

SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS E MEDIÇÃO DE FLUXO DE  
SEIVA PARA ESTIMATIVA DE TRANSPIRAÇÃO EM PLANTAS

**JEAN KARLOS BARROS GALOTE**

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO NORTE FLUMINENSE  
DARCY RIBEIRO

CAMPOS DOS GOYTACAZES - RJ  
Novembro - 2021

# SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS E MEDIÇÃO DE FLUXO DE SEIVA PARA ESTIMATIVA DE TRANSPIRAÇÃO EM PLANTAS

**JEAN KARLOS BARROS GALOTE**

“Tese apresentada ao Centro de Ciências e Tecnologias Agropecuárias da Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, como parte das exigências para obtenção do título de Doutor em Produção Vegetal”

Orientador: DSc. Prof. Elias Fernandes de Sousa

CAMPOS DOS GOYTACAZES - RJ

Novembro - 2021

### FICHA CATALOGRÁFICA

UENF - Bibliotecas

Elaborada com os dados fornecidos pelo autor.

G178

Galote, Jean Karlos Barros.

SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS E MEDIÇÃO DE FLUXO DE SEIVA PARA ESTIMATIVA DE TRANSPIRAÇÃO EM PLANTAS / Jean Karlos Barros Galote. - Campos dos Goytacazes, RJ, 2021.

107 f. : il.

Inclui bibliografia.

Tese (Doutorado em Produção Vegetal) - Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Centro de Ciências e Tecnologias Agropecuárias, 2021.

Orientador: Elias Fernandes de Sousa.

1. Agricultura irrigada. 2. Automação. 3. Sensor. 4. *Coffea canephora*. 5. *Carica papaya*. I. Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro. II. Título.

CDD - 630

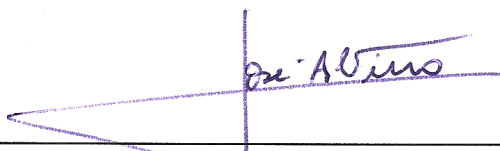
SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS E MEDIÇÃO DE FLUXO DE  
SEIVA PARA ESTIMATIVA DE TRANSPIRAÇÃO EM PLANTAS

JEAN KARLOS BARROS GALOTE

“Tese apresentada ao Centro de Ciências e  
Tecnologias Agropecuárias da Universidade  
Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro,  
como parte das exigências para obtenção do  
título de Doutor em Produção Vegetal”

Aprovado em 30 de novembro de 2021.

Comissão Examinadora



---

Pesq. José Altino Machado Filho (D.Sc., Produção Vegetal) – INCAPER  
(coorientador)



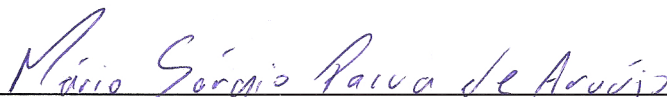
---

Prof. Claudinei Martins Guimarães (D.Sc., Engenharia Agrícola)



---

Prof. Ricardo Ferreira Garcia (D.Sc., Engenharia Agrícola) – UENF



---

Pesq. Mário Sérgio Paiva de Araújo (D.Sc., Produção Vegetal)



---

Prof. Elias Fernandes de Sousa (D.Sc., Engenharia Agrícola) – UENF  
(Orientador)

Dedico

A Deus,

Aos meus Pais, Vilma Isabel de Barros Garcia Galote e Aroldo Henrique Galote, ao meu irmão Alan Jones Baltazar Galote e ao meu sobrinho Emanuel Mendes Garcia!

## **AGRADECIMENTOS**

Aos meus pais, pelo amor e auxílio nos momentos de necessidades;  
minha família; ao meu irmão e ao meu sobrinho Emanuel pela compreensão nos  
momentos de ausência;

Aos amigos que estiveram ao meu lado no decorrer das atividades  
acadêmicas, que sempre foram uma fonte de conhecimento;

Aos professores que, com muita paciência, ou não, foram capazes de  
transmitir seus conhecimentos possibilitando o meu aprendizado;

À Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro (UENF) pela  
oportunidade de cursar a Pós-Graduação em Produção Vegetal;

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio de Janeiro  
(FAPERJ) pela concessão da bolsa de fomento;

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior  
(CAPES) – código de financiamento (001) pela concessão da bolsa de fomento;

Ao Instituto Capixaba de Pesquisa, Assistência Técnica e Extensão Rural  
(INCAPER) pela oportunidade de desenvolvimento da pesquisa e ao corpo  
técnico pela acolhida;

À Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA) pela bolsa  
de fomento;

Ao meu orientador que, com muita paciência me conduziu no decorrer da vida acadêmica nesta Pós-Graduação.

## SUMÁRIO

<b>RESUMO .....</b>	<b>11</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>13</b>
<b>1 INTRODUÇÃO.....</b>	<b>15</b>
<b>2 REVISÃO DE LITERATURA .....</b>	<b>18</b>
2.1 SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS (DAS) .....	18
2.1.1 Microcontroladores.....	19
2.1.2 Shields .....	19
2.1.3 Gravadores de dados em cartão de memória.....	20
2.1.4 Temporizadores .....	20
2.1.5 Sensores .....	20
2.2 FLUXO DE SEIVA.....	21
2.2.1 Método de Pulso de Calor .....	21
2.2.2 Método de Balanço de calor (HBSF).....	23
2.2.3 Método de Dissipação térmica (TDP) .....	26
2.2.4 Método da Análise Harmônica do Pulso de Calor.....	27
2.3 EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA.....	29
2.4 O MAMOEIRO .....	30



2.5 O CAFEEIRO .....	30
2.6.1 Os clones ES8161 Goytacá (14/86) e 109A .....	31
<b>3 TRABALHOS.....</b>	<b>34</b>
<b>3.1 DESENVOLVIMENTO DE SISTEMA DE MEDIÇÃO DE FLUXO DE SEIVA PELO MÉTODO DE ANÁLISE HARMÔNICA DO PULSO DE CALOR .....</b>	<b>34</b>
3.1.1 RESUMO .....	34
<b>DEVELOPMENT OF A SAPFLOW FLUX MEASUREMENT SYSTEM BY THE HEAT PULSE HARMONIC ANALYSIS METHOD .....</b>	<b>36</b>
3.1.2 ABSTRACT .....	36
<b>3.1.3 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>37</b>
<b>3.1.4 MATERIAL E MÉTODOS .....</b>	<b>39</b>
3.1.4.1 DESENVOLVIMENTO DOS EQUIPAMENTOS.....	39
3.1.4.1.1 Unidade armazenadora de dados de fluxo de seiva (UAD) .....	40
3.1.4.1.2 Unidade para medição de fluxo de seiva (USF).....	42
3.1.4.1.3 Sensores de fluxo de seiva .....	44
3.1.4.2 LOCAL DE REALIZAÇÃO DO TESTE DO SISTEMA COLETOR DE DADOS .....	45
3.1.4.3 MEDIÇÃO DOS ELEMENTOS METEOROLÓGICOS .....	46
3.1.4.4 ESTIMATIVA DA VELOCIDADE DO FLUXO DE SEIVA .....	47
3.1.4.5 A CULTURA DO MAMÃO .....	48
3.1.4.6 DELINEAMENTO EXPERIMENTAL .....	48
3.1.4.7 O MANEJO DE IRRIGAÇÃO .....	49
3.1.4.8 ANÁLISE ESTATÍSTICA .....	50
<b>3.1.5 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....</b>	<b>52</b>
<b>3.1.6 CONCLUSÃO .....</b>	<b>60</b>
<b>3.1.7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>61</b>
<b>3.2 DESENVOLVIMENTO DE SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS DE FLUXO DE SEIVA, PELO MÉTODO TÉRMICO .....</b>	<b>67</b>
3.2.1 RESUMO .....	67

3.2.2 ABSTRACT .....	69
<b>3.2.3 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>70</b>
<b>3.2.4 MATERIAL E MÉTODOS .....</b>	<b>72</b>
3.2.4.1 CONSTRUÇÃO DOS EQUIPAMENTOS .....	72
<b>3.2.4.1.1 Sistema de aquisição de dados de fluxo de seiva, pelo método do térmico (DASSFT) .....</b>	<b>72</b>
<b>3.2.4.1.2 Princípio de funcionamento .....</b>	<b>74</b>
3.2.4.2 EXPERIMENTO EM CAMPO.....	75
3.2.4.3 CONDIÇÕES CLIMÁTICAS .....	75
3.2.4.4 DELINEAMENTO EXPERIMENTAL .....	76
3.2.4.5 PLANTIO, MANEJO DE IRRIGAÇÃO E DA CULTURA.....	76
3.2.4.6 ESTIMATIVA DO FLUXO DE SEIVA .....	78
<b>3.2.4.6.1 Estimativa do fluxo de seiva .....</b>	<b>78</b>
<b>3.2.4.6.2 Estimativa do fluxo de seiva por meio de sondas do tipo TDP (Granier).....</b>	<b>79</b>
3.2.4.7 ANÁLISES ESTATÍSTICAS .....	82
<b>3.2.5 RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>83</b>
<b>3.2.6 CONCLUSÃO .....</b>	<b>90</b>
<b>3.2.7 AGRADECIMENTOS.....</b>	<b>90</b>
<b>3.2.8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>91</b>
<b>4 RESUMOS E CONCLUSÕES .....</b>	<b>95</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>96</b>
<b>APÊNDICES .....</b>	<b>101</b>

## LISTA DE FIGURAS

- Figura 1. Exemplo de conjunto de sondas para medição de fluxo de seiva, pelo método de pulso de calor. Sondas (A) e (C) com elemento sensor de temperatura e sonda (B) com resistência elétrica para aplicação de calor. ....22
- Figura 2. Representação esquemática dos movimentos do fluxo de calor, em um dado segmento de caule, por meio dos componentes aquecedores.  $Q_{pin}$  = Potência aplicada ao aquecedor, W;  $Q_r$  = Perda de calor por condução na direção axial, W;  $Q_{flow}$  = Energia perdida por convecção no fluxo de seiva, W;  $Q_v$  = Perda de calor por condução vertical, W;  $Q_s$  = Energia armazenada pelo caule, W;  $\Delta T_{sap}$  = Variação de temperatura da seiva a cima e abaixo do aquecedor, °C;  $T_a$  = Temperatura da seiva a cima do aquecedor, °C e  $T_b$  = Temperatura da seiva abaixo do aquecedor, °C. ....25
- Figura 3. Exemplo de sondas do tipo TDP, modelo TDP 30 (Dynamax), termopares (A) e (C), aquecedor de fio de Constantan (B). ....26
- Figura 4. Protótipo da Unidade Armazenadora de Dados (UAD) com descrição dos componentes e módulos. ....40
- Figura 5. Unidade para medição de fluxo de seiva (USF), descrição de componente e módulos. Esta unidade gerenciava sensores de fluxo de seiva. ....42
- Figura 6. Protótipo de sensor de fluxo de seiva, disposição e descrição dos componentes. ....44
- Figura 7. (A) Unidade de medição de fluxo de seiva instalada no caule do mamoeiro e (B) Sensor de fluxo de seiva, do tipo pinça. ....45
- Figura 8. Valores de dados de tempo para as variáveis: saldo de radiação ( $R_n$ ), temperatura do ar (Temp.) e umidade relativa do ar (UR) em condições

de ambiente externo da casa de vegetação e interno da casa de vegetação.....	53
Figura 9. Valores horários para as variáveis: déficit de pressão de vapor d'água ( $DPV$ ) evapotranspiração de referência ( $ET_0$ ) para condições de ambiente externo e interno da casa de vegetação e valores de transpiração foliar de mamoeiro para as condições internas na casa de vegetação.....	55
Figura 10. Relações entre: (A) valores de déficit de pressão de vapor ( $DPV$ ), (B) valores de evapotranspiração de referência ( $ET_0$ ), para condições de ambiente externo e interno da casa de vegetação.....	56
Figura 11. Modelo de ajuste e seus respectivos coeficientes de determinação ( $R^2$ ), de correlação ( $r$ ), índices de Wilmott ( $d$ ) e confiança e desempenho de Camargo e Sentelhas ( $cs$ ), comparando: (A) taxa de transpiração foliar ( $T_F$ ) em função de do déficit de pressão de vapor ( $DPV$ ) para condições de ambiente externo, (B) $T_F$ vs $DPV$ para condições de ambiente interno da casa de vegetação, (C) $T_F$ em função da evapotranspiração de referência ( $ET_0$ ) para condições de ambiente externo e (D) $T_F$ vs ( $ET_0$ ) em condições de ambiente interno da casa de vegetação.....	59
Figura 12. Hardware do sistema de aquisição de dados de fluxo seiva, pelo método térmico (DASFSMT).....	73
Figura 13. Representação da disposição dos sensores de fluxo de seiva, no cabeçote.....	74
Figura 14. Croqui do experimento, em detalhe: A área irrigada; A área não irrigada; Espaçamentos entre linhas; Espaçamentos entre plantas; Localização da estação agrometeorológica; Clones de cafeeiro Conilon clone 109A e clone 14.....	77
Figura 15. Cabeçote instalado no ramo ortotrópico do cafeeiro Conilon.....	78
Figura 16. Instalação das sondas TDP (Granier) entre o 1º e 2º nó no ramo ortotrópico com face voltada para N. Sondas fixadas a 40 mm equidistantes com isolamento externo por poliestireno expandido (A), aplicação de manta termoacústica para proteção térmica da secção do ramo (B) e resultado da aplicação das sondas com proteção termoacústica (C) em cafeeiro Conilon. ....	80
Figura 17. Variáveis climatológicas: radiação fotossinteticamente ativa ( $RFA$ ), temperatura do ar (Temp.), umidade relativa (UR), precipitação (Precip.), déficit de pressão de vapor ( $DPV$ ) e evapotranspiração ( $ET_0$ ). Linhares, ES.....	84
Figura 18. Modelo de ajuste, coeficiente de determinação ( $R^2$ ), coeficiente de correlação de <i>Peason</i> ( $r$ ), índice de Willmott ( $d$ ) e índice de confiança e desempenho de Camargo e Sentelhas ( $cs$ ), para os valores de fluxo de seiva medidos por sondas tipo TDP em função de valores de fluxo de seiva medidos por sensores térmicos, para clones de cafeeiro Conilon	

tolerantes ao estresse hídrico (clone 14) e suscetível ao estresse hídrico (clone 109a).....86

Figura 19. Perfil de variação dos valores médios de fluxo de seiva de dois modelos de sensor: sensor térmico e sensor TDP (*Granier*) em função dos valores horários de evapotranspiração de referência ( $ET_0$ ). Para dois clones de cafeeiro Conilon: 'clone 14' (A e C) e 'clone 109a' (B e D). .....88

## RESUMO

GALOTE, Jean Karlos Barros Galote; D.Sc.; Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro; dezembro de 2021; Sistema de aquisição de dados e medição de fluxo de seiva para estimativa da transpiração em plantas; Orientador: D.Sc. Elias Fernandes de Souza.

