposição dos tratamentos, sendo que as que receberam irrigação plena apresentaram nesse período um potencial de água na folha de -0,20 MPa.

Ronchi et al. (2015) estudaram o potencial hídrico foliar no pré amanhecer das cultivares Catuaí Vermelho IAC 144 e Bourbon Amarelo J9 submetidas a tratamentos não irrigado, irrigado continuamente e com diferentes períodos de suspensão da irrigação e observaram que na primeira cultivar o comportamento da variável avaliada foi o mesmo para todos os tratamentos aos 30 dias, apresentando valores em torno de -0,20 MPa. Já na cultivar Bourbon Amarelo J9, a variável comportou-se de forma diferente, apresentando valores que variaram de -0,10 MPa no tratamento irrigado continuamente a -0,80 MPa no tratamento não irrigado. Possivelmente, as cultivares apresentaram diferentes taxas de utilização de água durante o período de imposição dos tratamentos e, conseqüentemente, atingiram diferentes níveis de déficit hídrico, representados por diferentes potenciais de água na folha.

Nas avaliações aos 18 dias após a imposição dos tratamentos (Figura 19C) a variabilidade dos dados foi maior nos tratamentos L40% e L70% em comparação com os tratamentos L130% e L100%. O valor mediano de potencial de água na folha para as lâminas deficitárias ficaram entre -0,6 e -0,8 MPa. Por fim, aos 24 dias após a imposição dos tratamentos (Figura 19D) a variabilidade foi pequena para todas as lâminas aplicadas e os tratamentos L40% e L70% apresentaram valores medianos de potencial de água na folha acima de -1,0 MPa.

Esses dados ratificam o trabalho de Oliveira, Oliveira e Castro (2009) que avaliaram o comportamento fisiológico de diferentes cultivares de café, submetidos às diferentes disponibilidades de água no solo, durante 30 dias, e verificaram que



diferentes manejos de irrigação proporcionaram diferentes níveis de água nos cafeeiros.

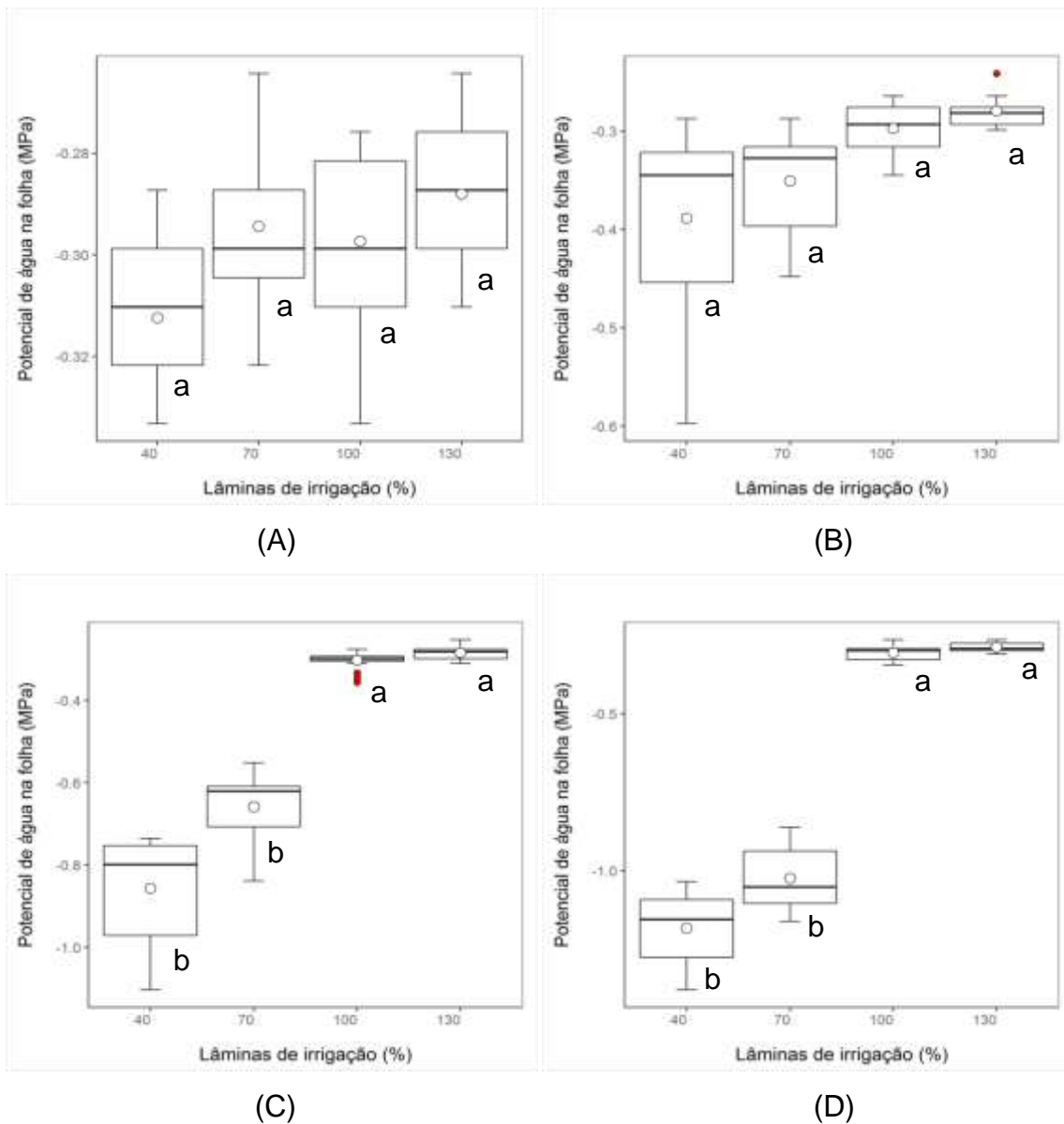


Figura 19 – Gráficos box-plot para valores de potencial de água na folha em diferentes lâminas de irrigação medidos aos 6 dias após a imposição dos tratamentos (A); 12 dias após a imposição dos tratamentos (B); 18 dias após a imposição dos tratamentos (C); 24 dias após a imposição dos tratamentos (D). Letras distintas diferem entre si a um nível de 5% de probabilidade pelo teste de Tukey

A partir dos dados de potencial de água na folha aos 24 dias após a imposição dos tratamentos (momento no qual se verificou as diferenças mais evidentes de potencial hídrico foliar) ajustou-se uma regressão linear simples para descrever o comportamento dessa variável em função das diferentes lâminas de irrigação (Figura 20).

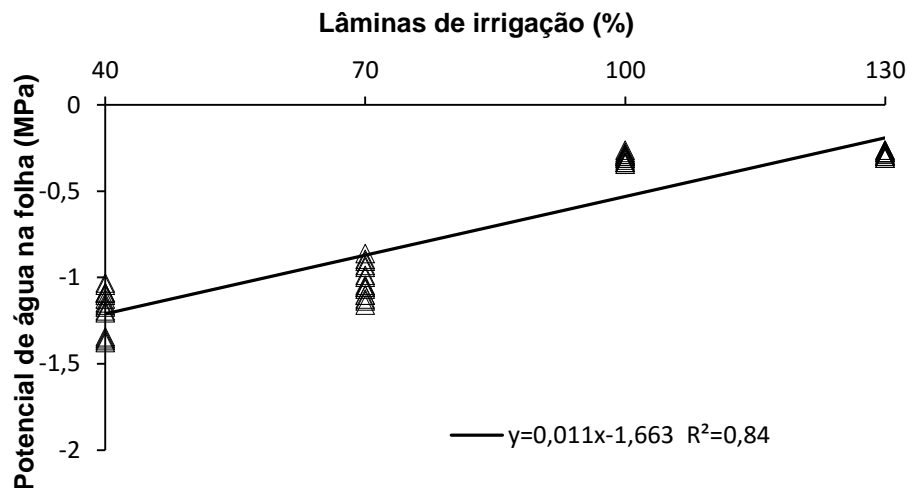


Figura 20 – Potencial de água na folha em função de diferentes lâminas de irrigação

O potencial de água na folha apresentou uma boa relação ( $R^2=0,84$ ) com as lâminas de irrigação aplicadas. Essa relação mostrou um aumento da variável analisada à medida que se aumentou as porcentagens das lâminas de irrigação. Utilizando a equação linear calculou-se os valores estimados para potencial de água na folha, que foram de -0,23 MPa, -0,56 MPa, -0,89 MPa e -1,22 MPa para os tratamentos L130%, L100%, L70% e L40%, respectivamente.