O presente trabalho foi dividido em 2 capítulos. O primeiro capítulo foi destinado ao desenvolvimento de sistema de aquisição de dados de fluxo de seiva pelo método do pulso de calor. Os circuitos eletrônicos foram confeccionados no Laboratório de Engenharia Agrícola do Centro de Ciência e Tecnologia Agrícola da Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, utilizando componentes eletrônicos de baixo custo e linguagem de programação aberta do tipo C/C++. O equipamento foi programado para emitir pulso de calor de 11,25 J com duração 18s por pulso, em sistemas cíclicos de aquecimento e arrefecimento de 180 s. No campo os equipamentos foram testados em experimento montado em delineamento experimental em blocos ao acaso distribuídos em esquema de parcelas subdivididas no tempo, utilizando dois tipos de manejos de irrigação: reposição de 80% da evapotranspiração da cultura ( $ET_c$ , mm d<sup>-1</sup>) e 50% da  $ET_c$  (mm d<sup>-1</sup>) em plantas de mamoeiro (*Carica papaya* L.) com 5 meses de idade. O período avaliativo foi de 10 dias. As condições climáticas locais foram monitoradas, comparando-se os valores de velocidade de fluxo de seiva, com dados de demanda transpiração local (DTL) e déficit de pressão de vapor d'água (DPV). Os resultados demonstraram velocidade do fluxo de seiva variando de  $-0,8207 \cdot 10^{-8} \text{m}^3 \text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$  a  $5,6042 \cdot 10^{-8} \text{m}^3 \text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$ . A correlação entre DTL e DPV

resultaram em  $r \approx 0,70$  a  $0,91$ , índice de Willmott ( $d$ )  $\approx 0,80$  a  $0,95$  e índice de confiança e desempenho de Camargo e Sentelhas ( $cs$ )  $\approx 0,56$  a  $0,87$ . Os custos totais envolvidos na aquisição dos componentes para o desenvolvimento da unidade de armazenamento de dados das cinco unidades de medição de fluxo de seiva foram de R\$ 1.500,91. O segundo capítulo foi destinado ao desenvolvimento de sistemas de aquisição de dados de fluxo de seiva pelo método térmico (DASFSMT). O desenvolvimento dos equipamentos ocorreu no Laboratório de Engenharia Agrícola do Centro de Ciência e Tecnologia Agrícola da Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro utilizando componentes de baixo custo, de programação aberta. Os cabeçotes contendo os sensores de fluxo de seiva foram compostos de 3 termistores de  $10\text{ k}\Omega$  ( $0,62\text{ W} \pm 250\text{ mA}$ ) e um resistor SMD  $47\ \Omega$ . No campo os equipamentos foram testados em lavoura cafeeira, em experimento montado em blocos casualizados organizados em esquema fatorial. Como primeiro fator o manejo de irrigação (com e sem), como segundo fator, clones de cafeeiro Conilon (*Coffea canephora* Pierre Ex. Froehner): clone 14/86 e clone 109a. Os resultados obtidos pelos sensores desenvolvidos, foram comparados com resultados de sensores comerciais do tipo TDP instaladas no mesmo ramo do cafeeiro. Observou-se também forte correlação positiva entre as sondas TDP (Granier) e os sensores desenvolvidos ( $c = 0,83$ ). Os custos totais envolvidos no desenvolvimento de oito sistemas de aquisição de dados de fluxo de seiva pelo método térmico foram de R\$ 2.908,00. Desta forma, demonstrou-se que esta é uma alternativa de baixo custo, não destrutiva, não incisiva, de fácil instalação, para os estudos sobre os fluxos de seiva e as propriedades hidráulicas em plantas.

## ABSTRACT

GALOTE, Jean Karlos Barros Galote; D.Sc.; State University of Norte Fluminense Darcy Ribeiro; December 2021; DATA ACQUISITION SYSTEM AND SAP FLOW MEASUREMENT TO ESTIMATE PLANTS TRANSPIRATION; Advisor: D.Sc. Elias Fernandes de Souza.

This work was divided into 2 chapters. The first chapter was dedicated to the development of the sap flow data acquisition system by the heat pulse method. The electronic circuits were made at the Agricultural Engineering Laboratory in the Agricultural Technology Science Center of Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro using low-cost electronic components and an open C/C++ programming language. The equipment was programmed to emit a heat pulse of 11.25 J with a duration of 18 s per pulse, in cyclic heating and cooling systems of 180 s. In the field the equipments was tested in experimental design randomized blocks setup split-plot scheme in time. The parcel representing two supply systems: replacement of 80% of the evapotranspiration of the culture ( $ET_c$  mm d<sup>-1</sup>) and 50% of the  $ET_c$  (mm d<sup>-1</sup>) in papaya plants (*Carica papaya* L.) at 5 months of age. The evaluation period was 10 days. The local climatic conditions were monitored, comparing the values of sap flow velocity, with data of local transpiration demand (DTL) and water vapor pressure deficit (DPV). The results showed sap flow velocity ranging from  $-0.8207 \cdot 10^{-8} \text{m}^3 \text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$  to  $5.6042 \cdot 10^{-8} \text{m}^3 \text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$ . The correlation between DTL and DPV resulted in  $r \approx 0.70$  to  $0.91$ , Willmott index (d)  $\approx 0.80$  to  $0.95$  and Camargo and Sentelhas confidence and performance index (cs)  $\approx 0.56$  to  $0.87$ . The total costs involved in the acquisition of components



for the development of the data storage unit of the five sap flow measurement units were R\$ 1,500.91. The second chapter was destined to the development of systems for the acquisition of sap flow data by the thermal method (DASFSMT). The development of the equipment took place at the Agricultural Engineering Laboratory in the Agricultural Technology Science Center of Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, using low-cost, open programming components. The heads containing the sap flow sensors were composed of 3 thermistors of 10 k $\Omega$  (0.62 W + 250 mA) and a 47  $\Omega$  SMD resistor. In the field the equipment was tested in a coffee crop setup in a experimental design randomized blocks plot in a factorial scheme. As a first factor irrigation management (with and without), as a second factor, clones of Conilon coffee (*Coffea canephora* Pierre Ex. Froehner): clone 14/86 and clone 109a. The results obtained by the developed sensors were compared with the results of commercial sensors of the TDP type installed in the same branch of the coffee tree. A strong positive correlation was also observed between the TDP probes (Granier) and the developed sensors ( $c = 0.83$ ). The total costs involved in the development of eight sap flow data acquisition systems by the thermal method were R\$ 2,908.00. Thus, it was demonstrated that this is a low-cost, non-destructive, non-incisive, easy-to-install alternative for studies on sap flows and hydraulic properties in plants.

## 1 INTRODUÇÃO

Partindo da gravação manual, passando pela gravação gráfica em papel, posteriormente em fitas magnéticas, os processos de aquisição de dados, foram evoluindo com o tempo. A partir de 1980 teve início, as gravações em formatos digitais. Na era digital, os sistemas de aquisição de dados (DAS), foram definidos como: O processo de coleta de informação, pela conversão de sinais elétricos analógicos, a fim de analisar um fenômeno, documentá-lo, armazená-lo e processá-lo (Smith, 2020).

No método científico, a atividade mais tediosa e passível de erro é a coleta manual de dados, além de desgastante, há limitações humanas. Uma maneira de suprimir os erros, maximizando a capacidade de coleta de múltiplas variáveis é com o uso do DAS, que além de possibilitar a coleta contínua de dados, são capazes em alguns casos por meio de programação, realizar o pré-processamento dos dados, verificando em tempo real, a qualidade dos dados (Johnson e Jennings, 2006; Garcia et al., 2003).

A agricultura irrigada é responsável pelo consumo de 70% da água doce disponível no mundo, e torna-se a cada dia mais necessária à atividade agrícola devido à desuniformidade de distribuição e do aumento da escassez das precipitações pluviométricas em regiões produtoras. A água tem se tornado fator limitante na atividade agrícola, necessitando cada vez mais, de um manejo racional, consciente e sustentável. No correto manejo de irrigação a água é aplicada quando e o quanto é realmente necessário irrigar, permitindo o

desenvolvimento ótimo com a máxima produtividade para a cultura agrícola explorada.

Dentre os métodos para o manejo de irrigação, destacam-se os métodos baseados em informações do solo, do clima e da planta. O manejo via solo, é realizado, por meio de potenciômetros, tensiômetros, reflectometria no domínio do tempo (TDR), lisímetros, os quais determinam os potenciais matriciais, as tensões e ou a quantidade de água disponível no solo. O manejo baseado em informações climáticas é realizado principalmente por meio da simulação da variação da umidade do solo e de equações para o cálculo da evapotranspiração sobretudo o método padrão FAO 56, que utiliza dados de temperatura e umidade relativa do ar, radiação solar e velocidade do vento (Allen et al., 1998).

Dentre as principais técnicas de manejo de irrigação baseadas no status hídrico das plantas, pode-se destacar o potencial hídrico foliar, a medição de fluxo de seiva e a dendrometria.

Estudos sobre a mensuração da velocidade de escoamento de seiva são datados de antes de 1958 (Poyatos et al., 2016) e em sua maioria são baseados na razão de calor (Burgess et al., 2001), voltados para espécies arbóreas de médio e grande porte (Marshall, 1958). De maneira geral, as medições de fluxo de seiva ocorrem por intermédio do monitoramento do deslocamento de ondas de calor nos vasos xilemáticos de uma planta, estejam em um tronco ou em ramos. A velocidade do deslocamento de seiva está relacionada diretamente com o balanço entre a demanda climática e a disponibilidade de água no solo (Fuchs et al., 2017). A alteração do padrão desse relacionamento pode influenciar no status hídrico do vegetal e ser uma informação útil para o manejo de irrigação.

O mamoeiro (*Carica papaya* L.) é cultivado em grande parte do Brasil, desde o norte de Minas Gerais, Espírito Santo, sul e oeste Baiano, além dos estados do Rio Grande do Norte e Ceará, caracterizando-se em relevante atividade econômica no Brasil. Em 2020, a cultura do mamoeiro gerou uma receita de US\$ 3,74 milhões com a exportação de aproximadamente de 3,79 mil toneladas (CONAB, 2021b). Sendo o plantio em sua totalidade dentro de áreas irrigadas.

Também, o Brasil é atualmente o maior produtor (38,7% da produção mundial) e exportador (29,6% da exportação) de café. O mercado nacional movimentou US\$ 2 bilhões, nos quatros primeiros meses de 2021. A estimativa

para a safra 2021, apresentou produção de 48.807 mil sacas de 60 kg de café beneficiado, com participação de 33.364,8 mil sacas de café arábica, e 15.442,2 mil sacas de café Conilon, destacando o estado do Espírito Santo, como o maior produtor sendo responsável por 67% da produção nacional (CONAB, 2021a). Os locais de maior produtividade e qualidade de café no Brasil utilizam-se dos sistemas de irrigação para aplicação de água nos cultivos de café.

Para o manejo de irrigação baseado nas plantas há necessidade de sistema de coleta e armazenamento de dados acoplados a sensores específicos. No Brasil, é escassa a disponibilidade de equipamentos nacionais para esta aplicação. A importação de equipamentos e *softwares* para obtenção de informações na planta podem atingir preços que não se sustentam na atividade agrícola brasileira (SIGAPREGAO, 2020).

O desenvolvimento e elaboração de novos sistemas que utilizam componentes eletrônicos de baixo custo torna-se uma necessidade para a pesquisa, visando a apropriação de conhecimento nacional para o manejo racional da irrigação e a acessibilidade de equipamentos para os produtores brasileiros.

Neste sentido, esta tese teve por objetivo a elaboração e avaliação de dois sistemas de aquisição de dados para medição de fluxo de seiva. Um dos equipamentos foi aplicado com sensor de pulso de calor em pecíolos de mamoeiro e outro com sensor de dissipação de calor utilizado em plantas de café Conilon.

## 2 REVISÃO DE LITERATURA

### 2.1 SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS (DAS)

Partindo da observação pessoal e anotação manual até o processo de coleta automática por sensores e o armazenamento em componentes eletrônicos, a aquisição de dados e o armazenamento de dados, foram evoluindo com o tempo. Ao atingir a era digital, na década de 80, os sistemas de aquisição de dados (DAS), foram definidos como os processos de coleta e de armazenamento de informação, a partir da conversão de sinais elétricos analógicos em dados digitais, a fim de analisar um fenômeno, documentá-lo, armazená-lo e processá-lo (Smith, 2020).

Basicamente, nos processos de DAS, ocorrem leituras no ambiente físico por meio de elementos sensíveis denominados de sensores e ou transdutores, que possuem a capacidade de converter um fenômeno físico em um sinal elétrico mensurável. Estes sinais, por sua vez, podem ser modificados a fim de se adequarem a entrada no DAS podendo ser: amplificados, atenuados, filtrados e isolados por meio de condicionadores de sinal. Além disso, os sinais físicos analógicos, são convertidos para o formato digital a fim de serem interpretados por hardware e software computacionais, podendo realizar a sua gravação em componentes eletrônicos específicos, como cartões de memória ou discos rígidos (Smith, 2020; NI, 2013).

Na utilização do método científico para entendimento de um fenômeno físico, a atividade mais tediosa, exigente de atenção e passível de erro é a coleta manual de dados, devido às limitações humanas. Uma maneira de suprimir os erros, maximizando a capacidade de coleta de múltiplas variáveis é com o uso de sistemas de aquisição de dados (DAS). Além de possibilitar a coleta contínua de dados, são capazes em alguns casos por meio de programação, realizar o pré-processamento dos dados, verificando em tempo real, a qualidade dos dados (Johnson e Jennings, 2006; Garcia et al., 2003). Cabe ressaltar que a confiabilidade, precisão e acurácia dos dados obtidos por meio de DAS, estão diretamente relacionados com a qualidade dos componentes utilizados na construção do hardware, além da devida calibração prévia dos instrumentos utilizados (Gesteira et al., 2014; Ryu, 2013; Asad et al., 2011).

### **2.1.1 Microcontroladores**

Os microcontroladores são dispositivos programáveis, versáteis, utilizados em sistemas computacionais, onde um único componente é capaz de englobar interfaces de entrada e de saída, o processamento matemático dos dados, como também conversores de sinais analógicos e digitais. Há também outras funcionalidades como, por exemplo, permitirem a utilização de periféricos adicionais (Pellison, 2018; Chase, 2007).

### **2.1.2 Shields**

Os *Shields* são denominados periféricos eletrônicos disponibilizados em placas de circuito impresso, obedecendo um padrão de características geométricas, como posição de pinos de entrada e saída, tensões, normalmente em acordo com algum tipo de microcontrolador específico, permitindo conexão fácil e ágil dispensando o uso de soldas eletrônicas. Há vários tipos de *Shields* para diferentes funções e diferentes tipos de microcontroladores. Seu uso não necessariamente exige que seja embarcado, ou seja sobreposto, à placa do microcontrolador, permitindo que a comunicação seja por circuito impresso e ou fios. A característica principal dos *Shields* é ser um elemento conectado a um

microcontrolador com objetivo de expandir suas funcionalidades, reduzindo a necessidade de condutores de interligação, permitindo mais agilidade no processo de montagem de um dado equipamento (Pellison, 2018).

### **2.1.3 Gravadores de dados em cartão de memória**

Normalmente são apresentados na forma de *Shields*. Trata-se de um dispositivo mecânico de conexão do cartão de memória, ligado diretamente a uma sequência de divisores de tensão, utilizando um protocolo de comunicação SPI, e realizam a gravação dos dados em formato digital. Os cartões de memória podem ser dos modelos SD ou microSD (Pellison, 2018).

### **2.1.4 Temporizadores**

Para registrar a data e a hora em que ocorre a leitura de dados de determinado fenômeno é necessário utilizar de um componente que forneça a data e a hora em tempo real. Esses componentes são denominados Relógios de tempo real ou, em inglês *Real Time Clock*. Comercialmente são conhecidos como *RTC*.

Os *Shields* disponíveis no mercado, normalmente baseiam-se no CI DS3231, tem comunicação via protocolo *I<sup>2</sup>C*, necessitam de fonte de alimentação externa, normalmente, baterias de lítio de 3 V (Pellison, 2018).

### **2.1.5 Sensores**

Os sensores e transdutores, possuem a capacidade de receber e responder a estímulos externos, traduzindo em sinais analógicos elétricos de quantidade física equivalente. Podem ser utilizados como entrada ou saída para os circuitos eletrônicos. Um sensor é um tipo especial de transdutor utilizado para gerar um sinal de entrada. Um transdutor pode ser classificado como analógico ou digital, embora a maioria dos transdutores seja analógico (Pellison, 2018).

## 2.2 FLUXO DE SEIVA

A água tem a função importante para as plantas como a manutenção do turgor no tecido vegetal, das atividades metabólicas, da temperatura foliar, dentre outras. A determinação do fluxo de seiva na planta permite avaliar o grau de estresse em que se encontra, pois há uma relação direta com a taxa de transpiração e a condutância estomática. Também fornece informações sobre os mecanismos hidráulicos e o conteúdo de água (Steppe et al., 2015).

Trata-se de uma das ferramentas mais importante para o entendimento do padrão de utilização de água pela planta. Podendo ser uma ferramenta muito útil para o manejo de irrigação. Vários autores utilizam de diferentes abordagens para determinação do fluxo de seiva, por métodos destrutivos, semi-destrutivos ou não destrutivos. Os métodos destrutivos são utilizados posteriormente à secção da planta, utilizando como indicadores de fluxo, sais, corantes e ou isótopos radiativos (Crafts et al., 1949). Os métodos semi-destrutivos utilizam-se de perfurações na seção do alburno para introdução de sondas termosensíveis, e fontes de calor (Granier, 1985). Os métodos não destrutivos utilizam a aplicação de calor na superfície de caules e ramos das plantas (Sousa et al., 2020; Thidar et al., 2020; Venturin et al., 2020; Feng et al., 2019).