Soares et al. (2005) observaram valores de -0,2 MPa e -0,8 MPa para tratamentos irrigado permanentemente e não irrigado durante trinta dias, ao estudar o efeito do déficit hídrico em cafeeiros adultos na região de Viçosa-MG. Aos 60 dias após a imposição dos tratamentos os potenciais de água na folha do tratamento não irrigado atingiu -1,2 MPa e manteve-se em -0,2 MPa para o tratamento irrigado permanentemente. Aos 90 dias os valores ficaram em -0,2 MPa e -1,8 MPa para os tratamentos irrigado permanentemente e não irrigado.

Ronchi et al. (2015) encontraram valores de potencial hídrico foliar no pré amanhecer na cultivar Catuaí Vermelho IAC 144 de -0,10 MPa, -0,35 MPa, -0,5 MPa e -0,6 MPa para os tratamentos irrigado continuamente, 30 dias de suspensão da irrigação, 60 dias de suspensão da irrigação e não irrigado, respectivamente. Os resultados encontrados por estes autores divergem, em partes, dos valores estimados pela equação da reta sugerida, no entanto, as condições edafoclimáticas e o manejo da cultura em cada trabalho afetam a taxa de utilização de água por parte das plantas, alterando assim o seu potencial hídrico foliar.

#### 4.5 Temperatura foliar

Na análise de variância da temperatura foliar utilizando o canhão infravermelho verificou-se que houve efeito significativo ao nível de 5% de probabilidade das fontes de variação lâminas de irrigação, épocas e interação das lâminas de irrigação com as épocas. Nesta situação os blocos não apresentaram efeito significativo, conforme a Tabela 17.

Tabela 17 – Resumo da análise de variância da temperatura foliar utilizando o canhão infravermelho

Fontes de variação (F.V.)	Graus de liberdade (G.L.)	Quadrado médio (Q.M.)
Blocos (B)	3	0,1316 <sup>ns</sup>
Lâminas de irrigação (LI)	3	16,0977*
Épocas (E)	3	266,7537*
Lâminas x Épocas (LI x E)	9	2,2924*
Resíduo (R)	45	0,0574

Coeficiente de variação (C.V.) = 5,07 %

\* significativo ao nível de 5% de probabilidade

<sup>ns</sup> não significativo ao nível de 5% de probabilidade

A variabilidade dos dados de temperatura foliar utilizando o canhão infravermelho em diferentes lâminas de irrigação pode ser vista nos gráficos box-plot da Figura 21. Observa-se que a variabilidade dos dados foi semelhante em todas as lâminas de irrigação aos 6, aos 12, aos 18 e aos 24 dias após a imposição dos tratamentos. Nas avaliações feitas aos 6 dias após a imposição dos tratamentos (Figura 21A) observa-se que o valor mediano de temperatura foliar ficou próximo de 34 °C para todos os tratamentos. Aos 12 dias após a imposição dos tratamentos (Figura 21B) o valor mediano de temperatura foliar ficou entre 34 °C e 35 °C para todos os tratamentos.

Essa resposta das plantas permite afirmar que, nas condições do experimento, as lâminas deficitárias não possibilitaram a ocorrência de uma diferença significativa de temperatura entre plantas com ou sem déficit hídrico até os 12 dias após a imposição dos tratamentos. Provavelmente, nesse período, as plantas submetidas aos tratamentos L70% e L40% mantiveram a sua atividade transpiratória no mesmo nível das demais. Por esse motivo não foi possível verificar uma diferença de temperatura foliar considerável entre as plantas submetidas aos

tratamentos L130% e L100% e as plantas submetidas aos tratamentos com lâminas de déficit.

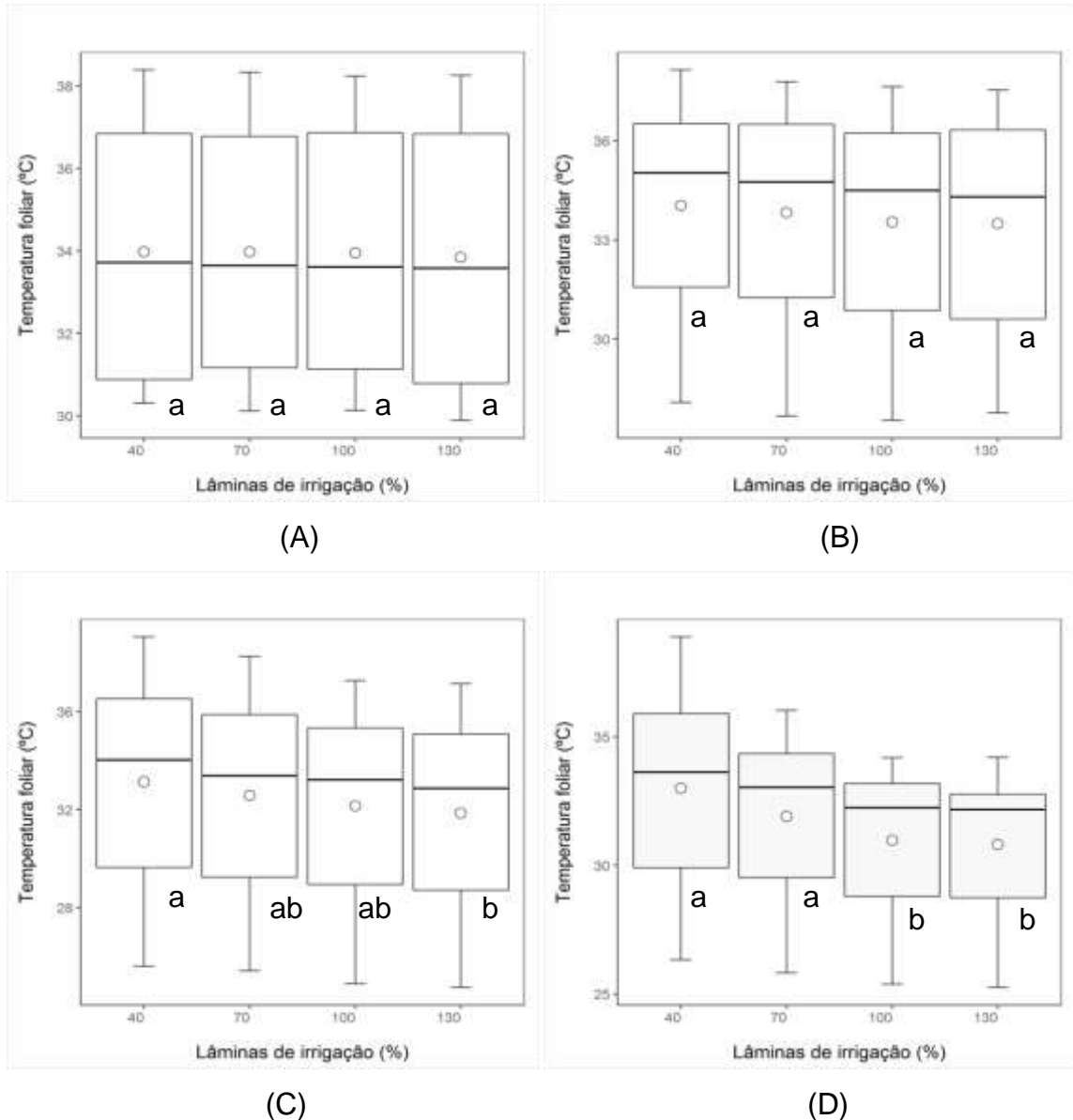


Figura 21 – Gráficos box-plot para valores de temperatura foliar medida com o canhão infravermelho em diferentes lâminas de irrigação aos 6 dias após a imposição dos tratamentos (A); aos 12 dias após a imposição dos tratamentos (B); aos 18 dias após a imposição dos tratamentos (C); aos 24 dias após a imposição dos tratamentos (D). Letras distintas diferem entre si a um nível de 5% de probabilidade pelo teste de Tukey

Nas avaliações aos 18 dias após a imposição dos tratamentos (Figura 21C) o valor mediano de temperatura foliar ficou entre 32 °C e 34 °C para todos os tratamentos. A diferença de temperatura foliar entre o tratamento L40% e o tratamento L130% foi de aproximadamente 1 °C. Por fim, aos 24 dias após a

imposição dos tratamentos (Figura 21D) os tratamentos L40% e L70% apresentaram valores medianos de temperatura foliar maiores que os tratamentos L130% e L100%. Nos tratamentos com lâminas deficitárias a temperatura foliar ficou de 1 a 3 °C maior que a temperatura foliar dos tratamentos L130% e L100%.