Estudos iniciais sobre fluxo de seiva foram desenvolvidos a partir da década de 40, porém teve um impulso a partir de Marshall (1958). Diferentes abordagens para determinação do fluxo de seiva xilemática foram desenvolvidas, de onde destacam-se os métodos baseados em pulso de calor, métodos de Balanço de calor e métodos de Dissipação térmica.

### 2.2.1 Método de Pulso de Calor

Marshall (1958) baseado em estudos anteriores, propôs a medição da velocidade de deslocamento da seiva na planta por intermédio do monitoramento de pulso de calor aplicado em caules, ramos ou folhas por uma sonda de aquecimento. O monitoramento é realizado mediante a medição da variação da temperatura em duas sondas distanciadas diferentemente em relação à fonte de



calor (Figura 1). É possível estimar o fluxo de seiva analisando o padrão de variação de temperatura entre os dois pontos de medição (Sousa et al., 2020; Van de Put et al., 2020; Venturin et al., 2020; Cohen et al., 1981, 2015; Swanson, 1994; Marshall, 1958).

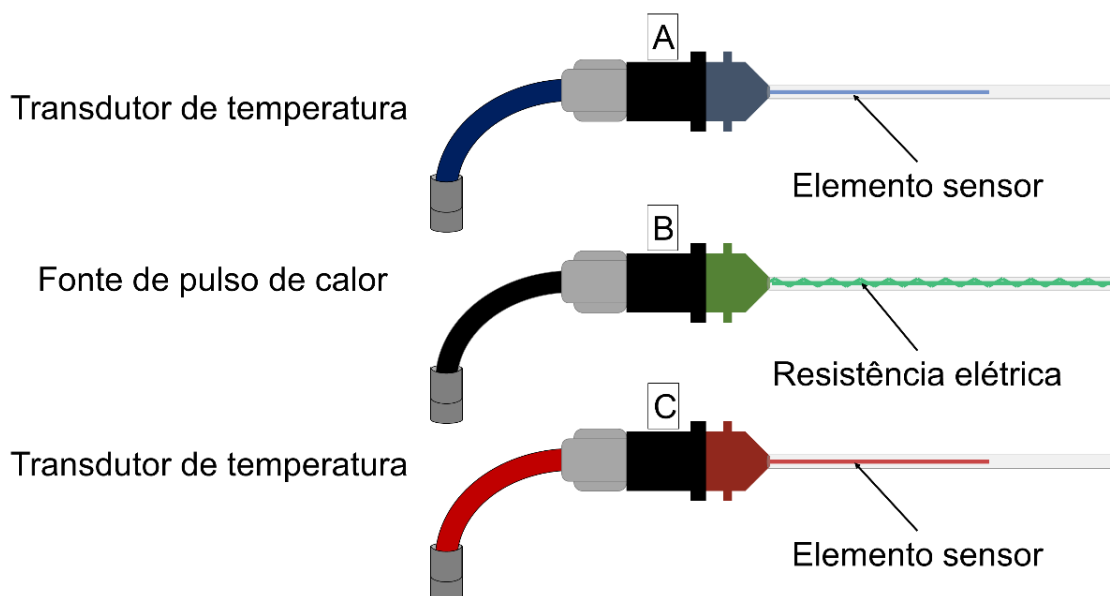


Figura 1. Exemplo de conjunto de sondas para medição de fluxo de seiva, pelo método de pulso de calor. Sondas (A) e (C) com elemento sensor de temperatura e sonda (B) com resistência elétrica para aplicação de calor.

Diferentes configurações entre as sondas A, B e C, representadas na Figura 1, definem diferentes equipamentos existentes no mercado (Sousa et al., 2020).

A velocidade do fluxo de seiva está relacionada com a velocidade do pulso de calor segundo a Equação 1 (Marshall 1958).

$$F = \frac{\rho_C}{\rho_S C_S} V = \rho_b (m_c + 0,33) V \quad (1)$$

em que:

F - Densidade do fluxo de seiva,  $m^3 s^{-1} m^{-2}$ ;

$\rho$  - Massa específica da madeira,  $kg m^{-3}$ ;

c - Calor específico da madeira,  $J kg^{-1} K^{-1}$ ;

$\rho_S$  - Massa específica da seiva,  $kg m^{-3}$ ;

$C_s$  - Calor específico da seiva,  $J\text{ kg}^{-1}\text{K}^{-1}$ ;

$\rho_b$  - Densidade básica da madeira,  $\text{kg m}^{-3}$ ;

$m_c$  - Umidade da madeira, decimal e

$V$  - Velocidade do pulso de calor,  $\text{m s}^{-1}$ .

O método de pulso de calor é muito utilizado em pesquisas para medição de fluxo de seiva. Porém apresenta algumas limitações que exigem a calibração do equipamento para aplicações específicas (Sousa et al., 2020; Cohen et al., 1981). Vale ressaltar que a inserção de sondas e ou agulhas no alburno pode gerar injúrias que modificam a fluidez da seiva (Steppe et al., 2015). Existem também estudos analisando a possibilidade de redução do número de sensores de temperatura, como o proposto por López-Bernal et al. (2017).

### 2.2.2 Método de Balanço de calor (HBSF)

Consiste no balanço de energia entre dois seguimentos de caule e ou ramo. Uma taxa constante de calor oriundo de um elemento aquecedor é aplicado na superfície da planta e parte desse calor é absorvido pela planta e parte é transmitido por convecção pela seiva no tecido xilemático. Desta forma, conhecendo a taxa de aplicação de calor e computando todas as perdas por condução axial e radial, é possível estimar a parte de calor convectivo que flui com a água no xilema. Este método é indicado como alternativa para medição em espécies vegetais com diâmetro de caule inferiores a 10 mm (Senock e Ham, 1993), sendo encontrando alguns modelos comerciais, indicados para caules com diâmetros entre 2,1 mm a 5,0 mm (Dynamax, 2007).

Inicialmente o método HBSF utilizava de aparato de componentes eletrônicos, na alternância de potência aos elementos aquecedores (Čermák et al., 1973). Sendo simplificado posteriormente, utilizando uma potência constante, reduzindo os custos com componentes eletrônicos para mudanças de potência, necessitando apenas de um sistema de corrente constante para alimentação dos elementos aquecedores (Sakuratani, 1981). Novas modificações nas equações do método possibilitaram a redução do número de canais analógicos utilizados, porém acarretando limitação quanto à variação das temperaturas envolvidas no

cálculo (Baker e Van Bavel, 1987) sendo este cálculo (Equação 2) o mais utilizado, em que expressa o balanço de energia em um dado segmento de caule:

$$P_{in} = Q_r + Q_v + Q_s + Q_{flow} \quad (2)$$

em que:

$P_{in}$  - Potência aplicada ao aquecedor, W;

$Q_r$  - Perda de calor por condução na direção axial, W;

$Q_v$  - Perda de calor por condução vertical, W;

$Q_s$  - Energia armazenada pelo caule, W e

$Q_{flow}$  - Energia perdida por convecção no fluxo de seiva, W.

Deste modo, calcula-se fluxo de seiva (F) utilizando as Equação 3 e 4:

$$F = \frac{(P_{in} - Q_r - Q_v - Q_s)}{c(T_a - T_b)} \quad (3)$$

$$F = \frac{Q_{flow}}{c(\Delta T_{sap})} \quad (4)$$

em que:

F - Fluxo de seiva, g s<sup>-1</sup>;

c - Calor específico da água, J g<sup>-1</sup>k<sup>-1</sup>;

$T_a$  - Temperatura da seiva acima do aquecedor, K;

$T_b$  - Temperatura da seiva abaixo do aquecedor, K e

$\Delta T_{sap}$  é a diferença da temperatura da seiva abaixo e acima do segmento do caule, K.

Na Figura 2 estão representados os componentes do balanço de calor.

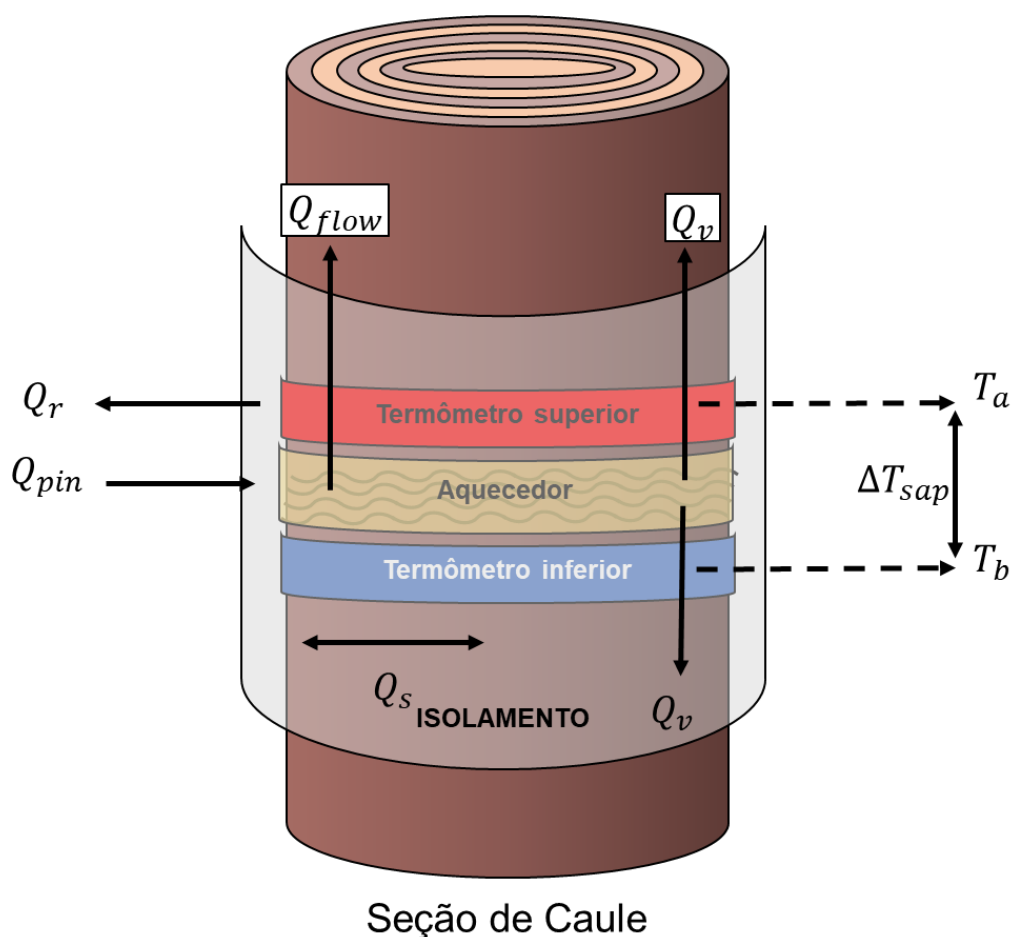


Figura 2. Representação esquemática dos movimentos do fluxo de calor, em um dado segmento de caule, por meio dos componentes aquecedores.  $Q_{pin}$  = Potência aplicada ao aquecedor, W;  $Q_r$  = Perda de calor por condução na direção axial, W;  $Q_{flow}$  = Energia perdida por convecção no fluxo de seiva, W;  $Q_v$  = Perda de calor por condução vertical, W;  $Q_s$  = Energia armazenada pelo caule, W;  $\Delta T_{sap}$  = Variação de temperatura da seiva a cima e abaixo do aquecedor, °C;  $T_a$  = Temperatura da seiva a cima do aquecedor, °C e  $T_b$  = Temperatura da seiva abaixo do aquecedor, °C.

O balanço de energia trata-se de um método que requer troncos regulares, pois seu elemento aquecedor é externo não incisivo como uma espécie de manta aquecida, que deve manter contato com todo o seguimento do tronco avaliado. Dados da literatura, demonstram erros superiores a 20%, em função de secções irregulares de tronco (Weibel e de Vos, 1994). Alguns autores relatam que os erros são reduzidos quando as plantas estão bem hidratadas, mantendo os troncos turgidos, quando comparado a plantas em estresse hídrico (Čermák et al., 1995). É importante, para o método o bom isolamento e proteção dos sensores (Gutiérrez et al., 1994). Wang et al. (2017) relataram redução dos erros

de estimaco da transpirao quando fizeram ajustes no método utilizando calibrao empírica.

A utilizao deste método para estimaco do fluxo de seiva é abordado na literatura, em diversas culturas como milho (Wang et al., 2017) e café (Gutiérrez e Meinzer, 1994).

### 2.2.3 Método de Dissipao térmica (TDP)

O método de dissipao térmica (TDP) foi primeiramente apresentado por Granier (1985) e  constituído por duas sondas, normalmente construídas a partir de agulhas hipodérmicas, que so inseridas no tronco da planta no sentido longitudinal do fluxo de seiva. Na sonda superior, so adaptados no seu interior uma resistência elétrica e um transdutor de temperatura. Na sonda inferior, distanciada em torno de 4 cm abaixo, no seu interior é inserido apenas um transdutor de temperatura. De modo geral, o transdutor de temperatura utilizado é o termopar de cobre-constantan (Figura 3). O funcionamento deste sensor é obtido quando se aplica uma corrente elétrica constante no elemento aquecedor. Granier ajustou uma relao matemática entre a velocidade de fluxo de seiva e a variao da diferena de temperatura entre as duas sondas (Equao 5).

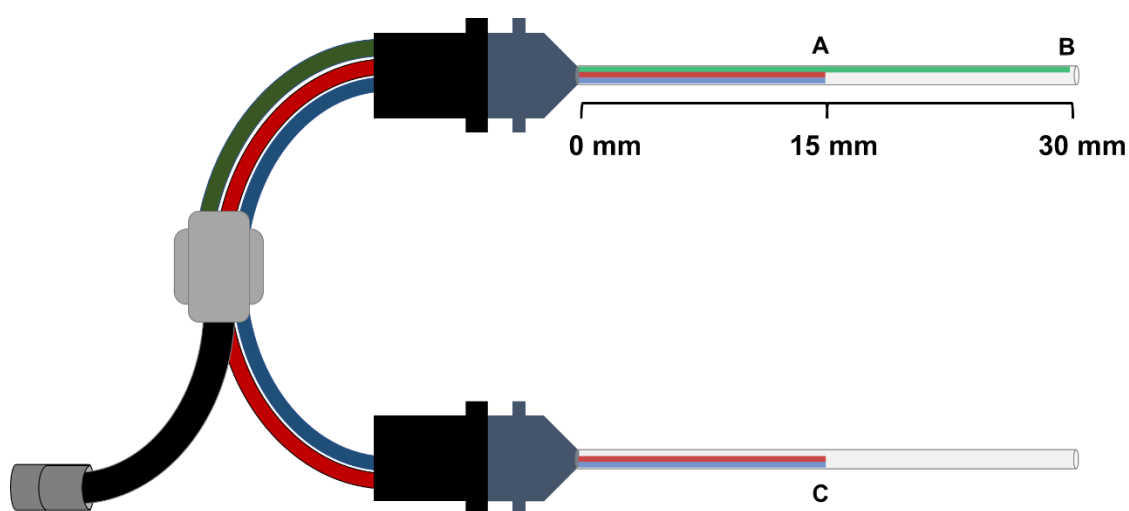


Figura 3. Exemplo de sondas do tipo TDP, modelo TDP 30 (Dynamax), termopares (A) e (C), aquecedor de fio de Constantan (B).

$$u = a \cdot K^b \quad (5)$$

sendo:

$$K = \frac{(dT_M - \Delta T)}{\Delta T} \quad (6)$$

em que:

$K$  - Coeficiente de dissipação térmica, adimensional;

$dTM$  - Máxima diferença de temperatura entre as sondas em situação de fluxo zero, K;

$\Delta T$  - Diferença de temperatura entre as sondas, com fluxo de seiva maior que zero, K;

$u$  - Densidade de fluxo de seiva,  $m^3 s^{-1}m^{-2}$ ;

$a$  - Constante igual a  $0,000119 m^3 s^{-1}m^{-2}$  e

$b$  - Constante igual a 1,231 (adimensional).

Tendo a densidade de fluxo de seiva ( $u$ ), o volume de seiva que flui na unidade de tempo em uma determinada seção de caule é calculada utilizando a Equação 7:

$$SF = u \cdot S_a \quad (7)$$

em que,

$SF$  - Volume de seiva por unidade de tempo,  $m^3 s^{-1}$  e

$S_a$  - Área da seção transversal do caule abrangido pelo xilema,  $m^2$ .