Os valores encontrados ficaram próximos dos dados verificados por Iaffe et al. (2003) que utilizaram o canhão infravermelho para avaliarem a recuperação do potencial hídrico do cafeeiro e observaram que a diferença de temperatura da folha e do ar diferenciou as parcelas segundo seu déficit hídrico, em até 3,5 °C entre o tratamento irrigado e não irrigado durante a floração em Garça-SP.

Ramírez et al. (2015b) avaliaram as diferenças entre as temperaturas do ar e da folha do tomate cereja (*Lycopersicon solanum*) utilizando o canhão infravermelho e também verificaram que as plantas submetidas ao estresse hídrico apresentaram maior temperatura foliar do que aquelas sem déficit de água.

Nunes (2012) também encontrou diferenças parecidas entre a temperatura do ar e a temperatura foliar de cultivares de feijão-caupi na ausência e presença de déficit hídrico. No entanto, essas diferenças ficaram em torno de 3 °C aos 7 dias após a imposição dos tratamentos.

Na análise de variância da temperatura foliar utilizando a câmara térmica verificou-se que houve efeito significativo ao nível de 5% de probabilidade das fontes de variação lâminas de irrigação, épocas e interação das lâminas de irrigação com as épocas. Nesta situação os blocos não apresentaram efeito significativo, conforme a Tabela 18.

Tabela 18 – Resumo da análise de variância da temperatura foliar utilizando a câmara térmica

Fontes de variação (F.V.)	Graus de liberdade (G.L.)	Quadrado médio (Q.M.)
Blocos (B)	3	3,7788 <sup>ns</sup>
Lâminas de irrigação (LI)	3	11,5706*
Épocas (E)	3	348,8293*
Lâminas x Épocas (LI x E)	9	1,8717 <sup>ns</sup>
Resíduo (R)	45	1,5943

Coeficiente de variação (C.V.) = 3,76 %

\* significativo ao nível de 5% de probabilidade

<sup>ns</sup> não significativo ao nível de 5% de probabilidade

A variabilidade dos dados de temperatura foliar utilizando a câmera térmica, no final da imposição de diferentes lâminas de irrigação e em diferentes épocas pode ser vista nos gráficos box-plot da Figura 22. Observa-se que a variabilidade dos dados diferiu-se nas épocas e em função das lâminas de irrigação.

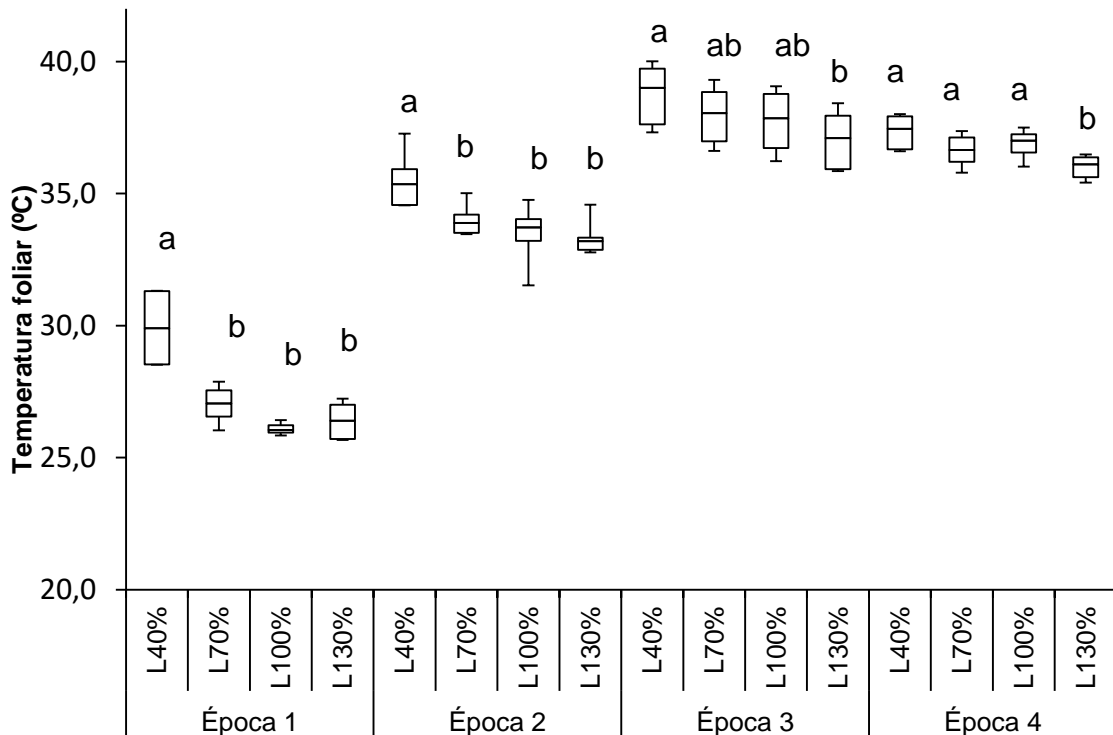


Figura 22 – Gráfico box-plot para valores de temperatura foliar medida com a câmera térmica em diferentes lâminas de irrigação nas quatro épocas de imposição dos tratamentos. Letras distintas diferem entre si a um nível de 5% de probabilidade pelo teste de Tukey

Na época 1 o valor mediano de temperatura foliar no tratamento L40% foi de aproximadamente 3 °C maior que a valor mediano de temperatura foliar nos tratamentos L130% e L100%. Em relação ao tratamento L70% essa diferença foi de aproximadamente 2,5 °C. Na época 2 o valor mediano de temperatura foliar no tratamento L40% foi de aproximadamente 2,5 °C maior que a valor mediano de temperatura foliar nos tratamentos L130% e L100%. Em relação ao tratamento L70% essa diferença foi de aproximadamente 2 °C.

As menores diferenças de temperatura foliar, entre plantas submetidas aos diferentes tratamentos, encontradas na época 2 pode ser explicada pela menor incidência de radiação solar e pelas temperaturas mais amenas nesse período, que resultaram em menores valores de evapotranspiração. De acordo Trentin (2010) a

diferença de temperatura entre a cultura e o ar está intimamente ligada ao processo de transpiração, à medida que esta aumenta há uma redução na temperatura foliar devido à dissipação de energia na forma de calor latente.

Na época 3 o valor mediano de temperatura foliar no tratamento L40% foi de aproximadamente 2 °C maior que a valor mediano de temperatura foliar nos tratamentos L130%. Em relação aos tratamentos L100% e L70% essa diferença foi de aproximadamente 1 °C. Na época 4 o valor mediano de temperatura foliar no tratamento L40% foi de aproximadamente 1 °C maior que a valor mediano de temperatura foliar nos tratamentos L130%. Em relação aos tratamentos L100% e L70% essa diferença foi menor que 1 °C.

As menores diferenças de temperatura foliar, entre plantas submetidas aos diferentes tratamentos, encontradas nas épocas 3 e 4 pode ser explicada pela desfolha provocada pela imposição dos tratamentos, 4 meses antes, na época 1 e 2. A desfolha prejudica a qualidade da imagem térmica, pois esta passa a expressar temperaturas que não estão relacionadas à folhagem da planta. Assim, as médias de temperatura entre plantas com diferentes tratamentos ficam mais próximas já que estas médias contabilizam não só as temperaturas do dossel, mas também pontos em comum fora da copa do cafeeiro.

A partir dos dados de temperatura foliar (canhão infravermelho e câmera térmica) medida ao final da imposição dos tratamentos (momento no qual se verificou as diferenças mais evidentes) foi ajustada uma regressão linear simples para cada equipamento na tentativa de descrever o comportamento dessa variável em função das diferentes lâminas de irrigação (Figura 23).

A temperatura foliar medida com o canhão infravermelho ( $\Delta$ ) apresentou uma boa relação ( $R^2=0,90$ ) com as lâminas de irrigação aplicadas. Já a temperatura foliar medida com a câmera térmica (o) apresentou uma relação não tão boa quanto a do canhão infravermelho ( $R^2=0,65$ ). As duas relações mostraram uma diminuição da variável analisada à medida que se aumentou as porcentagens das lâminas de irrigação.

Utilizando a equação linear do canhão infravermelho foram estimados valores de temperatura foliar para as diferentes lâminas de irrigação. Os valores calculados foram 30,7 °C, 31,4 °C, 32,1 °C e 32,8 °C para os tratamentos L130%, L100%, L70% e L40%, respectivamente. A partir desses valores é possível afirmar que nas condições do experimento, a temperatura foliar, medida com o canhão

infravermelho, das plantas submetidas a lâminas deficitárias foi aproximadamente 1,5 °C maior que a temperatura foliar das plantas que receberam os tratamentos L130% e L100%.

Trentin (2010), utilizando canhão infravermelho para avaliar a temperatura foliar da cana-de-açúcar, verificou diferenças entre a temperatura da cultura e a temperatura do ar que ficaram em torno de 3,8 °C numa condição de estresse severo e de 1,9 °C numa condição de estresse moderado, ou seja, a temperatura foliar de plantas submetidas a estresse hídrico severo foi de 1,9 °C maior que a temperatura foliar das plantas com estresse moderado.

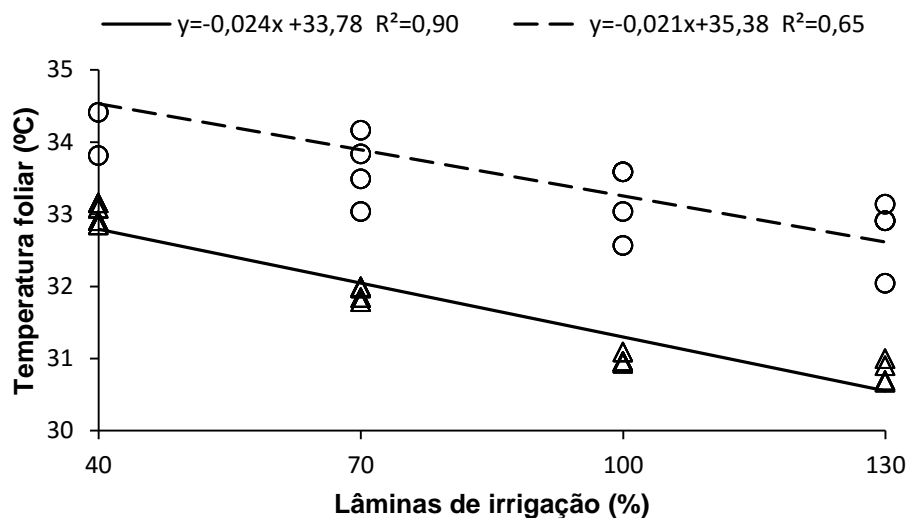


Figura 23 – Temperatura foliar medida com a câmera térmica (o) e com o canhão infravermelho (Δ) em função de diferentes lâminas de irrigação

Também foram estimados valores de temperatura foliar para as diferentes lâminas de irrigação utilizando a equação da reta da câmera térmica. Os valores calculados foram 32,7 °C, 33,3 °C, 33,9 °C e 34,5 °C para os tratamentos L130%, L100%, L70% e L40%, respectivamente. A partir desses valores é possível afirmar que nas condições do experimento, a temperatura foliar, medida com a câmera térmica, das plantas submetidas a lâminas deficitárias foi aproximadamente 1,0 °C maior que a temperatura foliar das plantas que receberam os tratamentos L130% e L100%.

Ramírez et al. (2015a) avaliando as folhas do tomateiro utilizando a câmera térmica, também verificaram que as plantas submetidas a estresse hídrico



apresentaram diferenças entre a temperaturas foliar e a temperatura do ar maiores do que as plantas sem estresse hídrico. Os valores máximos encontrados para as diferença de temperatura entre plantas com e sem estresse hídrico foi de 6,71 °C.

#### **4.6 CWSI x potencial de água na folha**

O CWSI observado e estimado, que resultaram de cálculos envolvendo dados de temperatura foliar e temperatura do ar, foi correlacionado com as medidas de potencial de água na folha do cafeeiro. Os modelos que tiveram os melhores ajustes nas duas situações foram o modelo de regressão linear simples e o modelo de regressão cúbica, como pode ser observado na Figura 24.

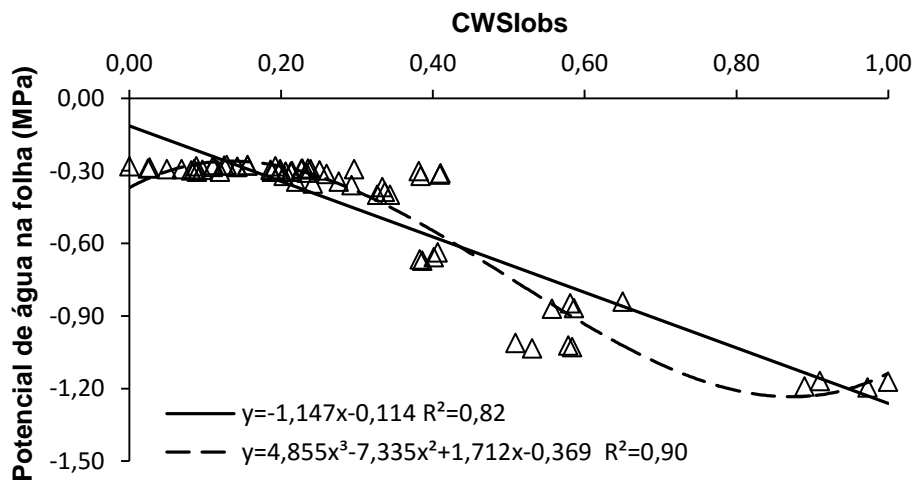
Na correlação envolvendo o CWSI observado obtido a partir de dados do canhão infravermelho (Figura 24A), o modelo de regressão linear simples apresentou um  $R^2$  de 0,82. Já no modelo de regressão cúbica o  $R^2$  foi de 0,90, mostrando que esse modelo representou de maneira mais precisa a relação entre o CWSI observado e o potencial de água na folha da cultura do café. No entanto o modelo de regressão cúbica demonstrou que a estimativa do potencial de água na folha a partir do CWSI observado pode apresentar valores incoerentes na faixa entre -0,50 MPa e -0,90 MPa, isso porque nesse intervalo o CWSI observado ficou em torno de 0,5 e praticamente não variou em função do potencial hídrico da planta.

Já na correlação envolvendo o CWSI estimado obtido a partir de dados do canhão infravermelho (Figura 24B), o modelo de regressão linear simples apresentou um  $R^2$  de 0,75. Já no modelo de regressão cúbica o  $R^2$  foi de 0,87, mostrando que, nesta situação, esse modelo também representou de maneira mais precisa a relação entre o CWSI estimado e o potencial de água na folha da cultura do café. Porém o modelo de regressão cúbica também demonstrou, nesta situação, que a estimativa do potencial de água na folha a partir do CWSI observado pode apresentar valores incoerentes na faixa entre -0,50 MPa e -0,90 MPa, isso porque nesse intervalo o CWSI estimado ficou em torno de 0,6 e não variou em função do potencial hídrico da planta.

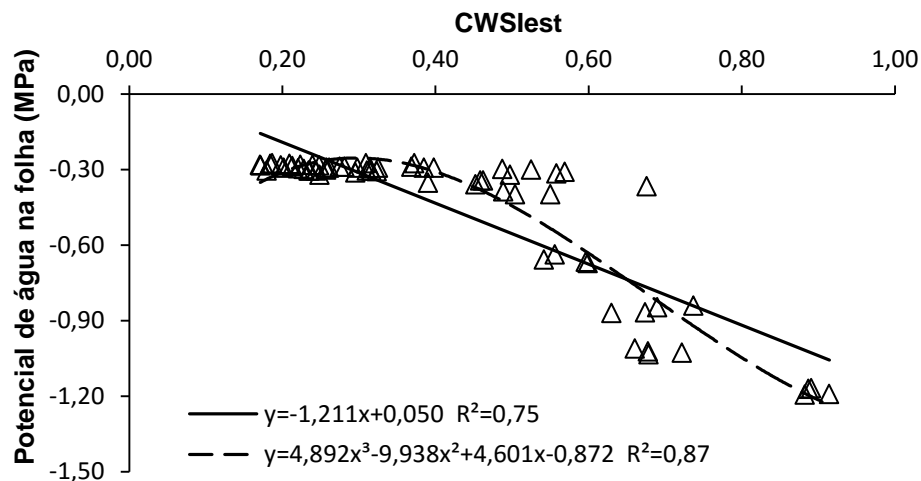
Os valores encontrados estão de acordo com Iaffe et al. (2003), que utilizando o canhão infravermelho, observaram que as diferenças entre a temperatura do dossel do cafeeiro e a temperatura do ar próximo ao meio-dia,

correlacionou-se bem com o potencial de água na folha medido no pré amanhecer, apresentando um coeficiente de determinação ( $R^2$ ) de 0,80.

Bellvert et al. (2014) também encontraram relações entre o CWSI e o potencial de água na folha da videira nos anos de 2009 e 2010 utilizando canhão infravermelho. O valor do coeficiente de determinação obtido por estes autores foi de 0,83.