#### 2.2.4 Método da Análise Harmônica do Pulso de Calor

Sousa et al. (2020) propuseram um novo método para medição de fluxo em meio poroso baseado na análise harmônica de séries de Fourier. Neste método a velocidade do escoamento é estimada a partir das variações na fase ( $\varphi$ ) e no logaritmo natural das amplitudes ( $\alpha$ ) de ondas de calor geradas por pulsos cíclicos de calor aplicados no meio onde o fluxo corre. Este método pode ser utilizado para a estimativa de fluxo de seiva, pressupondo que o alburno da planta é similar a um meio poroso.

Pelo método harmônico a velocidade de escoamento de fluxo de seiva é estimada pela Equação 8.

$$J_s = \frac{2\pi}{T} \frac{(x_2 - x_1)}{\varphi} \frac{2k}{(x_2 - x_1)} \alpha \quad (8)$$

em que:

$J_s$  - Densidade de fluxo de seiva,  $\text{m}^3 \text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ;

$T$  - Período do ciclo de pulso de calor, s;

$x_1$  - Distância do ponto 1 de medição da temperatura no meio em relação à fonte de pulso de calor, m;

$x_2$  - Distância do ponto 2 de medição da temperatura no meio em relação à fonte de pulso de calor, m;

$\varphi_0$  - Defasagem entre as fases das harmônicas de primeira ordem para as ondas de calor nos pontos 1 e 2, sem fluxo de água, radianos;

$\alpha_0$  - Defasagem entre os logaritmos naturais das amplitudes de primeira ordem para as ondas de calor nos pontos 1 e 2, sem fluxo de calor, adimensional;

$\varphi$  - Defasagem entre as fases das harmônicas de primeira ordem para as ondas de calor nos pontos 1 e 2, com fluxo de água, radianos e

$\alpha$  - Defasagem entre os logaritmos naturais das amplitudes de primeira ordem para as ondas de calor nos pontos 1 e 2, com fluxo de calor, adimensional.

O termo  $(2\pi/T)[(x_2 - x_1)/\varphi_0]$  é a velocidade da onda de calor com densidade de fluxo zero. O termo  $[\frac{\varphi_0}{\varphi} - \frac{\alpha}{\alpha_0}]$ , denominado “índice convectivo” expressa relação matemática entre  $J_s$  e a velocidade de onda de calor na situação de fluxo de água igual a zero.

O cálculo de transpiração relativa ( $T_F$ ) a área superficial de uma folha, ou um conjunto de folhas, pode ser estimado pela Equação 9.

$$T_F = J_s \frac{S_a}{AFE} \quad (9)$$

em que:

$T_F$  - Transpiração relativa à área da folha ou conjunto de folhas,  $m^3 m^{-2} s^{-1}$ ;

$S_a$  - Secção transversal do pecíolo no local de instalação do sensor de fluxo,  $m^2$  e

$AFE$  - Área superficial da folha ou do conjunto de folhas,  $m^2$ .

### 2.3 EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA

A evapotranspiração de referência ( $ET_0$ ), preconizado pela Organização para Alimentos e Agricultura (FAO) em 1990, é a evapotranspiração de uma extensa área vegetada com uma cultura hipotética de referência, com parâmetros definidos de altura, albedo e de resistência ao fluxo de vapor. Assim definida, simula a evapotranspiração de um cultivo extenso de grama com ótimas condições hídricas, de solo e de cultivo. O seu valor é estimado utilizando-se a Equação 10

$$ET_0 = \frac{0,408\Delta (Rn - G) + \gamma \frac{900}{T+273} U_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma (1 + 0,34 U_2)} \quad (10)$$

$$\Delta = \frac{4098 \times 0,61 \exp\left(\frac{17,23 \times T_{ar}}{237,3 + T_{ar}}\right)}{T_{ar} + 237,3} \quad (11)$$

$$\gamma = 0,000665 \times 101,3 \left(\frac{293 - 0,0065Z}{293}\right)^{5,26} \quad (12)$$

$$e_s = 0,6108 \exp\left(\frac{17,23 \times T_{ar}}{237,3 + T_{ar}}\right) \quad (13)$$

$$e_a = e_s \left(\frac{RH}{100}\right) \quad (14)$$

em que:

$ET_0$  - Evapotranspiração de referência,  $mm d^{-1}$ ;

$\Delta$  - Taxa de variação da pressão de saturação em relação à temperatura,  $kPa ^\circ C^{-1}$  (Equação 11);

$\gamma$  - Constante psicrométrica,  $kPa ^\circ C^{-1}$  (Equação 12);

$Z$  - É a altitude em metros do local estudado, m;

$e_s$  - Pressão de saturação de vapor d'água,  $kPa$  (Equação 13);



$T_{ar}$  - Temperatura do ar, °C;

$e_s - e_a$  - Déficit de saturação de pressão de vapor d'água, kPa e

$e_a$  - Saturação atual de vapor kPa (Equação 14).

## 2.4 O MAMOEIRO

O mamoeiro é uma das árvores frutíferas mais importantes cultivadas em regiões tropicais. Seus frutos são consumidos normalmente *in natura*, bem como na forma de geleias e doces.

Com base na sua classificação taxonômica, o mamão (*Carica papaya* L.) pertence à família das caricáceas ao qual possui cinco gêneros e 34 espécies.

No Brasil, os cultivares de mamoeiro disponível comercialmente são plantas ginoico-andromonoicas, onde sua população é composta por plantas femininas ou hermafroditas. Subdivididas em dois grupos o “Formosa” e o “Solo”, classificadas quanto ao peso médio do fruto (900 g e 500 g). O grupo mais plantando no Brasil é o “Solo” com variedades disponíveis comerciais como Sunrise Solo, e Golden. Para o grupo “Formosa” existe as variedades: Rubi Incaper 511, e os híbridos UENF/Caliman e Tainung 01 (Zucoloto et al., 2015).

O Brasil possui uma área plantada de 18.568 hectares, em destaque para os estados da Bahia com 6.143 hectares plantados, o Espírito Santo com 5.502 hectares, Minas Gerais com 1.123 hectares, Rio Grande do Norte com 1.675 hectares e Ceará com 632 hectares (IBGE, 2017). Estima-se que o cultivo do mamoeiro seja conduzido irrigado, embora os dados da literatura sejam escassos quanto à área irrigada.

## 2.5 O CAFEEIRO

O cafeeiro é originário do continente africano (Etiópia e Congo), podendo ainda ser encontrado na composição da vegetação nativa destas regiões. A bebida foi difundida no continente europeu pelos árabes, sendo inicialmente

chamado de QUAHWEH (vinho) ou QAHWA (o excitante). Essa denominação sofreu diversas mudanças até se tornar café (português, francês e espanhol) (Dalcomo et al., 2017; Davis et al., 2011).

O subgênero *Coffea* sp. possui 127 espécies diferente, porém somente os *Coffea arabica* L., *Coffea canephora* Pierre Ex Froehner, e *Coffea liberica* são explorados comercialmente (Ferrão R. et al., 2019; Davis et al., 2011), ficando as demais como banco de genético para os programas de melhoramento (Ferrão R. et al., 2019).

O cafeeiro Conilon (*Coffea canephora* Pierre Ex Froehner) é originário das regiões africanas desde a Guiné ao Congo, além da região da costa oeste e central, predominando sempre em regiões de temperaturas mais elevadas. No Brasil, as principais regiões produtoras são aquelas com temperaturas médias anuais entre 22 °C e 26 °C (Ferrão R. et al., 2019). Trata-se de um arbusto multicaule, com folhas em tons de verde-claro, onduladas, sua fecundação ocorre por polinização cruzada, por se tratar de uma espécie diploide ( $2n = 22$  cromossomos), alógama com autoincompatibilidade gametofítica associada a um único locus S, que interage com o sistema gametofítico (Ferrão M. et al., 2019).

### **2.6.1 Os clones ES8161 Goytacá (14/86) e 109A**

Atualmente o clone 14/86 foi rebatizado e lançado como porta-enxerto resistente ao ataque de nematoides de galhas pelo Instituto Capixaba de Pesquisa, Assistência Técnica e Extensão Rural – Incaper, passando a se chamar de ES8161 Goytacá (Lima et al., 2021).

Inicialmente o clone 14/86 se destacava no programa de melhoramento genético do Incaper, graças a sua rusticidade a campo, quando mesmo em condições adversas de déficit hídrico e altas temperaturas, conseguia manter uma produção constante e regular. Trata-se de uma planta de porte ereto, unicaule, as folhas apresentam coloração verde-clara, onduladas e rígidas, porte médio com encurtamento nos internódios, corroborando com um número maior de gemas foliares por ramo plagiotrópico, as folhas nos plantios não adensados e a pleno sol, são menores.

Os clones 14/86 são tolerantes ao estresse hídrico, por possuírem sistema radicular relativamente profundo, alta sensibilidade estomática à disponibilidade de água e baixa condutância hidráulica. Estas características permitem a planta adiar a desidratação de seus tecidos mantendo seu vigor por meio de balanço hídrico favorável. Por outro lado, quando os estômatos se fecham limitam a transpiração e restringem o influxo de CO<sub>2</sub>, reduzindo o processo de fotossíntese e, por extensão, a produção de foto assimilados (clone 14) (Ronchi e DaMatta, 2019).

O clone 109A pertence ao programa de melhoramento genético do Incaper, com características de plantas do tipo Conilon, apresentando suscetibilidade ao estresse hídrico e ao ataque de doenças como a ferrugem (Silva et al., 2010). Trata-se de uma planta de porte ereto, com tendências a multicaules, dado o número elevado de brotos com fototropia positiva. Seus ramos plagiotrópicos, tendem a emitir novos ramos próximos ao solo e suas folhas são mais angulares e maiores, em tons em verde-escuro, além de menos rígidas, com prolongamento nos internódios.

Por se tratar de um clone sensível à seca, apresenta controle deficiente da transpiração. Apresenta resposta estomática limitada em relação à disponibilidade de água no solo ou à demanda evaporativa da atmosfera, podendo ainda ter baixa capacidade de absorção da água (Ronchi e DaMatta, 2019; Silva et al., 2010).

O Brasil possui no exercício de 2021 uma área em produção de 1.808,5 mil hectares com uma produção de 47.716 mil sacas de café beneficiado (CONAB, 2021a). Da área total em produção, cerca de 449.283 hectares utilizam cafeicultura irrigada (ANA, 2021).

Do total produzido cerca de 31.423,5 mil sacas de café beneficiado são da variedade Arábica e 16.292,5 mil sacas de café são da variedade Conilon. O café Conilon apresenta uma área plantada de 410,6 mil hectares. Os principais estados produtores são: Minas Gerais com 22.142,3 mil sacas, Espírito Santo com produção de 14.166 mil sacas destes 11.221 mil sacas são de café Conilon, e 2.945 mil sacas de café arábica, São Paulo com a produção de 4.007,2 mil sacas de café arábica, Bahia com produção de 3.469 mil sacas de café, Rondônia com 2.263,1 mil sacas de café Conilon, Paraná com produção de 876,3 mil sacas de café arábica, Rio de Janeiro com 209 mil sacas, Goiás com produção de 234,6

mil sacas de café arábica, Mato Grosso com produção de 194,2 mil sacas de café Conilon (CONAB, 2021a).

O estado do Espírito Santo se destaca como maior produtor brasileiro de café Conilon, responsável pela produção de 11.221 mil sacas de café beneficiado, em uma área cultivada de 410,6 mil hectares, seguido pelo estado de Rondônia com 69,2 mil hectares e Bahia com 41,9 mil hectares (CONAB, 2021a).

### **3 TRABALHOS**

#### **3.1 DESENVOLVIMENTO DE SISTEMA DE MEDIÇÃO DE FLUXO DE SEIVA PELO MÉTODO DE ANÁLISE HARMÔNICA DO PULSO DE CALOR**

##### **3.1.1 RESUMO**

No manejo de irrigação, seja ele: via clima, solo ou planta. Uma das etapas principais é quantificar a lâmina de irrigação a ser disponibilizada para a planta. Um dos métodos que permite o acompanhamento em tempo real do status hídrico da planta, é o acompanhamento do fluxo de seiva. Atualmente no mercado, os sensores disponíveis para essa função são voltados para árvores de médio e grande porte, com altas velocidades de escoamento de fluxo de seiva, além disso, os sensores em si, representam apenas uma parte dos itens necessários para o registro das informações, sendo necessários sistemas de aquisição de dados (DAS), em alguns casos, amplificadores de sinais, multiplexadores de canais, o que torna sua aquisição onerosa e seu uso restrito. Buscando uma alternativa a aquisição de equipamentos de alto custo para estimar o fluxo de seiva. Objetivou-se com o presente trabalho o desenvolvimento de unidade de aquisição de dados de fluxo de seiva, com sensores de pulso de calor de baixo custo e não incisivos.

A confecção dos equipamentos foi realizada no Laboratório de Engenharia Agrícola do Centro de Ciência e Tecnologia Agrícola da Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro. Foram desenvolvidos a unidade de armazenamento de dados (UAD) e as unidades de medição de fluxo de seiva (USF), com base em componentes de baixo custo. Os sensores de fluxo de seiva foram programados para emitir pulsos de calor de 11,25 J com duração de 18s em sistemas cíclicos de aquecimento e arrefecimento de 180s, utilizando resistores de 10  $\Omega$  (0,62 W  $\pm$  250 mA). Para testes no campo, os equipamentos foram disponibilizados em pecíolos de mamoeiro (*Carica papaya* L.), cultivar 'Golden' com 5 meses de idade, organizadas em delineamento experimental em blocos randomizados distribuídos em esquema de parcelas subdivididas no tempo, sendo 2 os manejos de irrigação: reposição de 80% da evapotranspiração da cultura ( $ET_c$ , mm d<sup>-1</sup>) e 50% da  $ET_c$  mm d<sup>-1</sup> pelo período de 10 dias. Foram observados valores de velocidade de fluxo  $-0,8207 \cdot 10^{-8} \text{m}^3 \text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$  a  $5,6042 \cdot 10^{-8} \text{m}^3 \text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$ . Para testar a capacidade de medição do fluxo de seiva, os valores convertidos em transpiração foliar ( $T_F$ ) forma correlacionados com dados de déficit de pressão de vapor d'água ( $DPV$ ) e evapotranspiração de referência ( $ET_0$ ), para condições de ambientes externos e internos da casa de vegetação. Os 4 modelos de ajuste de  $T_F$  apresentaram fortes correlações positivas ( $r > 0,85$ ) indicando boa precisão dos valores observados, como também valores do índice de Willmott (d) superiores a 0,70, indicando boa concordância dos valores observados. Além disso todos os 4 modelos para estimar a  $T_F$  foram classificados como "bons" segundo o índice de confiança e desempenho de Camargo e Sentelhas ( $0,65 \leq cs \leq 0,75$ ). Os custos envolvidos na aquisição dos componentes para o desenvolvimento do sistema wireless de aquisição de dados de fluxo de seiva, pelo método do pulso de calor foram de R\$ 257,10, o que representa cerca de 1,5% do valor de mercado para aquisição de um modelo comercial de registro de dados de 16 canais. Demonstrando uma alternativa de baixo custo, não destrutiva, não incisiva, de fácil instalação, para os estudos sobre os fluxos de seiva e as propriedades hidráulicas em plantas

Palavras-chave: Manejo de Irrigação, Automação, Sensor, Arduino, *Carica papaya* L.