(A)



(B)

Figura 24 – Potencial de água na folha em função do CWSI observado (A) e estimado (B) obtidos a partir dos dados de temperatura foliar do canhão infravermelho

Na Figura 25 observa-se o estudo da precisão e da acurácia dos modelos desenvolvidos. Nas quatro situações a correlação linear ( $R$ ) entre os potenciais

medidos e estimados apresentou valores próximos de 0,90, que representa uma correlação forte entre as duas variáveis.

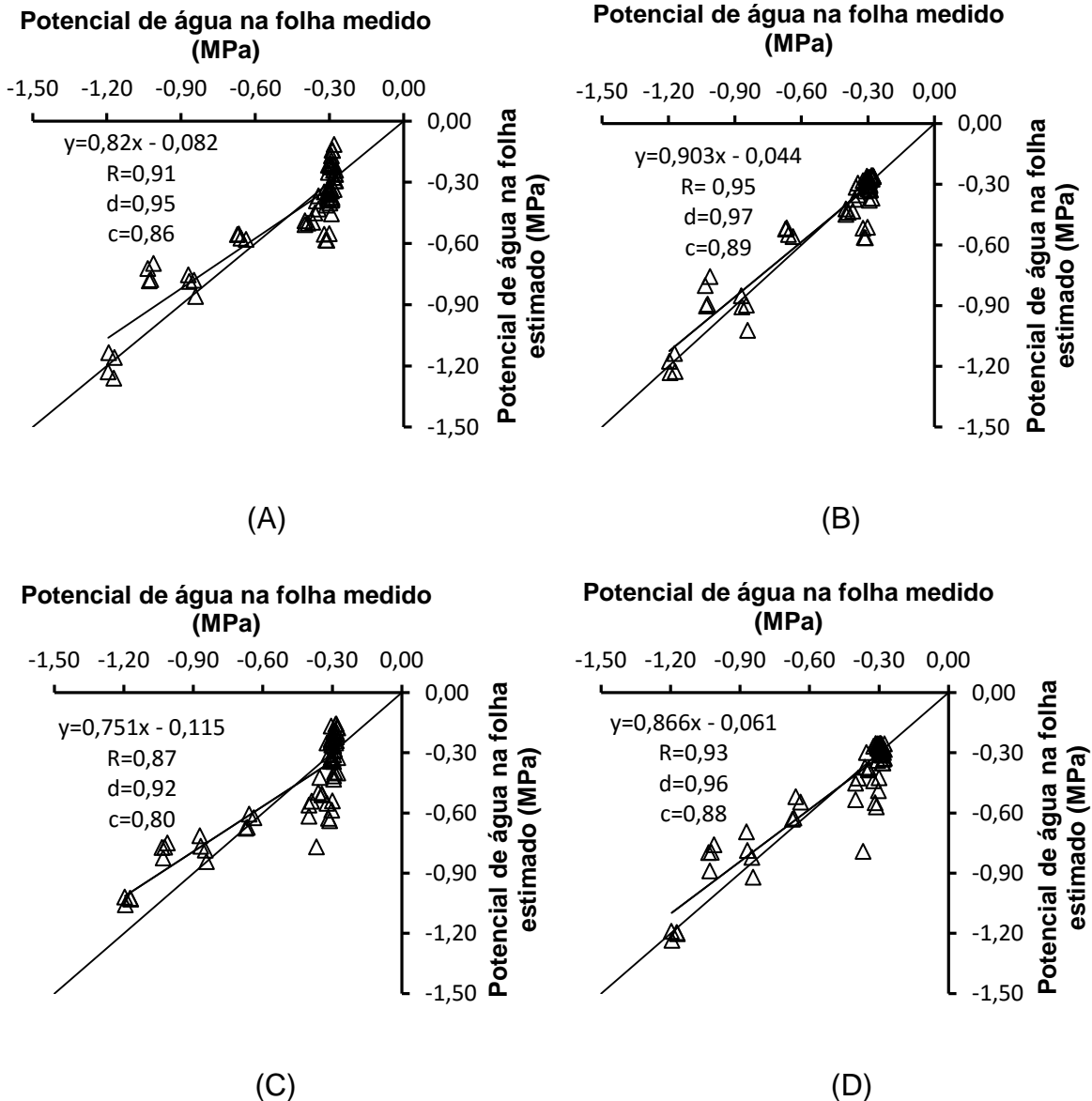


Figura 25 – Gráficos de correlação entre o potencial de água na folha medido (MPa) e o potencial de água na folha estimado através das equações definidas quando utilizou-se o canhão infravermelho. Gráficos da correlação citada utilizando a equação definida para o CWSI observado no modelo linear (A) e no modelo cúbico (B); Gráficos da correlação citada utilizando a equação definida para o CWSI estimado no modelo linear (C) e no modelo cúbico (D)

Os índices de concordância de Willmont (d) ficaram acima de 0,90, o que indica acurácia ou exatidão das quatro equações desenvolvidas. Quanto ao índice

de confiança ( $c$ ), que é dependente do  $R$  e do  $d$ , também apresentou valores que não ficaram abaixo de 0,80.

Os índices de precisão e acurácia não variaram significativamente em função do tipo de regressão (linear e cúbica) utilizados para o desenvolvimento dos modelos. Quanto ao CWSI observado e estimado, também não se verificou uma variação considerável dos índices em função do uso de um ou outro.

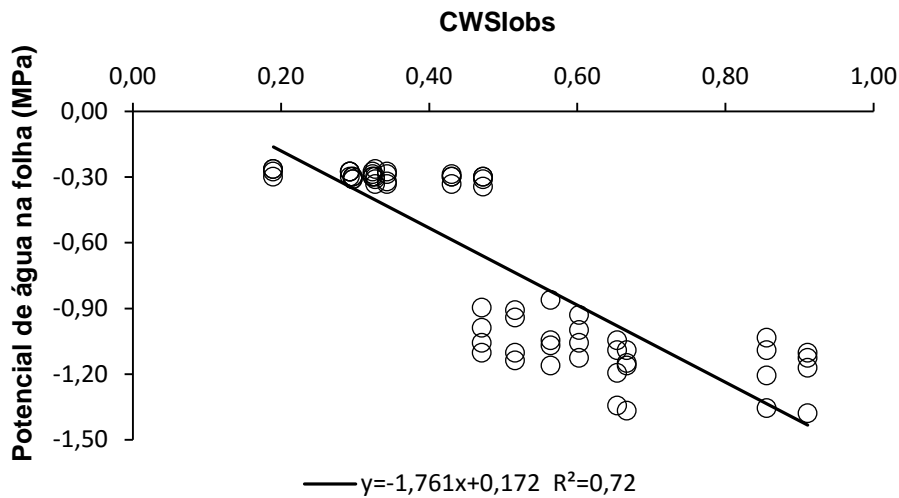
Ramírez et al. (2015a) estudando o CWSI na cultura do tomate também observaram que as diferenças entre o CWSI observado e o CWSI estimado não foram significativas, e concluíram, que ambos expressam o potencial hídrico da planta de forma semelhante.

Nas correlações envolvendo o CWSI observado e estimado obtidos a partir de dados da câmera térmica (Figura 26), o modelo de regressão linear simples foi o que apresentou o melhor ajuste resultando em um valor de  $R^2$  de 0,72 para a regressão onde se utilizou o CWSI observado e de 0,78 para a situação na qual se utilizou o CWSI estimado. Os valores de coeficiente de determinação encontrados nos modelos que utilizaram dados da câmera térmica foram menores quando comparados aos obtidos nos modelos que utilizaram dados do canhão infravermelho.

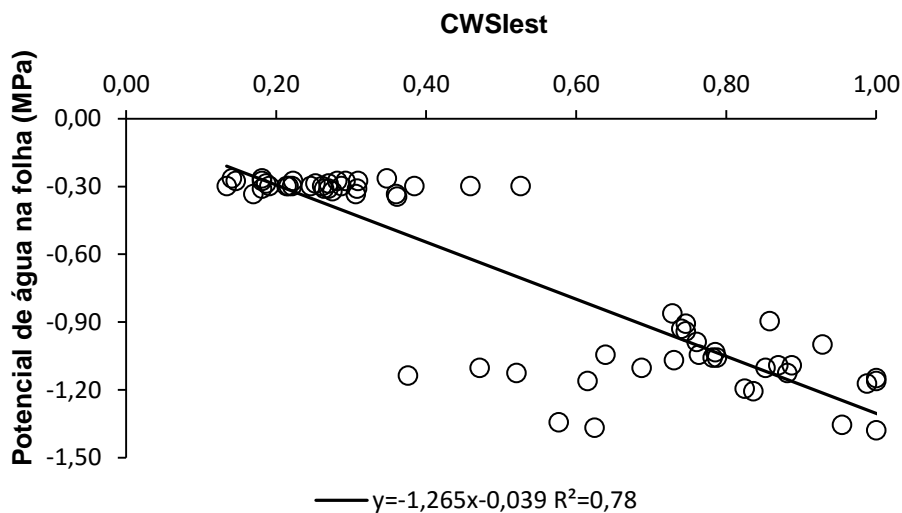
Berni et al. (2009) obtiveram valores de CWSI de oliveiras utilizando imagens térmicas e relacionaram esses dados com potenciais de água na folha medidos. Estes autores verificaram que as relações entre CWSI e potencial hídrico foliar apresentam coeficientes de correlação forte ( $R^2=0,82$ ), o que sugere que CWSI obtido a partir de imagens térmicas de alta resolução espacial podem ser usado como um bom indicador para mapear estresse hídrico em copas de culturas plantadas em renque.

Bellvert et al. (2014) encontraram um valor de  $R^2$  de 0,71 ao estudarem a relação entre o CWSI obtido a partir da câmera térmica de um veículo aéreo não tripulado (VANT) e o potencial hídrico foliar medido em videiras.

Cohen et al. (2014) obtiveram diferentes valores de  $R^2$  em função do uso do CWSI estimado e do CWSI teórico. Utilizando imagens térmicas para definir o CWSI da cultura do algodão e, a partir daí, relacioná-lo com o potencial hídrico da planta, os autores concluíram que a relação entre o CWSI estimado e o potencial de água na folha tem correlação forte com  $R^2$  de 0,7, porém quando essa relação considera o CWSI teórico a correlação encontrada não apresentou  $R^2$  elevado.



(A)



(B)

Figura 26 – Potencial de água na folha em função do CWSI observado (A) e estimado (B) obtidos a partir dos dados de temperatura foliar da câmera térmica

Na Figura 27 observa-se o estudo da precisão e da acurácia dos modelos desenvolvidos para as situações nas quais o CWSI foi calculado a partir de dados da câmera térmica. Os coeficientes de correlação de Pearson ficaram próximos de 0,85 nas duas situações, indicando correlações fortes entre as duas variáveis. A correlação entre dados de potencial de água na folha medidos e estimados com o modelo definido para CWSI observado (Figura 27A) apresentou um índice de concordância de 0,91 e um índice de confiança de 0,77, indicando que esse modelo é menos acurado (exato) do que os modelos definidos para o CWSI observado obtido através de dados do canhão infravermelho.

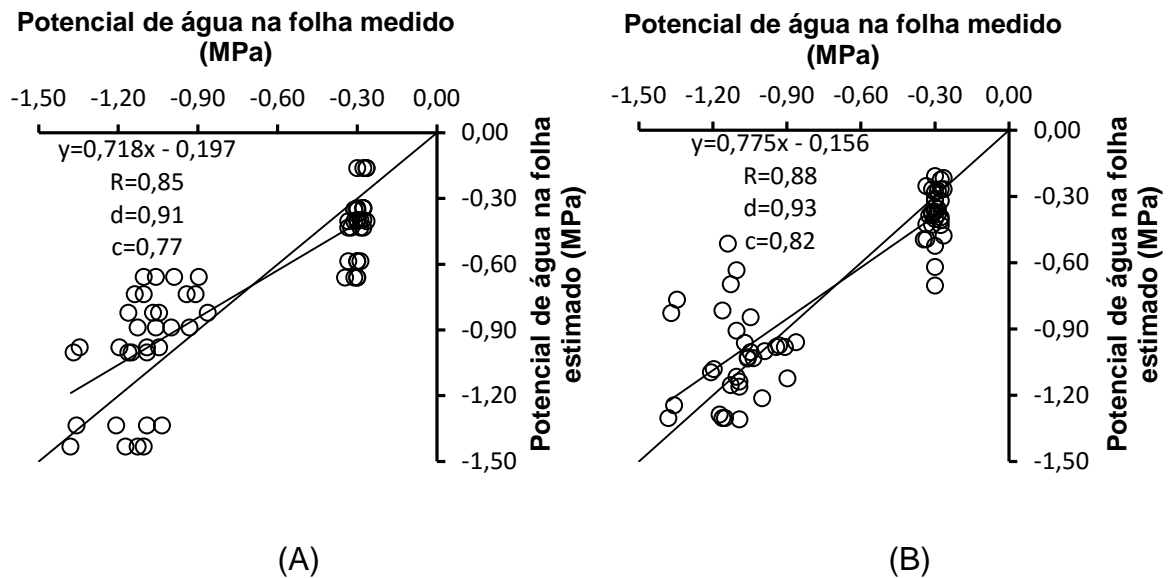


Figura 27 – Gráficos de correlação entre o potencial de água na folha medido (MPa) e o potencial de água na folha estimado através das equações definidas quando utilizou-se a câmera térmica. Gráfico da correlação citada utilizando a equação definida para o CWSI observado no modelo linear (A); Gráfico da correlação citada utilizando a equação definida para o CWSI estimado no modelo linear (B)

Já a correlação entre dados de potencial de água na folha medidos e estimados com o modelo definido para CWSI estimado (Figura 27B) apresentou um índice de concordância de 0,93 e um índice de confiança de 0,82, indicando que esse modelo tem acurácia semelhante à dos modelos definidos para o CWSI estimado obtido através de dados do canhão infravermelho.

Cohen et al. (2014) também apresentaram um estudo da precisão e da acurácia dos modelos desenvolvidos por eles para estimar o potencial de água na folha do algodão através de imagens térmicas. Neste estudo eles observaram que os valores mensurados tiveram forte correlação com os valores estimados pelos modelos em questão. Os valores dos coeficientes de Pearson encontrados por estes autores ficaram em média próximos a 0,90, reforçando a forte relação entre as duas variáveis analisadas.



## 5 CONCLUSÕES

Considerando as condições em que o presente estudo foi desenvolvido e com base nos resultados obtidos, foi possível chegar às seguintes conclusões:

1 – O modelo linear, que é menos complexo que o modelo cúbico, apresentou um bom ajuste para as relações entre CWSI e potencial de água na folha, alcançando índices elevados de correlação, acurácia e precisão, sendo assim o mais recomendado para o uso prático;

2 – O *CWSI observado*, que pode ser obtido de maneira mais simples que o *CWSI estimado*, apresentou correlações significativas com o potencial de água na folha, sendo assim o mais indicado para aplicação em condições de campo;

3 – O CWSI é um bom indicador do estado hídrico da cultura do cafeeiro e pode substituir medidas do potencial de água na folha realizadas na câmara de Scholander, de maneira tal, que com base em uma imagem aérea termal da área plantada, seja possível observar a variabilidade espacial do potencial de água na copa do cafeeiro.





## REFERÊNCIAS

ALLEN, R.G.; PEREIRA, L.S.; RAES, D.; SMITH, M. **Crop evapotranspiration (guidelines for computing crop requirements)**. Rome: FAO, 1998. 300 p. (Irrigation and Drainage Paper, 56).

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DE CAFÉ. **História do café**. Disponível em: <<http://www.abic.com.br/publique/cgi/cgilua.exe/sys/start.htm?sid=38>>. Acesso em: 20 abr. 2016.

BECKMANN, M.Z.; DUARTE, G.R.B.; PAULA, V.A. de; MENDEZ, M.E.G.; PEIL, R.M.N. Radiação solar em ambiente protegido cultivado com tomateiro nas estações verão-outono do Rio Grande do Sul. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 36, n. 1, p. 86–92, 2006.

BELLVERT, J.; ZARCO-TEJADA, P.J.; GIRONA, J.; FERERES, E. Mapping crop water stress index in a “Pinot-noir” vineyard: comparing ground measurements with thermal remote sensing imagery from an unmanned aerial vehicle. **Precision Agriculture**, Dordrecht, v. 15, n. 4, p. 361–376, 2014.

BERNARDES, M.S.; CASTRO, P.R.C.; MARTINS, A.N. **Formação da copa e resistência de árvores ao vento: modelo de seringueira**. Piracicaba: FEALQ, 1996. 88 p.

BERNI, J.A.J.; ZARCO-TEJADA, P.J.; SEPULCRE-CANTÓ, G.; FERERES, E.; VILLALOBOS, F. Mapping canopy conductance and CWSI in olive orchards using high resolution thermal remote sensing imagery. **Remote Sensing of Environment**, New York, v. 113, n. 11, p. 2380–2388, 2009.