## DEVELOPMENT OF A SAPFLOW FLUX MEASUREMENT SYSTEM BY THE HEAT PULSE HARMONIC ANALYSIS METHOD

### 3.1.2 ABSTRACT

In irrigation management either by climate conditions, soil conditions or plant conditions. The first the all steps is to quantify depth irrigation available to the plant. One of the methods that allows real-time monitoring of the water status of the plant is the monitoring of the sapflow flux. Currently on the market, the sensors available for this function are aimed at medium and large trees also high sapflow flux, in addition the sensors themselves represent only a part of the items needed to record the information, requiring data acquisition systems (DAS), in some cases, signal amplifiers and channels multiplexers. Which makes their acquisition more expensive and their use restricted. Seeking an alternative to the acquisition of high cost equipment to estimate the sapflow the objective of the present work was to develop a sapflow data acquisition unit, with low cost and non-invasive heat pulse sensors. The manufacture of the equipment was carried out at the Agricultural Engineering Laboratory of the Agricultural Science and Technology Center of the Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro. The data acquisition system (DAS) and the sapflow measurement units (USF) was manufactured based on low-cost components. The sapflow sensors were programmed to emit heat pulses of 11.25 J lasting 18 s in 180 s heating and cooling cycles, using 10  $\Omega$  (0.62 W + 250 mA) resistors. For field tests, the equipment was made available in papaya petioles (*Carica papaya* L.), cultivar 'Golden' with 5 months of age, organized in experimental design on randomized blocks distributed split-plot scheme with 2 managements irrigation: replacement of 80% of crop evapotranspiration ( $ET_c$ , mm d<sup>-1</sup>) and 50% of  $ET_c$  mm d<sup>-1</sup> for a period of 10 days. Flow velocity values  $-0.8207 \cdot 10^{-8} \text{m}^3 \text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$  to  $5.6042 \cdot 10^{-8} \text{m}^3 \text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$  were observed. To test the ability to measure the sapflow the values of sensors as converted into leaf transpiration ( $T_F$ ) were correlated with water vapor pressure deficit (VPD) and reference evapotranspiration ( $ET_0$ ) for with outdoor and inside greenhouse environmental conditions. The 4  $T_F$  adjustment models showed

positive strong correlations ( $r > 0.85$ ) indicating good precision of the observed values, as well as Willmott index (d) values greater than 0.70, indicating good agreement of the observed values. In addition, all models to estimate  $T_F$  were classified as “good” according to the confidence and performance index of Camargo and Sentelhas ( $0.65 < cs < 0.75$ ). The costs involved in the acquisition of components for the development of the wireless sapflow data acquisition system, by the heat pulse method, were R\$ 257.10, which represents about 1.5% of the market value for acquisition of a 16-channel data logging business model. Demonstrating a low-cost, non-destructive, non-incisive, easy-to-install alternative for studies on sap flows and hydraulic properties in plants.

Keywords: *Irrigation Management, Automation, Sensor, Arduino, Carica papaya L.*

### 3.1.3 INTRODUÇÃO

Estudos sobre mensuração da velocidade de escoamento de seiva em plantas são datados anteriormente a 1958 (Poyatos et al., 2016) Os métodos para medição de fluxo de seiva são classificados em 4 famílias (Flo et al., 2019) dependendo de como é realizado o aquecimento do alburno e como é monitorada a temperatura da seiva: 1) a família da Dissipação térmica, incluindo os métodos de dissipação térmica constante e transiente (TD; Do et al., 2011; Do e Rocheteau, 2002; Granier, 1985). 2) a família do pulso de calor, que inclui os métodos de compensação do pulso de calor, o método da razão de calor, o método T-máx, entre outros (López-Bernal et al., 2017; Pearsall et al., 2014; Vandegehuchte e Steppe, 2012b, 2012a; Testi e Villalobos, 2009; Burgess et al., 2001; Cohen et al., 1981; Swanson e Whitfield, 1981). 3) a família dos métodos baseados na deformação do campo de calor, que inclui o método da deformação do campo de calor e seus derivados (Nadezhdina, 2018). 4) a família dos



métodos baseados no balanço de calor (Čermák et al., 1973, 2004; Baker e Van Bavel, 1987; Daum, 1967).

Parte destes estudos visam a quantificação da transpiração em espécies arbóreas de médio e grande porte, com aplicações em áreas como hidrologia, ecologia e manejo de irrigação na agricultura (Van de Put et al., 2020; Baiamonte e Motisi, 2020; Venturin et al., 2020; Mares et al., 2016; Steppe et al., 2010, 2015; Vandegehuchte e Steppe, 2012a, 2013; Clearwater et al., 2009; Granier, 1985; Cohen et al., 1981; Marshall, 1958)

Em silvicultura, sondas instaladas no tronco de um vegetal, foram capazes de estimar suas taxas diárias de transpiração (López-Bernal et al., 2017; Cohen et al., 1981). Em cafeeiro Conilon Venturin et al. (2020) sensores de fluxo de seiva com base em pulso de calor alocados em ramos ortotrópicos apresentaram boa correlação quando comparando com valores de evapotranspiração de referência ( $ET_0$ ). Van de Put et al. (2020) desenvolveram sensores ExoBeat miniaturizados de velocidade de fluxo de seiva em *Ficus benjamina*, com bons resultados ( $R^2 = 0,9438$ ) em sistemas cíclicos de 150 s de pulso de calor, para hastes intactas de vegetais de 2 mm a 3 mm. Sousa et al. (2020), utilizando análise de séries harmônicas de Fourier em sistemas cíclicos de pulso de calor, foram capazes de estimar por intermédio da variação da fase e da amplitude da onda de calor, a velocidade do fluxo de água em um meio poroso artificial simulando o fluxo de seiva no alburno vegetal.

As diferentes abordagens, permitem uma melhor compreensão do sistema solo-planta, e das interações hidráulicas, da transpiração, do aporte de minerais, e do transporte de solutos nas folhas e frutos (Steppe et al., 2015). Contudo, as técnicas que fazem uso de sondas termoelétricas inseridas radialmente no alburno do vegetal, normalmente, resultam em formação de injúrias na seção do alburno, (López-Bernal et al., 2017a; Fuchs et al., 2017; Cohen et al., 1981). Neste sentido o desenvolvimento de técnicas, metodologias e equipamentos capazes de mensurar o fluxo de seiva em plantas e ramos de menor porte, e por consequência, com menores valores de velocidade de seiva, sem a necessidade da inserção destrutiva ou sem provocar a injúria do tecido vegetal, tornam-se fundamentais, para uma agricultura mais tecnificada.

O mamoeiro (*Carica papaya* L.) é cultivado em grande parte do Brasil, desde o norte de Minas Gerais, Espírito Santo, sul e oeste Baiano, além dos

estados do Rio Grande do Norte e Ceará, caracterizando-se em relevante atividade econômica em nosso país. Em 2020, gerou uma receita de US\$ 3,74 milhões com a exportação de cerca de 3,79 mil toneladas (CONAB, 2021).

O Brasil possui uma área plantada de 18.568 hectares, em destaque para os estados da Bahia com 6.143 hectares plantados, o Espírito Santo com 5.502 hectares, Minas Gerais com 1.123 hectares, Rio Grande do Norte com 1.675 hectares e Ceará com 632 hectares (IBGE, 2017). Estima-se que o cultivo do mamoeiro seja conduzido irrigado, embora os dados da literatura sejam escassos quanto à área irrigada.

Ante ao exposto, objetivou-se com o presente trabalho desenvolver um sistema de aquisição de dados para medição de fluxo de seiva, pelo método do pulso de calor, por meio de sensores não incisivos, visando estimar a transpiração em folhas de mamoeiro em condições de casa de vegetação.

### **3.1.4 MATERIAL E MÉTODOS**

#### **3.1.4.1 DESENVOLVIMENTO DOS EQUIPAMENTOS**

Este trabalho foi desenvolvido no Laboratório de Engenharia Agrícola (LEAG) do Centro de Ciências e Tecnologias Agrícolas (CCTA) da Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro (UENF), localizado no município de Campos dos Goytacazes – RJ.

A plataforma para aquisição e armazenamento dos dados foi desenvolvida tendo seis unidades coletoras de dados, onde foram instalados os sensores de fluxo de seiva, e uma unidade armazenadora de dados. A comunicação entre as unidades ocorreu por intermédio de um sistema sem fio utilizando módulos transceptores de rádio.

### 3.1.4.1.1 Unidade armazenadora de dados de fluxo de seiva (UAD)

A unidade armazenadora de dados compreendeu uma caixa de PVC com as dimensões 150 x 150 x 120 mm, com a porta com vedação para evitar a entrada de água e poeira. Dentro desta unidade foram instalados os diversos componentes soldados em uma placa de circuito impresso (Figura 4). Os componentes desta unidade foram: o microcontrolador STM32, módulo transreceptor de dados, módulo de armazenamento em cartão SD, módulo transreceptor Bluetooth HC06, e regulador de voltagem.

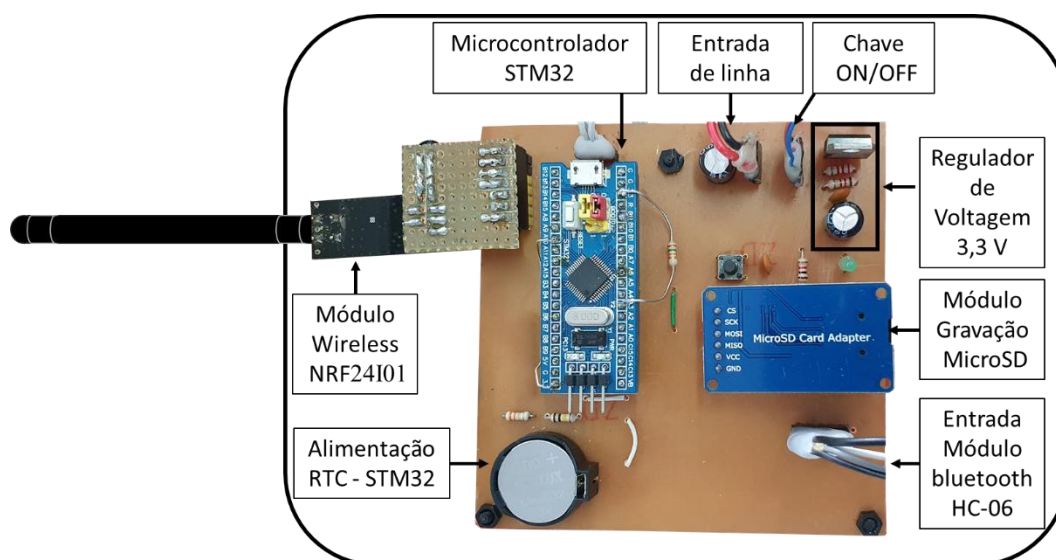


Figura 4. Protótipo da Unidade Armazenadora de Dados (UAD) com descrição dos componentes e módulos.

#### Microcontrolador STM32

O microcontrolador STM32 32-bit Arm® Cortex®-M de 72 MHz contém 64K de memória “flash” para armazenamento de programas, 20K de memória estática para acesso aleatório com 37 entradas e saídas de propósitos gerais (GPIO), 10 portas com conversores de sinais analógico/digital (ADC), duas interfaces com protocolo de comunicação tipo  $\dot{P}C$ , duas interfaces com protocolo SPI, e três interfaces com protocolo UART. Opera com voltagem 3,3 V. A programação desta unidade foi realizada utilizando a plataforma de acesso livre

Ambiente de Programação Integrado Arduino (Arduino IDE; <https://arduino.cc>). Os programas foram desenvolvidos em linguagem C++ adaptada para o Arduino, compilado, testado e transferido para o microcontrolador utilizando os recursos da plataforma Arduino IDE.

#### Módulo Transceptor de Dados

Módulo transceptor modelo Nrf24I01 tendo frequência de operação de 2,4 GHz a 2,525 GHz em 126 canais realizando a transmissão dos dados em pacotes de até 32 bytes. Funciona com alimentação de 1,9 V a 3,6 V. O módulo utilizado compreendia também uma antena externa modelo: L1-ANT2409 com ganho de sinal de 9 dBi, e faixa de frequência de trabalho entre 2.4 e 2.5 GHz. Para comunicação com o microcontrolador STM32 utiliza o protocolo de comunicação SPI. Neste módulo a comunicação é direta com até 6 outros módulos Nrf21I01, possui alcance médio de 100m em ambientes fechados, podendo ser estendido até 1km em ambientes abertos.

#### Módulo de Armazenamento de Dados em Cartão SD

A gravação dos dados recebidos foi realizada utilizando módulo gravador microSD de interface SDI com protocolo SPI para comunicação com o microcontrolador. As informações da data e horário em que era realizado a coleta e armazenamento dos dados foram fornecidas por um módulo interno do microcontrolador STM32 alimentados por bateria pilha tipo moeda de lítio CR3032 3 V. Utilizou-se um cartão com capacidade de 2 GM, gerando 1 arquivo no formato texto a cada 24 horas para cada estação.

#### Fonte de Alimentação

A alimentação elétrica de 5 V da unidade armazenadora foi regulada por intermédio de um módulo baseado no Regulador de Tensão LM317 com potência máxima de 1,5 A.

#### Procedimento para de aquisição de dados pela UAD

Esta unidade tem possibilidade de comunicação com até 6 outras unidades de coleta de dados. A comunicação com as outras unidades foram

programadas em duas etapas. Na primeira etapa, a unidade armazenadora envia um sinal de reconhecimento para uma determinada unidade coletora de dados, não havendo o reconhecimento o procedimento era repetido 3 vezes e, permanecendo o não reconhecimento, o processador mudava o endereço de transmissão para a próxima unidade coletora na ordem pré-programada. Havendo o reconhecimento, a próxima etapa era o envio de sinal para a unidade coletora para executar o procedimento de envio dos dados disponíveis e, após, procedia a recepção e o armazenamento dos dados juntamente com as informações de data e horário. A frequência de armazenamento dos dados foi de 3 minutos.

### 3.1.4.1.2 Unidade para medição de fluxo de seiva (USF)

Esta unidade tinha por finalidade gerir os procedimentos para a realizar a medição de fluxo de seiva nas plantas. Esta unidade foi constituída de uma unidade processadora baseada em Arduino NANO, uma unidade controladora de pulso elétrico, um módulo monitor de interrupção (Watchdog), um conjunto de dois sensores de fluxo de seiva, um módulo transreceptor para transmissão de dados e um módulo fonte de alimentação (Figura 5).

Os módulos transreceptor e fonte de alimentação foram elaborados de forma similar ao descrito anteriormente e utilizados na UAD.

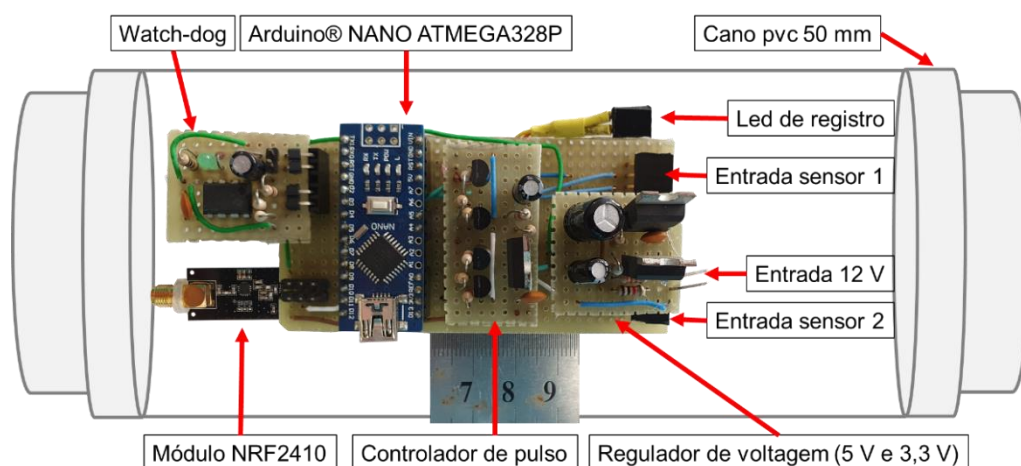


Figura 5. Unidade para medição de fluxo de seiva (USF), descrição de componente e módulos. Esta unidade gerenciava sensores de fluxo de seiva.

## Microcontrolador Arduino NANO

O módulo Arduino NANO baseia-se no processador ATmega328P (Atmel Corporation, San Jose, CA, USA) contém 32 KB memória para armazenamento de programas, 1 KB de memória não-volátil (EEPROM), 2 kB de memória estática para acesso aleatório (SRAM), 23 entradas/saídas digitais (GPIO), uma interface com protocolo I<sup>2</sup>C (Inter-Integrated Circuit), uma interface com protocolo SPI (Serial Peripheral Interface), portas seriais programáveis tipo USART (Universal Synchronous/Asynchronous Receiver-Transmitter), 6 canais com conversores analógico/digital de 10-bit (A/D). Opera com alimentação elétrica variando de 2,7 V a 5,5 V (datasheet). Este processador foi programado utilizando a plataforma IDE Arduino, descrita anteriormente.

## Módulo controlador de interrupção (Watchdog)

Este módulo tinha por finalidade prevenir a interrupção de funcionamento do microprocessador. Se, por alguma razão, o processador interrompesse o funcionamento por um tempo maior que 20 segundos o módulo Watchdog executava procedimento de reinicialização do sistema. Este módulo baseou-se no CI NE555.