BRASIL. Ministério do Desenvolvimento, Indústria e Comércio Exterior. **Balança comercial brasileira: dados consolidados**. Disponível em: <<http://www.desenvolvimento.gov.br/sitio/interna/>>. Acesso em: 20 abr. 2016.

CAMARGO, A.P. de; CAMARGO, M.B.P. de. Definição e esquematização das fases fenológicas do cafeeiro arábica nas condições tropicais do Brasil. **Bragantia**, Campinas, v. 60, n. 1, p. 65–68, 2001.

CAMARGO, A.P. de; SENTELHAS, P.C. Avaliação do desempenho de diferentes métodos de estimativa da evapotranspiração potencial no Estado de São Paulo, Brasil. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Sete Lagoas, v. 5, n. 1, p. 89–97, 1997.

CAMPBELL, G.S.; NORMAN, J.M. **An introduction to environmental biophysics**. New York: Springer-Verlag, 1998. 286 p.

CANNELL, M.G.R. Crop physiological aspects of coffee bean yield: a review. **Kenya Coffee**, Nairobi, v. 41, p. 245–253, 1976.

- CHAVES, S.W.P. **Efeito da alta frequência de irrigação e do “ mulching ” plástico na produção da pimenta “ tabasco ” fertirrigada por gotejamento.** 2008. 153 p. Tese (Doutorado em Irrigação e Drenagem) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2008.
- COHEN, Y.; ALCHANATIS, V.; SELA, E.; SARANGA, Y.; COHEN, S.; MERON, M.; BOSAK, A.; TSIPRIS, J.; OSTROVSKY, V.; OROLOV, V.; LEVI, A.; BRIKMAN, R. Crop water status estimation using thermography: multi-year model development using ground-based thermal images. **Precision Agriculture**, Dordrecht, v. 16, p. 311–329, 2014.
- DAMATTA, F.M.; RAMALHO, J.D.C. Impacts of drought and temperature stress on coffee physiology and production: A review. **Brazilian Journal of Plant Physiology**, Campinas, v. 18, n. 1, p. 55–81, 2006.
- DAVIS, A.P.; GOVAERTS, R.; BRIDSON, D.M.; STOFFELEN, P. An annotated taxonomic of the genus *coffea* (Rubiaceae). **Botanical Journal of the Linnean Society**, London, v. 152, p. 465–512, 2006.
- FERNANDES, A.L.; PARTELLI, F.L.; BONOMO, R.; GOLYNSKI, A. A moderna cafeicultura dos cerrados brasileiros. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, Goiânia, v. 42, p. 231–240, 2012.
- FERNANDES, E.J. Determinação do índice de estresse hídrico em cultura do feijoeiro com termômetro de infravermelho. **Irriga**, Botucatu, v. 15, n. 3, p. 248–257, 2010.
- FERREIRA, D.F. SISVAR: um programa para análises e ensino de estatística. **Revista symposium**, Lavras, v. 6, n. 2, p. 36–41, 2008.
- FNP CONSULTORIA E COMÉRCIO. **AGRIANUAL 2016**: anuário da agricultura brasileira. São Paulo, 2016. 521 p.
- GADE, R.; MOESLUND, T.B. Thermal cameras and applications: a survey. **Machine Vision and Applications**, Berlin, v. 25, n. 1, p. 245–262, 2014.
- GARCIA, A.; BOUHID ANDRE, R.G.; FERREIRA, M.I.; PAÇO, T. de. Comparação de modelos para avaliação do estresse hídrico em cultura de nectarinas. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Sete Lagoas, v. 8, n. 1, p. 43–48, 2000.
- GUTIERREZ, M.V.; MEINZER, F.C. Estimating water use and irrigation requirements of coffee in Hawaii. **Journal of the American Society for Horticultural Science**, Alexandria, v. 119, n. 3, p. 652–675, 1994.
- IAFFE, A.; PINTO, H.S.; ZULLO JR, J.; ASSAD, E.D.; OLIVER, A.; CORAL, G. Aplicação da termometria a infravermelho como indicativo da recuperação do potencial hídrico de cafeeiros irrigados e não irrigados durante a floração, em Garça-SP. In: III SIMPÓSIO DE PESQUISA DOS CAFÉS DO BRASIL, 3., 2003, Porto Seguro. **Anais...**Porto Seguro: SBICafé, 2003. p. 54.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Censo agropecuário 2006**: Brasil, grandes regiões e unidades da federação. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/economia/agropecuaria/censoagro/>>. Acesso em: 20 abr. 2016.

JACKSON, R.D. Canopy temperature and crop water stress. In: HILLEL, D. **Advances in irrigation**. New York: Academic Press, 1982. p. 43–85.

JACKSON, R.D.; KUSTAS, W.P.; CHOUDHURY, B.J. A reexamination of the crop water stress index. **Irrigation Science**, New York, v. 9, n. 4, p. 309–317, 1988.

JACKSON, R.D.; IDSO, S.B.; REGINATOR, R.J.; PINTER, P.J. Canopy temperature as a crop water stress indicator. **Water Resources Research**, Washington, v. 17, n. 4, p. 1133–1138, 1981.

KIM, K.Y.; QUEIROZ VOLTAN, R.B.; PARADELA FILHO, O.; CARELLI, M.L.C.; FAHL, J.I.; LÓPEZ DE LEÓN, E.E.; RODRÍGUEZ, E. Clima e fenologia. In: INSTITUTO BRASILEIRO DO CAFÉ. **Cultura de café no Brasil**: manual de recomendações. Rio de Janeiro, 1986.

KIRKHAM, M.B. **Principles of soil and water plant relations**. San Diego: Academic Press, 2014. 500 p.

KOBAYASHI, E.S.; SAKAI, E.; SILVA, E.A. da; ARRUDA, F.B.; SILVEIRA, J.M. de C.; SOUZA, P.S. de; PIRES, R.C. de M. Variação sazonal do potencial da água nas folhas de cafeeiro em Mococa-SP. **Bragantia**, Campinas, v. 67, n. 2, p. 421–428, 2008.

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

MAGIOTTO, S.R. **Estimativa da evapotranspiração de referência pelo uso da termometria ao infravermelho**. 1996. 71 p. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1996.

MALAVOLTA, E.; FERNANDES, D.R.; CASALE, H.; ROMERO, J.P. Seja o doutor do seu cafezal. **Informações Agrônomicas**, Piracicaba, v. 2, n. 64, p. 37, dez. 1993.

MANTOVANI, E.C.; SOARES, A.R. **Irrigação do cafeeiro: informações técnicas e coletâneas de trabalho**. Viçosa: Associação dos Engenheiros Agrícolas de Minas Gerais; UFV, DEA, 2003. 260 p.

MARIN, F.R. **Evapotranspiração e transpiração máxima em cafezal adensado**. 2003. 118 p. Tese (Doutorado em Física do Ambiente Agrícola) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2003.

MARIN, F.R.; SANTIAGO, A.V.; RIGHI, E.Z.; SENTELHAS, P.C.; ANGELOCCI, L.R.; MAGGIOTTO, S.R.; PEZZOPANE, J.R.M. Solar radiation interception and its relation with transpiration in different coffee canopy layers. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Sete Lagoas, v. 11, n. 1, p. 1–6, 2003.

MATIELLO, J.B. **O café: do cultivo ao consumo**. São Paulo: Globo, 1991. 320 p.

MATIELLO, J.B.; SANTINATO, R.; GARCIA, A.W.R.; ALMEIDA, S.R.; FERNANDES, D.R. **Cultura do café no brasil: novo manual de recomendações**. Rio de Janeiro: Fundação Procafé, 2002. 387 p.

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

MERON, M.; SPRINTSIN, M.; TSIPRIS, J.; ALCHANATIS, V.; COHEN, Y. Foliage temperature extraction from thermal imagery for crop water stress determination. **Precision Agriculture**, Dordrecht, v. 14, n. 5, p. 467–477, 2013.

MOLLER, M.; ALCHANATIS, V.; COHEN, Y.; MERON, M.; TSIPRIS, J.; NAOR, A.; OSTROVSKY, V.; SPRINTSIN, M.; COHEN, S. Use of thermal and visible imagery for estimating crop water status of irrigated grapevine. **Journal of Experimental Botany**, Oxford, v. 58, n. 4, p. 827–838, 2007.

NOGUEIRA, R.J.M.C.; MORARS, J.A.P.V.; BURITY, A.; BEZERRA NETO, E.E. Alterações na resistência à difusão de vapor das folhas e relações hídricas em aceroleiras submetidas a déficit de água. **Revista Brasileira De Fisiologia Vegetal**, Londrina, v. 13, p. 75–87, 2001.