## Módulo controlador de pulso

Para que o sensor procedesse a medição de fluxo de seiva era necessário a aplicação de pulso elétrico com corrente constante e em ciclos com períodos uniformes. Desta maneira, utilizou-se o CI LM317 para estabilização da corrente elétrica e o controle do período do pulso era realizado pelo processador. Foram utilizadas 2 portas digitais do processador para fornecerem a excitação a dois transistores comutadores tipo TIP32, um para cada sensor, respectivamente. O controlador de pulso foi configurado para emitir pulsos de energia com duração de 18s em intervalos de 180s.

### 3.1.4.1.3 Sensores de fluxo de seiva

No desenvolvimento dos cabeçotes contendo os sensores de fluxo de seiva, foram utilizados: Um resistor SMD de 100 ohms e dois termistores NTC SMD 10 k $\Omega$  a 25 °C, distribuídos equidistantes 1,5 mm sobre pinos machos, disponibilizados na seguinte ordem: 1º termistor SMD, 2º termistor SMD e 3º resistor SMD (Figura 6).

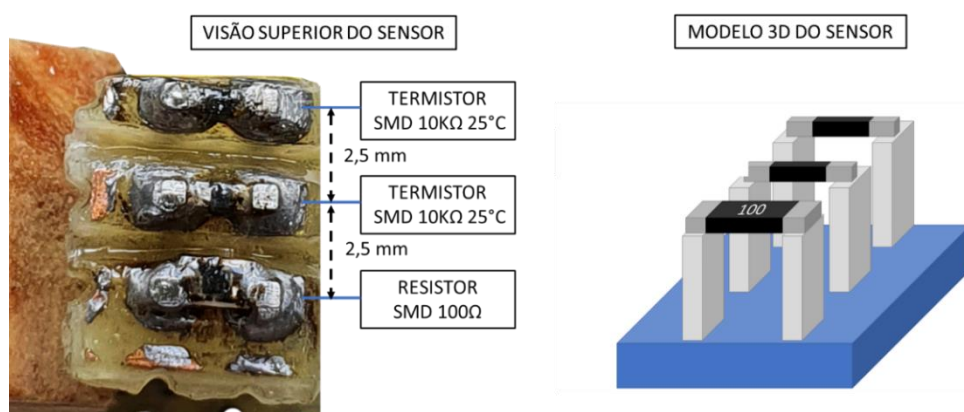


Figura 6. Protótipo de sensor de fluxo de seiva, disposição e descrição dos componentes.

Utilizou-se um módulo ADS1115 como conversor analógico/digital de 16 bits com tecnologia I<sup>2</sup>C (Adafruit), para conversão dos sinais analógicos provenientes dos transdutores de temperatura. O módulo ADS1115 foi instalado a 30 cm do sensor e conectados por cabo tipo manga de 6 vias. Para minimizar a ocorrência de ruídos elétricos, limitou-se a extensão do cabo de comunicação para 2 m de comprimento.

Exemplos da instalação de uma estação de fluxo de seiva e do sensor de fluxo de seiva no pecíolo da folha de mamoeiro, são observadas na Figura 7.

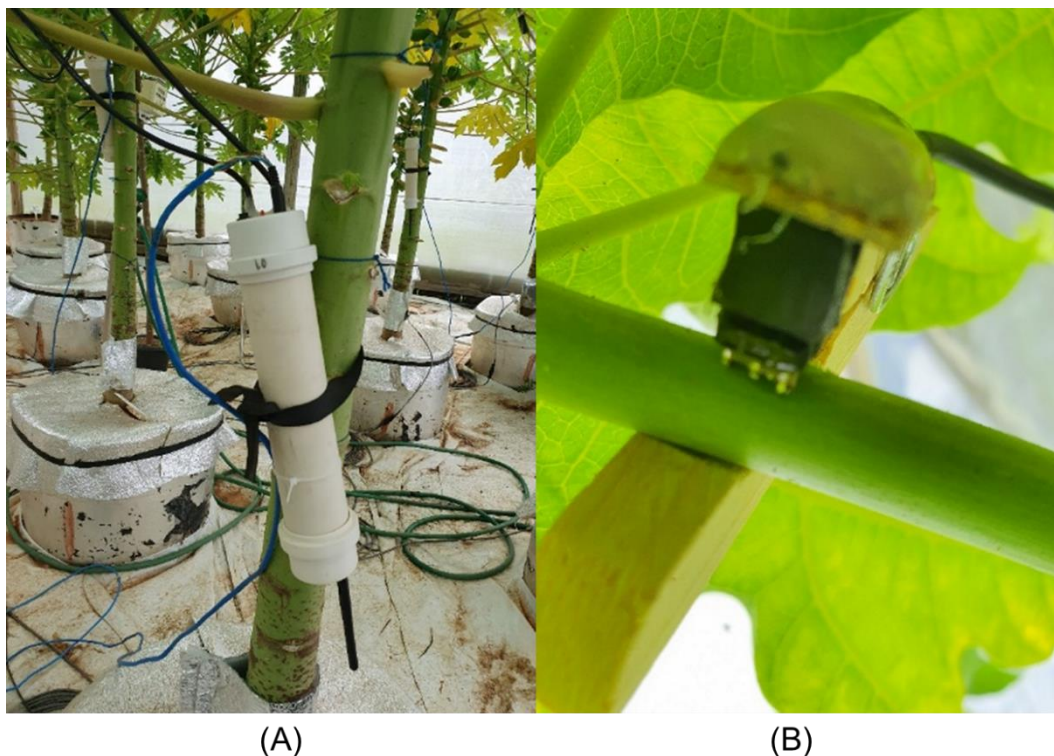


Figura 7. (A) Unidade de medição de fluxo de seiva instalada no caule do mamoeiro e (B) Sensor de fluxo de seiva, do tipo pinça.

#### 3.1.4.2 LOCAL DE REALIZAÇÃO DO TESTE DO SISTEMA COLETOR DE DADOS

O experimento foi conduzido em casa de vegetação, localizado na Unidade de Apoio a Pesquisa (UAP), pertencente à Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro – UENF, no município de Campos dos Goytacazes, no norte do estado do Rio de Janeiro. O referido local possui coordenadas geográficas: 21°45'40,5" de latitude sul e 41°17'20,0" de longitude oeste e 11m de altitude. Segundo a classificação Köppen, o clima se caracteriza como Aw. O experimento foi realizado no período de 01 de dezembro 2020 a 21 de dezembro de 2020, utilizando plantas com 210 dias após o plantio.



### 3.1.4.3 MEDIÇÃO DOS ELEMENTOS METEOROLÓGICOS

Durante o período de teste do sistema, foram medidos os valores de temperatura do ar ( $T_{ar}$ ), umidade relativa do ar ( $UR$ ) utilizando-se o registrador RHT10 (EXTECH®) em período de 30 min.

Nos cálculos para estimativa da demanda hídrica dentro da casa de vegetação, o valor da velocidade do vento ( $U_2$ ) foi fixado em  $1 \text{ m s}^{-1}$ .

Para estimativa do saldo de radiação absorvido pelas plantas ( $Rn$ ,  $\text{MJ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ ), foi utilizada a metodologia proposta por Angelocci et al. (2004), Pilau et al. (2007) e Pereira et al. (2014), denominado saldo integrado de radiação ( $Rn_{int}$ ). Para isto, utilizou-se dois saldos radiômetros da marca Kipp & Zonen®. Sendo o primeiro disposto abaixo do dossel, e a 1,5 m acima do nível do solo, foi denominado  $Rn_{gramado}$ . O segundo foi disposto a cerca de 1 m acima do dossel e denominado  $Rn_{acima}$ . Assim, o saldo integrado de radiação foi calculado como  $Rn_{int.} = (Rn_{acima} - Rn_{gramado})$  valor que representa o saldo de radiação absorvido pela planta.

Para estimação da demanda evapotranspirativa dentro da casa de vegetação, utilizou-se o método de Penman-Monteith FAO 56 (Allen et al., 1998) com os dados coletados de  $T_{ar}$ ,  $UR$  e  $Rn_{int}$ . Desta forma obteve-se a demanda evapotranspirativa local ( $DTL = ET_{0 \text{ ajustado}}$ , Equação 15).

$$DTL = \frac{0,408\Delta (Rn_{int}) + \gamma \frac{37}{T_{ar} + 273} U_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0,34 U_2)} \quad (15)$$

em que:

$DTL$  - Demanda evapotranspirativa horária,  $\text{mm h}^{-1}$ ;

$\Delta$  - Declividade da curva de saturação de vapor d'água ( $\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$ );

$Rn_{int}$  - Saldo de radiação integrado,  $\text{MJ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ ;

$\gamma$  - Constante psicrométrica,  $\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$ ;

$P$  - Pressão atmosférica,  $\text{kPa}$ ;

$T_{ar}$  - Temperatura do ar,  $^\circ\text{C}$ ;

$U_2$  - Velocidade do vento, fixado em  $1 \text{ m s}^{-1}$ ;

$e_s$  - Pressão de saturação de vapor d'água,  $\text{kPa}$  e

$e_a$  - Pressão atual de vapor d'água,  $\text{kPa}$ .

### 3.1.4.4 ESTIMATIVA DA VELOCIDADE DO FLUXO DE SEIVA

O cálculo da velocidade de fluxo de seiva foi realizado utilizando a metodologia proposta por Sousa et al. (2020), baseada na análise harmônica de séries de Fourier. Nesta metodologia, para cada ciclo de pulso de calor, eram calculadas as diferenças das fases ( $\varphi$ ) e dos logaritmos naturais das amplitudes ( $\alpha$ ) das harmônicas de primeira ordem, a partir dos dados de temperatura obtidos nos dois transdutores de temperatura de cada sensor. Com as diferenças calculadas, a velocidade de fluxo de seiva foi calculada utilizando-se a Equação 16.

$$J_s = \frac{2\pi(x_2 - x_1)}{T\varphi_0} \left[ \frac{\varphi_0}{\varphi} - \frac{\alpha}{\alpha_0} \right] \quad (16)$$

em que:

- $J_s$  - Velocidade do fluxo de seiva,  $m\ s^{-1}$ ;
- $x_2, x_1$  - Distâncias dos transdutores de temperatura em relação à fonte de calor, m;
- $T$  - Período do ciclo de pulso de calor, s;
- $\varphi_0$  - Diferença de fase das harmônicas de primeira ordem obtidas nos transdutores de temperatura para situação em que o valor de fluxo de seiva iguala a zero, rad;
- $\alpha_0$  - diferença entre os logaritmos naturais das amplitudes térmicas das harmônicas de primeira ordem obtidas nos transdutores de temperatura para situação em que o valor fluxo de seiva iguala a zero, adimensional;
- $\varphi$  - diferença de fase das harmônicas de primeira ordem obtidas nos transdutores de temperatura para situação em que o valor fluxo de seiva difere de zero, rad;
- $\alpha$  - diferença entre os logaritmos naturais das amplitudes térmicas das harmônicas de primeira ordem obtidas nos transdutores de temperatura para situação em que o valor fluxo de seiva difere de zero, adimensional;

A estimativa da transpiração pela folha ( $T_F$ ) foi obtida por intermédio da Equação 17.

$$T_F = J_s \frac{S_a}{AFE} \quad (17)$$

em que:

$T_F$  - Transpiração foliar,  $m^3 s^{-1}$  folha;

$S_a$  - Área da seção transversal do pecíolo onde estava instalado o cabeçote do sensor,  $m^2$  e

$AFE$  - Área foliar estimada,  $m^2$ .

### 3.1.4.5 A CULTURA DO MAMÃO

As plantas de mamoeiro utilizadas foram provenientes de sementes da cultivar 'Golden' (*Carica papaya* L.), que tem, como características principais, a apresentação de folhas em tons de verde-claro e maior resistência ao amarelecimento.

A semeadura em tubetes ocorreu em 04 de maio de 2020 e o transplante das plântulas para os vasos, com capacidade de 100 L, ocorreu em 04 de julho de 2020. O substrato utilizado foi classificado como franco-arenoso (argila = 19,67%, areia = 53,00% e silte = 27,33%) e composto por terra de subsolo, areia e matéria orgânica. Para evitar as perdas por evaporação do solo, os vasos foram cobertos com mantas compostas de camadas de lâminas de alumínio e bolhas de ar envoltos por filme de polietileno.

### 3.1.4.6 DELINEAMENTO EXPERIMENTAL

O delineamento experimental foi inteiramente randomizado, em esquema de parcelas subdivididas no tempo. As parcelas foram constituídas de níveis de reposição de evapotranspiração de cultura de 50% e 80% e as subparcelas foram constituídas pelos períodos de avaliação. As escolhas dos níveis de reposição de 50% e 80% visaram estabelecer valores diferenciados de fluxo de seiva nas plantas.

### 3.1.4.7 O MANEJO DE IRRIGAÇÃO

Utilizou-se de uma planta disposta sobre uma balança como referência para determinação do volume de água a ser aplicado por planta. O volume de água foi aplicado para cada planta (VC) foi calculado utilizando a Equação 18:

$$VC = \left( \frac{AFE_n \times \Delta P}{AFE_{referência}} \right) \frac{MI_n}{100} \quad (18)$$

em que:

VC - Volume de água a ser aplicado por planta, L;

$AFE_n$  - Área foliar de cada planta, m<sup>2</sup>;

$AFE_{referência}$  - Área foliar da planta de referência, m<sup>2</sup>;

$\Delta P$ : Volume transpirado calculado a partir da diferença entre o peso da planta de referência em capacidade de campo, e o peso ao final do dia, L, e

$MI_n$ : Porcentagem de reposição de cada tratamento, %.

A área foliar de cada planta foi estimada semanalmente, utilizando o modelo proposto por Posse et al. (2009) (Equação 19). Neste modelo, utiliza-se o número total de folhas do dossel foliar totalmente desenvolvidas (NF) e a média do comprimento da nervura central (CNC, em cm) das 2 últimas folhas (próximas ao solo) do dossel foliar.

$$AFE = [-89,6623 + (5,0328NF) + (4,9998NF(CNC)) - (7,5120CNC)]^{1,2607} \times 10^{-4} \quad (19)$$

O volume transpirado ( $\Delta P$ , L) foi medido diariamente às 17h00min, aqui traduzido como a diferença entre o peso da planta de referência em capacidade de campo (CC, P1) em relação ao peso medido no final do dia (P2), em que  $\Delta P = (P1 - P2)$ .

Para definir a capacidade de campo (CC), o primeiro passo foi definir o peso inicial do conjunto vaso-planta (Pin) por meio de balança digital da marca Amira modelo TCS 400, a este foi adicionando um volume de água conhecido (20 L), após o período de cessamento da percolação visível no vaso ( $\approx$  3 horas), a planta sendo novamente pesada (Pfim). Dada a relação de densidade da água, o volume de 20 L compreendidos a 20 Kg, a diferença entre o volume de água adicionado e volume de água retido, foi definido como a capacidade de campo.

Cabe ressaltar, que por se tratar de uma planta de rápido crescimento, a fim de sempre adequar o manejo ao estágio de desenvolvimento da planta, a capacidade de campo, foi estimada 1 vez por semana.

Os tratos culturais e fitossanitários, tais como limpeza da área, remoção de plantas invasoras foram reduzidos devido ao uso de cobertura plástica. As adubações seguiram a recomendação do manual de calagem e adubação para o estado do Rio de Janeiro (FREIRE et al., 2013).

### 3.1.4.8 ANÁLISE ESTATÍSTICA

Para análise da coerência dos valores de fluxo de seiva medidos pelos sensores com a demanda evapotranspirativa dentro da casa de vegetação, os dados de fluxo de seiva obtidos foram correlacionados com variáveis meteorológicas medidas simultaneamente. Relacionou-se o fluxo de seiva com dados de saldo de radiação ( $Rn_{int}$ ), déficit de pressão (DPV) e com a demanda transpirativa local (DTL).

A análise estatística foi realizada utilizando-se o software estatístico de código aberto R (R Core Team, 2020). Foram realizadas análises de normalidade pelo teste de Shapiro-Wilks a 5% de probabilidade estatística e de variância pelo teste F a 5%.

Os dados foram submetidos às análises de correlação de Pearson ( $r$ , Equação 20) que verifica a assimetria dos dados, o índice de Willmott (1981) ( $d$ , Equação 21) capaz de descrever a exatidão dos resultados, o índice de confiança e desempenho de Camargo e Sentelhas (1997) ( $c$ , Equação 22, Tabela 1).

$$r = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n \left( \frac{O_i - \bar{O}}{S_o} \right) \left( \frac{P_i - \bar{P}}{S_{P_i}} \right) \quad (20)$$

$$d = 1 - \left[ \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|P_i - \bar{O}| + |O_i - \bar{O}|)^2} \right] \quad (21)$$

$$cs = d \times c \quad (22)$$

em que:

$P_i$  - Valores estimados;  
 $O_i$  - Valores observados;  
 $n$  - Tamanho da amostra;  
 $S_o$  - Desvio amostral das observações;  
 $S_{P_i}$  - Desvio amostral dos valores estimados;  
 $\bar{O}$  - Média das observações e  
 $\bar{P}$  - Média dos valores estimados.

Tabela 1. Índice de confiança e desempenho de Camargo e Sentelhas (1997)

Classificação	Critério
Ótimo	$cs > 0,85$
Muito Bom	$0,76 \leq cs \leq 0,85$
Bom	$0,66 \leq cs \leq 0,75$
Mediano	$0,61 \leq cs \leq 0,65$
Sufrível	$0,51 \leq cs \leq 0,60$
Mau	$0,41 \leq cs \leq 0,50$
Péssimo	$cs \leq 0,40$

Para a elaboração dos gráficos, dentro do ambiente, foram utilizados os pacotes “ggplot2” (Wickham, 2016), “scales” (Wickham e Seidel, 2020), “lubridate” (Grolemund e Wickham, 2011), “viridis” (Garnier, 2018), “ggmisc” (Aphalo, 2021) e “tidyverse” (Wickham et al., 2019).

### 3.1.5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Cabe ressaltar, que é possível ainda, que o microcontrolador, possa ser programado para leituras conjuntas por meio da adição de sensores transdutores de temperatura, umidade relativa do ar (HTU21D), e pressão atmosférica (BMP180), além de sistema de posicionamento global (gps, GY-NEO6MV2), de valores de precipitação por meio de pluviômetros de balança digital (PB10) e mini anemômetros digitais com leituras de sinais por meio de *reed switc*. Neste caso, é possível a programação de código que permite o cálculo da evapotranspiração de referência ( $ET_0$ ) pelo método padrão (FAO 56) de Penman-Monteith (Allen et al., 1998) diretamente nos DAS, tornando um sistema autônomo de aquisição de dados de ( $ET_0$ ).

Os valores do saldo de radiação integrado ( $R_n$ ), temperatura do ar (Temp.) e umidade relativa do ar (UR) para os ambientes: externo e interno da casa de vegetação, são apresentados na Figura 8. Os valores de déficit de pressão de vapor d'água ( $DPV$ ), evapotranspiração de referência ( $ET_0$ ) para os ambientes externos e internos da casa de vegetação e a transpiração foliar ( $T_F$ ) são apresentados na Figura 9.

Os valores para radiação solar integrada (Figura 8) estimados para o ambiente interno da casa de vegetação apresentaram variações de  $-0,0361 \text{ MJ m}^2 \text{ h}^{-1}$  a  $2,78 \text{ MJ m}^2 \text{ h}^{-1}$ .

Em relação aos dados de temperatura do ar (Figura 8) os valores médios horários para as condições de ambiente externo da casa de vegetação variaram de  $20,2 \text{ }^\circ\text{C}$  a  $34,6 \text{ }^\circ\text{C}$ . Os valores obtidos para o ambiente interno da casa de vegetação variaram de  $20,6 \text{ }^\circ\text{C}$  a  $50,4 \text{ }^\circ\text{C}$ . Demonstrando que em alguns momentos do dia, a temperatura interna da casa de vegetação era superior em  $20 \text{ }^\circ\text{C}$  a temperatura do ambiente externo da casa de vegetação. Este aumento pode estar correlacionado à limitação da circulação do vento no ambiente interno da casa de vegetação, bem como, da cobertura refletiva no solo, a fim de maximizar a disponibilização de radiação solar difusa no ambiente para a planta.

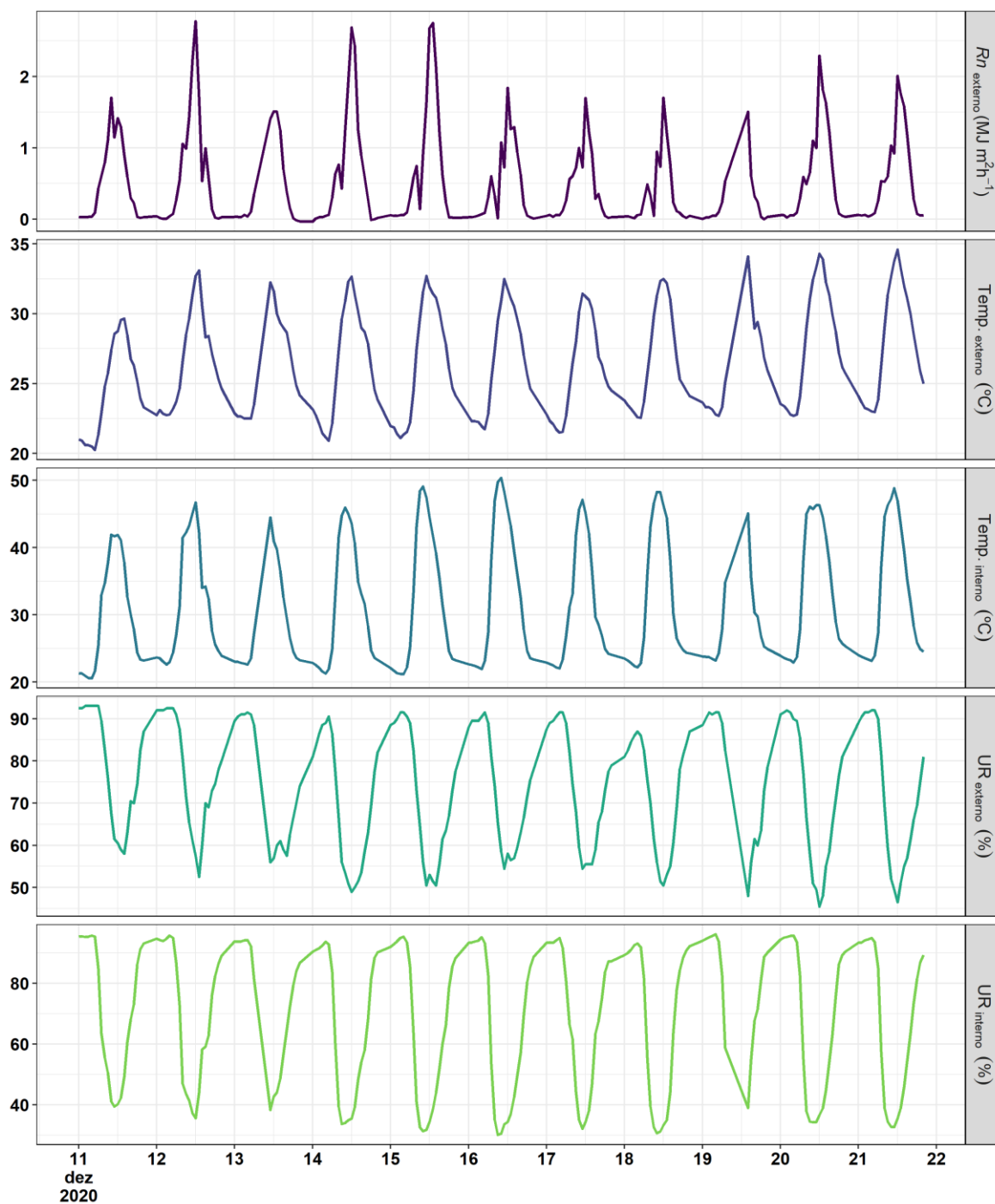


Figura 8. Valores de dados de tempo para as variáveis: saldo de radiação ( $Rn$ ), temperatura do ar ( $\text{Temp.}$ ) e umidade relativa do ar ( $\text{UR}$ ) em condições de ambiente externo e interno da casa de vegetação.

Os valores para radiação solar integrada (Figura 8) estimados para o ambiente interno da casa de vegetação apresentaram variações de  $-0,0361 \text{ MJ m}^2 \text{ h}^{-1}$  a  $2,78 \text{ MJ m}^2 \text{ h}^{-1}$ .



Em relação aos dados de temperatura do ar (Figura 8) os valores médios horários para as condições de ambiente externo da casa de vegetação variaram de 20,2 °C a 34,6 °C. Os valores obtidos para o ambiente interno da casa de vegetação variaram de 20,6 °C a 50,4 °C. Demonstrando que em alguns momentos do dia, a temperatura interna da casa de vegetação era superior em 20 °C a temperatura do ambiente externo da casa de vegetação. Este aumento pode estar correlacionado à limitação da circulação do vento no ambiente interno da casa de vegetação, bem como, da cobertura refletiva no solo, a fim de maximizar a disponibilização de radiação solar difusa no ambiente para a planta.

Segundo Knight (1980), o mamoeiro tem ótimo crescimento e desenvolvimento em temperaturas do ar entre 21 °C e 33 °C. O mamoeiro é sensível a baixas temperaturas, tendo efeito na qualidade dos frutos e apresentar carpeloidia (Ogden et al., 1981; Wolfe e Lynch, 1940; Almeida et al., 2003; Galán Saúco e Rodríguez Pastor, 2007). Porém, eventos abaixo de 20 °C foram escassos. O que ocorreu com maior frequência foi a ocorrência de temperaturas do ar acima de 33 °C. Temperaturas acima desse limite ocorreram em todos os dias do experimento entre 10h00min e 15h00min. Desta forma, o ambiente da casa de vegetação proporcionou temperaturas elevadas além dos limites indicados para a cultura do mamoeiro.

Os valores de umidade relativa do ar (UR, Figura 8), variaram de 45,5% a 93,0% para as condições de ambiente externo da casa de vegetação, e de 30,1% a 96,1% para as condições de ambiente interno da casa de vegetação.

O ambiente interno apresentou uma maior amplitude de dados em relação à umidade relativa do ar, comportamento observado também ao se comparar a temperatura do ar, o que pode ser indicativo das diferenças em relação aos dados de déficit de pressão de vapor d'água (*DPV*) apresentado na Figura 9.

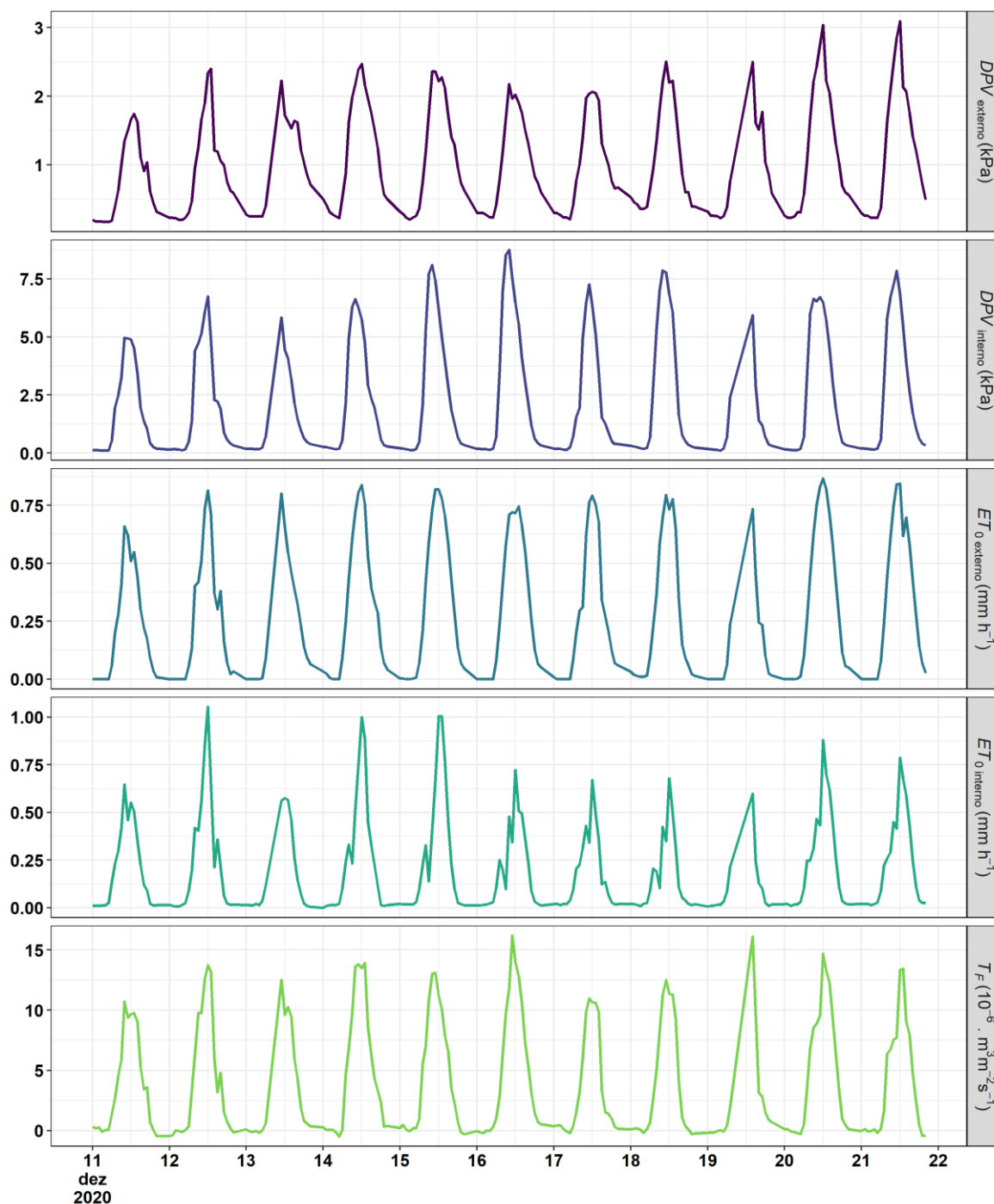


Figura 9. Valores horários para as variáveis: déficit de pressão de vapor d'água (DPV), evapotranspiração de referência (ET<sub>0</sub>) para condições de ambiente externo e interno da casa de vegetação e valores de transpiração foliar de mamoeiro para as condições internas na casa de vegetação.

Os valores de *DPV* (Figura 9) variaram de 0,167 kPa a 3,09 kPa para as condições de ambiente externo da casa de vegetação, e de 0,104 kPa a 8,76 kPa para as condições de ambiente interno da casa de vegetação. As diferenças nos

valores, como já citado, devem-se em grande parte por conta de o ambiente interno apresentar além de uma maior temperatura em alguns momentos, uma menor umidade relativa do ar, haja vista que a relação entre UR e DPV é inversamente proporcional.

Os valores de evapotranspiração de referência ( $ET_0$ , Figura 9) obtidos com base nos dados dos ambientes externos e internos da casa de vegetação, para o período avaliado, apresentou valores variando de  $0 \text{ mm h}^{-1}$  a  $0,866 \text{ mm h}^{-1}$  para os ambientes externos e  $0 \text{ mm h}^{-1}$  a  $1,05 \text{ mm h}^{-1}$  para o ambiente interno.

Na Figura 10 pode-se observar o comportamento das variáveis  $DPV$  e  $ET_0$ , em função do ambiente e externo da casa de vegetação.

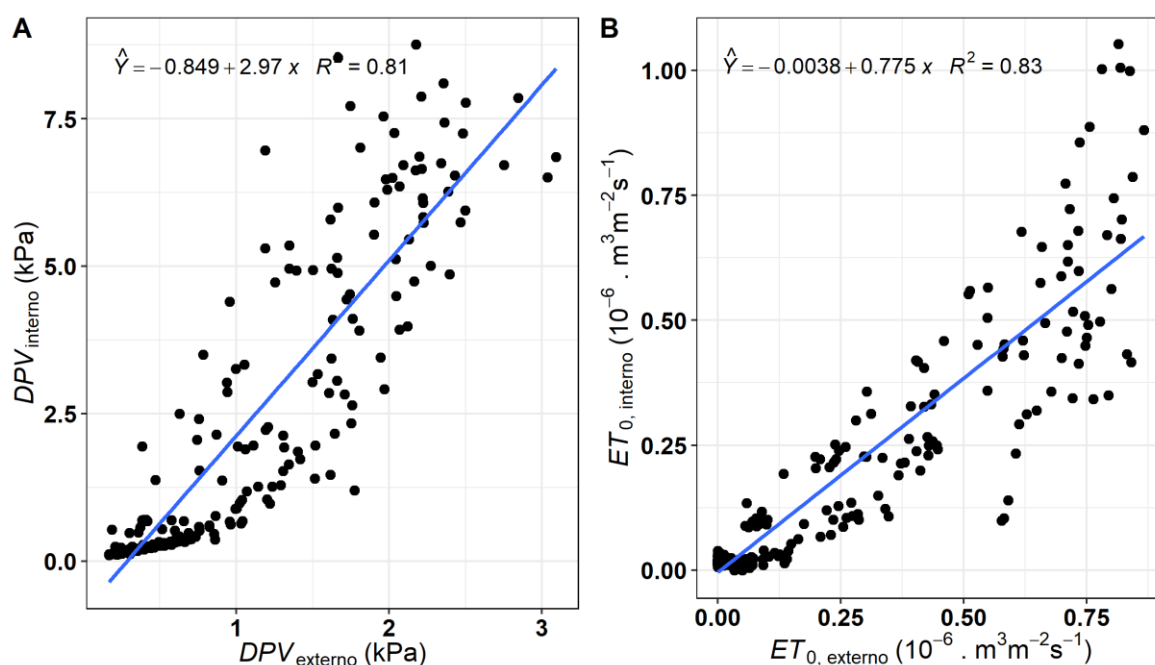


Figura 10. Relações entre: (A) valores de déficit de pressão de vapor ( $DPV$ ), (B) valores de evapotranspiração de referência ( $ET_0$ ), para condições de ambiente externo e interno da casa de vegetação.