NUNES, A.S. **Termometria por infravermelho como indicador de estresse hídrico em plantas de feijão-caupi**. 2012. 61 p. Tese (Doutorado em Produção Vegetal) - Universidade Federal da Grande Dourados, Dourados, 2012.

OLIVEIRA, L.F.C. de; OLIVEIRA, R.Z.; CASTRO, T.A.P. Comportamento fisiológico de cafeeiros submetidos a diferentes disponibilidades de água no solo. **Bioscience Journal**, Uberlândia, v. 25, n. 3, p. 83–91, 2009.

PILAU, F.G.; ANGELOCCI, L.R. Balanço de radiação de copas de cafeeiros em renques e suas relações com radiação solar global e saldo de radiação de gramado. **Bragantia**, Campinas, v. 73, n. 3, p. 335–344, 2014.

RAMÍREZ, A.J.F.; COELHO, R.D.; PIZANI, M.A.M.; SILVA, C.J. da. Determinação do índice de estresse hídrico em tomateiros cereja (*Lycopersicum solanum* var. cerasiforme.) com câmara infravermelha. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, Fortaleza, v. 9, n. 4, p. 218–224, 2015a.

RAMÍREZ, A.J.F.; PIZANI, M.A.M.; SILVA, C.J. da; COELHO, R.D.; DUARTE, S.N.; TREJO, F.J.P. Determinação do índice de estresse hídrico para a cultura do tomate cereja (*Lycopersicon solanum* var. cerasiforme.) utilizando termômetro infravermelho. In: INOVAGRI INTERNATIONAL MEETING, 3., 2015, Fortaleza. **Anais...**Fortaleza: Inovagri, 2015b. p. 238-247.

RENA, A.B.; MAESTRI, M. **Ecofisiologia da produção agrícola**. Piracicaba: Associação Brasileira para Pesquisa da Potassa e do Fosfato, 1987. 249 p.

\_\_\_\_\_. Relações hídricas no cafeeiro. **ITEM: Irrigação e Tecnologia Moderna**, Brasília, v. 48, p. 34–41, 2000.

RIGHI, C.A.; LUNZ, A.M.P.; BERNARDES, M.S.; PEREIRA, C.R.; TERAMOTO, E.R.; FAVARIN, J.L. Coffee water use in agroforestry system with rubber trees. **Revista Arvore**, Viçosa, v. 32, n. 5, p. 781–792, 2008.

RONCHI, C.P.; ARAÚJO, F.C. de; ALMEIDA, W.L. de; SILVA, M.A.A. da; MAGALHÃES, C.E.O.; OLIVEIRA, L.B. de; DRUMOND, L.C.D. Respostas ecofisiológicas de cafeeiros submetidos ao deficit hídrico para concentração da florada no cerrado de Minas Gerais. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 50, n. 1, p. 24–32, jan. 2015.

SALISBURY, F.B.; ROSS, C.W. **Plant physiology**. Berkeley: Wadsworth Pub, 1991. 682 p.

SANTINATO, R.; FERREIRA, R.T. **Tecnologia para altas produtividades: formação da lavoura cafeeira (0 aos 30 meses)**. Araxá: CAPAL, 2011. 31 p.

SANTINATO, R.; FERNADES, A.L.T.; FERNANDES, D.R. **Irrigação na cultura do café**. Uberaba: O Lutador, 2008. 476 p.

SCHOFFEL, E.R.; VOLPE, C.A. Eficiência de conversão da radiação fotossinteticamente ativa interceptada pela soja para a produção de fitomassa. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Sete Lagoas, v. 9, p. 241–249, 2001.

SCHOLANDER, P.F.; HAMMEL, H.T.; HEMMINGSEN, E.A.; BRADSTREET, E.D. Hydrostatic pressure and osmotic potential in leaves of mangroves and some other plants. **Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America**, Washington, v. 52, n. 1, p. 119–125, 1964.

SEPASKHAH, A.R.; KASHEFIPOUR, S.M. Relationships between leaf water potential, CWSI, yield and fruit quality of sweet lime under drip irrigation. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 25, n. 1, p. 13–21, 1994.

SILVA, E.A.; BRUNINI, O.; SAKAI, E.; PIRES, R.C.M.; GALLO, P.B.; PAULO, E.M. Efeitos de variáveis edafoclimáticas no florescimento e na formação de frutos de *Coffea arabica* em distintas regiões macroclimáticas do estado de São Paulo. **Anais** In: SIMPÓSIO DE PESQUISA DOS CAFÉS DO BRASIL, 2., 2001, Vitória. **Anais...** Vitória: SBICafé, 2001. p. 125–130.

SOARES, A.R.; MANTOVANI, E.C.; RENA, A.B.; SOARES, A.A. Irrigação e fisiologia da floração em cafeeiros adultos na região da zona da mata de Minas Gerais. **Acta Scientiarum Agronomy**, Maringá, v. 27, n. 1, p. 117–125, 2005.

TARDIEU, F.; SIMONNEAU, T. Variability among species of stomatal control under fluctuating soil water status and evaporative demand: modelling isohydric and anisohydric behaviours. **Journal of Experimental Botany**, Oxford, v. 49, Special issue, p. 419–432, Mar. 1998.

TESTI, L.; GOLDHAMER, D.A.; INIESTA, F.; SALINAS, M. Crop water stress index is a sensitive water stress indicator in pistachio trees. **Irrigation Science**, New York, v. 26, n. 5, p. 395–405, 2008.

TRENTIN, R. **Estimativa de um índice de estresse hídrico para a cultura da cana-de-açúcar com base na temperatura foliar**. 2010. 61 p. Dissertação (M.S. em Meteorologia Agrícola) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2010.

VAN GENUCHTEN, M.T. A closed form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 44, p. 892–898, 1980.

WANG, L.; QIU, G.Y.; ZHANG, X.; CHEN, S. Application of a new method to evaluate crop water stress index. **Irrigation Science**, New York, v. 24, n. 1, p. 49–54, 2005.

WILLMOTT, C.J. Some comments on the evaluation of model performance. **Bulletin of the American Meteorological Society**, Boston, v. 63, n. 11, p. 1309–1313, 1982.

ZARCO-TEJADA, P.J.; GONZÁLEZ-DUGO, V.; BERNI, J.A.J. Fluorescence, temperature and narrow-band indices acquired from a UAV platform for water stress detection using a micro-hyperspectral imager and a thermal camera. **Remote Sensing of Environment**, New York, v. 117, p. 322–337, 2012.

## APÊNDICES





Apêndice A – Imagem do software desenvolvido pelo INCT-EI para controle individual das válvulas solenóides

The screenshot displays the 'Hainform' software interface. The main window is titled 'Hainform' and contains a table with the following data:

Módulo/Canal	ID do atuador	Estado	Tempo restante de operação	Controle manual
16-01	1	Desligado	00:44:00	Ligar
16-23	2	Desligado	00:33:00	Ligar
16-22	3	Desligado	00:33:00	Ligar
16-21	4	Desligado	00:33:00	Ligar
16-20	5	Desligado	00:33:00	Ligar
16-19	6	Desligado	00:33:00	Ligar
16-18	7	Desligado	00:33:00	Ligar
16-17	8	Desligado	00:33:00	Ligar
16-16	9	Desligado	00:33:00	Ligar
16-07	10	Desligado	00:33:00	Ligar
16-06	11	Desligado	00:43:00	Ligar
16-05	12	Desligado	00:33:00	Ligar
16-04	13	Desligado	00:13:00	Ligar
16-03	14	Desligado	00:23:00	Ligar
16-02	15	Desligado	00:33:00	Ligar
16-30	16	Desligado	00:33:00	Ligar
16-29	17	Desligado	00:33:00	Ligar
16-28	18	Desligado	00:33:00	Ligar
16-27	19	Desligado	00:33:00	Ligar
16-26	20	Desligado	00:33:00	Ligar

The right-hand panel contains two sections:

- Irrigação manual:** Includes a text box for 'Arquivo CSV contendo os tempos de irrigação' with a file selection button, and three buttons: 'Iniciar irrigação', 'Interromper', and 'Cancelar / Limpar'.
- Download de dados de operação de atuadores:** Includes two date/time pickers for 'Data e hora inicial' and 'Data e hora final', a text box for 'Arquivo para armazenar o resultado da consulta', and a 'Download' button.

The status bar at the bottom of the window shows the date '01/07/2015' and the time '10:45:51'.

## Apêndice B – Gráfico da calibração do canhão infravermelho utilizado