Como observado na Figura 9 os valores de  $DPV$  para as condições internas da casa de vegetação foram superiores quando comparados aos valores das condições externas da casa de vegetação. Neste caso é possível afirmar que o valor de  $DPV$  interno chega a ser 2,97 maior que o valor do  $DPV$  externo. Como já explicado, isto ocorre pelo fato de o ambiente interno da casa de vegetação ter

apresentado valores UR (Figura 8) inferiores aos valores de UR do ambiente externo, além de uma maior temperatura (Figura 8).

Maiores valores de DPV implica em diminuição das taxas de transpiração na planta e como consequência diminuição das taxas de condutância estomática (Gs) (Xu e Shen, 2005).

Em geral o ambiente interno apresentou uma taxa de evapotranspiração 22% menor que do ambiente externo, ou seja, considerando uma cultura hipotética de referência, como gramas batatais, nos dois ambientes (externo e interno) da casa de vegetação, a cultura instalada no ambiente externo tem a capacidade de transpirar 22% a mais do que a mesma cultura instalada dentro da casa de vegetação. Segundo Saúco e Pastor (2007) os ambientes de casa de vegetação implicam em uma redução de 25% da taxa de evapotranspiração, em relação aos ambientes externos.

Para aquisição dos equipamentos, foi realizada cotação de preços, nos principais sites de vendas de componentes eletrônicos brasileiros. Os valores médios dos componentes utilizados estão disponibilizados nos Apêndices A, B, C, nas Tabelas 5, 6 e 7 os valores totais, referente ao levantamento de preços realizado no mês de agosto de 2020 são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2. Levantamento de custos totais de componentes para montagem dos equipamentos

Descrição	Quantidade	Valor unitário	Valor Total
Unidade de Armazenamento de Dados (UAD)	1	R\$ 215,42	R\$ 215,42
Estações wireless de fluxo de seiva (EWSF)	5	R\$ 257,10	R\$ 1.285,50
<b>Total</b>			<b>R\$ 1.500,91</b>

Considerando apenas os custos com componentes, cada unidade de medição de fluxo de seiva (USF) teve um custo médio de R\$ 257,10 (Tabela 1). Cabe ressaltar que sobre esse custo, não estão inseridos os custos com frete, nem os custos das cápsulas em cano PVC de 50 mm, bem como dos cabos de alimentação das estações conectados à fonte de alimentação central.

Na Figura 11 são apresentados os modelos da evapotranspiração de referência ( $ET_0$ ) e do déficit de pressão de vapor (DPV) com base na taxa de transpiração foliar.

Os valores de velocidade de fluxo de seiva, convertidos para  $Lh^{-1}m^{-2}$ , variaram de  $-0,174 Lh^{-1}m^{-2}$  a  $2,018 Lh^{-1}m^{-2}$ , para o período avaliado. Reis et al. (2009) trabalhando com a cultivar 'Golden' testando o efeito da irrigação por microaspersão sobre a copa do mamoeiro, sobre as respostas estomáticas e de fluxo de seiva, observaram valores máximos de velocidade de fluxo de seiva  $3 Lh^{-1}m^{-2}$ , por meio de sensores do tipo Granier por dissipação térmica.

Os modelos de ajuste (Figura 11) com base nos valores da transpiração foliar ( $T_F$ ) apresentaram fortes correlações positivas quando buscou-se estimar os valores de DPV e  $ET_0$  para os dois ambientes experimentais.

Ao se estimar os valores  $T_F$  ( $10^{-6} m^3m^{-2}s^{-1}$ ) em função dos valores de DPV (kPa) para condições de ambiente externo da casa de vegetação (Figura 8A), o modelo de ajuste apresentou coeficiente de determinação com 86% ( $R^2$ ) com a capacidade de explicar o comportamento da  $T_F$  em função do DPV. Além disso, os valores ajustados, apresentaram correlação positiva muito forte ( $r \approx 0,93$ ), o valor do índice de Willmott (d) ficou acima de 0,75, e o modelo foi classificado segundo o índice de confiança e desempenho de Camargo e Sentelhas como "bom" ( $0,66 \leq cs \leq 0,75$ ). Para as condições de ambiente interno da casa de vegetação (Figura 11B) o modelo de ajuste demonstrou capacidade de explicar até 85% do comportamento de  $T_F$  com base nos valores de DPV, assim como o modelo anterior (Figura 11A) o modelo com base no DPV para o ambiente interno da casa de vegetação, apresentou correlação positiva muito forte ( $r \approx 0,91$ ) sendo classificado de acordo com Camargo e Sentelhas como "bom" ( $0,65 \leq cs \leq 0,75$ ).

Quando buscou-se correlacionar os valores de  $T_F$  ( $10^{-6} m^3m^{-2}s^{-1}$ ) em função  $ET_0$  ( $mm h^{-1}$ ) (Figura 11C, 11D), o modelo de ajuste de  $T_F$  em função da  $ET_0$  para condições de ambiente externo (Figura 11C), apresentou capacidade de explicar até 85% dos resultados de  $T_F$  com base nos valores  $ET_0$ , com índice de desempenho e confiança de Camargo e Sentelhas de 0,75 o que o classifica como "bom" ( $0,66 \leq cs \leq 0,75$ ).

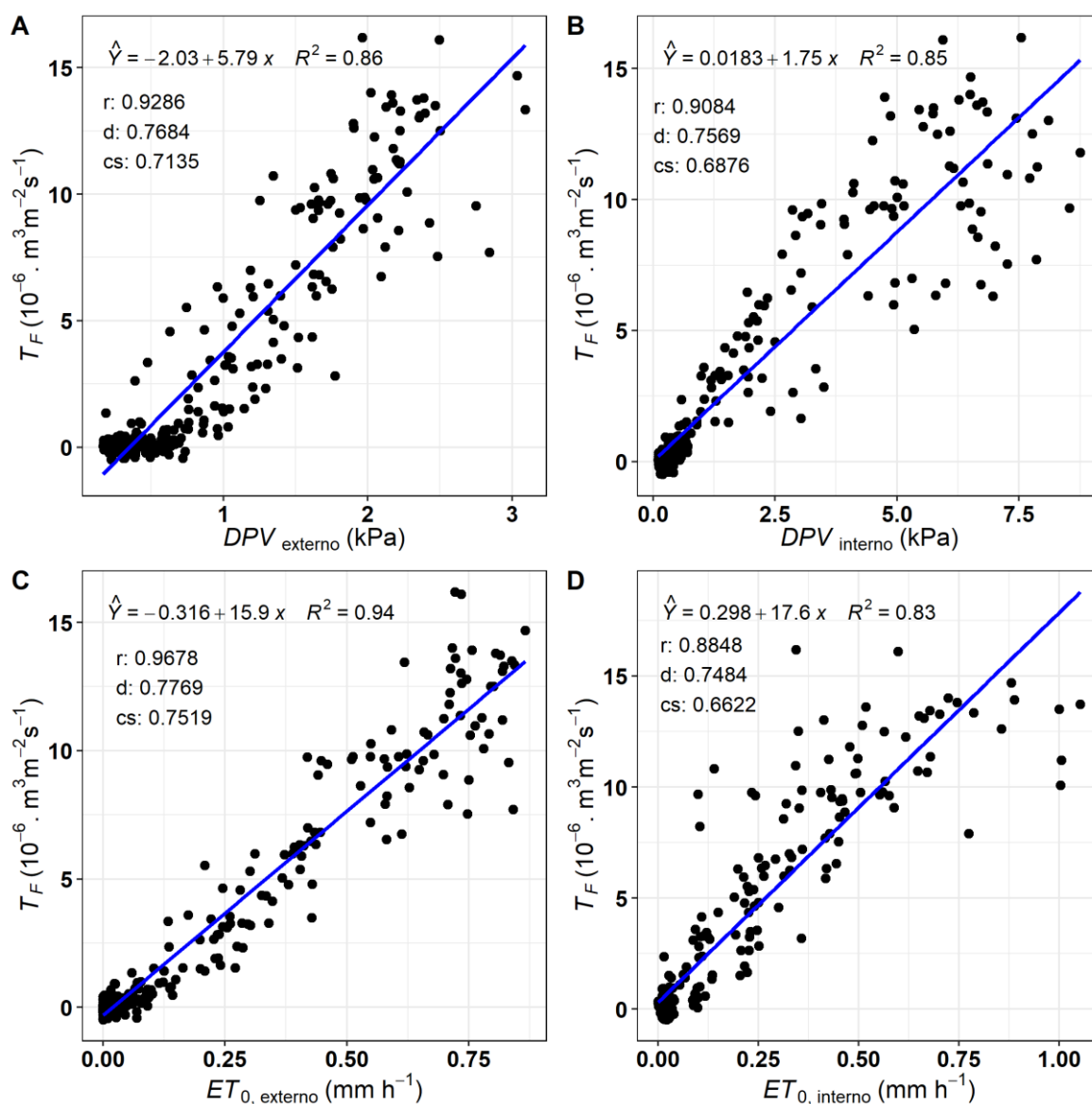


Figura 11. Modelo de ajuste e seus respectivos coeficientes de determinação ( $R^2$ ), de correlação ( $r$ ), índices de Wilmott ( $d$ ) e confiança e desempenho de Camargo e Sentelhas ( $cs$ ), comparando: (A) taxa de transpiração foliar ( $T_F$ ) em função do déficit de pressão de vapor (DPV) para condições de ambiente externo, (B)  $T_F$  vs DPV para condições de ambiente interno da casa de vegetação, (C)  $T_F$  em função da evapotranspiração de referência ( $ET_0$ ) para condições de ambiente externo e (D)  $T_F$  vs ( $ET_0$ ) em condições de ambiente interno da casa de vegetação.

Correlacionando os dados de  $T_F$  em função da  $ET_0$  para condições de ambiente interno (Figura 11D), o modelo de ajuste apresentou correlação positiva forte ( $r \approx 0,88$ ) demonstrando boa precisão do modelo, além disso o modelo de ajuste apresentou a capacidade de explicar até 83% do comportamento de  $T_F$  em função da  $ET_0$  para condições de ambiente interno, sendo classificado segundo índice de confiança de Camargo e Sentelhas como “bom” ( $0,65 \leq cs \leq 0,75$ ).

Os 4 modelos de ajuste de  $T_F$  apresentaram, fortes correlações positivas ( $r > 0,85$ ) o que indica boa precisão dos valores observados, como também valores elevados do índice de Willmott (d) o que indica boa concordância e ou acurácia dos valores observados. Além disso todos os 4 modelos para estimar a  $T_F$  (Figura 11A, 11B, 11C e 11D) foram classificados como “bons” segundo o índice de confiança e desempenho de Camargo e Sentelhas ( $0,65 \leq cs \leq 0,75$ ), condizentes com valores encontrados na literatura para um bom modelo de ajuste.

Van de Put et al. (2020) desenvolveram o que eles denominaram de sensor ExoBeat, para determinação de velocidades de fluxo de seiva, pelo método de razão de calor (HRM), testando diferentes intervalos de pulsos 60s a 100s, duração de pulsos, em plantas de Figueira-Benjamim (*Ficus benjamina* L.), como termistores espaçados a 3mm para hastes variando de 2 a 4 mm e potências de calor  $\approx 0,09$  W a 0,49 W, obteve modelos de ajuste com correlações (r) variando de 0,63 a 0,96.

Venturin et al. (2020), trabalhando com cafeeiro Conilon, conseguiram estimar valores de velocidade de fluxo de seiva com base em dados de evapotranspiração de referência com coeficientes de determinação variando de ( $R^2$ ) 0,42 a 0,83, em função do manejo de irrigação, bem como coeficientes de correlação (r)  $\approx 0,65$  a 0,90.

Analisando o sensor, a estimação do fluxo de seiva corrobora com a fundamentação matemática desenvolvida. O desafio é elaborar um sensor que operacionalmente seja fácil de instalar, que possa ser isolado da influência do ambiente externo e que tenha um contato adequado com o tecido vegetal.

### 3.1.6 CONCLUSÃO

Os sensores são capazes de identificar as velocidades de fluxo de seiva, em pecíolos de mamão, pelo método do pulso de calor. Apresentando forte

correlação positiva com relação ao déficit de pressão de vapor d'água e a evapotranspiração de referência local, tanto para plantas com bom nível de hidratação, quanto para plantas em estresse.

A versatilidade dos sensores permite seu uso em diversas estruturas vegetais de uma planta, podendo ser aplicado, a ramos, pecíolos e até em nervuras centrais de alguns vegetais.

A presença de valores negativos para a transpiração foliar, indicam que o sensor é capaz de identificar também os fluxos reversos de seiva.

O equipamento mostrou-se como alternativa, nos estudos sobre as características hidráulicas nas plantas, de baixo custo.

Os custos totais, envolvidos na aquisição e montagem dos sistemas, foram relativamente baixos, quando comparados a modelos comerciais com o mesmo número de sensores.

Ao irrigante, os sistemas wireless de aquisição de dados de fluxo de seiva, pelo método do pulso de calor, mostrou-se uma ferramenta capaz de estimar a transpiração da cultura, auxiliando-o na tomada de decisão de quando e quanto irrigar.

### 3.1.7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., Smith, M. (1998) Crop evapotranspiration-Guidelines for computing crop water requirements-FAO *Irrigation and drainage paper* 56, Roma. 300(56):15-79. <http://www.kimberly.uidaho.edu/water/fao56/fao56.pdf>.
- Almeida, F. T. de, Marinho, C. S., Sousa, E. F. de, Grippa, S. (2003) Expressão sexual do mamoeiro sob diferentes lâminas de irrigação na Região Norte Fluminense. *Revista Brasileira de Fruticultura*, 25(3):383-385. <https://doi.org/10.1590/S0100-29452003000300005>.
- Angelocci, L. R., Villa Nova, N. A., Coelho Filho, M. A., Marin, F. R. (2004) Measurements of net radiation absorbed by isolated acid lime trees (*Citrus latifolia* Tanaka). *Journal of Horticultural Science and Biotechnology*, 79(5):699-703. <https://doi.org/10.1080/14620316.2004.11511829>.



- Aphalo, P. J. (2021) *ggpmisc: Miscellaneous Extensions to "ggplot2."*  
<https://cran.r-project.org/package=ggpmisc>.
- Baiamonte, G., Motisi, A. (2020) Analytical approach extending the Granier method to radial sap flow patterns. *Agricultural Water Management*, 231(10):105988. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2019.105988>.
- Baker, J. M., Van Bavel, C. H. M. (1987) Measurement of mass flow of water in the stems of herbaceous plants. *Plant, Cell & Environment*, 10(9), 777–782. <https://doi.org/10.1111/1365-3040.ep11604765>.
- Burgess, S. S. O., Adams, M. A., Turner, N. C., Beverly, C. R., Ong, C. K., Khan, A. A. H., Bleby, T. M. (2001) Erratum: An improved heat pulse method to measure low and reverse rates of sap flow in woody plants, *Tree Physiology*, 21(15):589-598.
- Camargo, A. P. de, Sentelhas, P. C. (1997) Performance evaluation of different potential evapotranspiration estimating methods in the State of São Paulo, Brazil. In *Revista Brasileira de Agrometeorologia*, 5(1):89-97. [http://www.leb.esalq.usp.br/agmfacil/artigos/artigos\\_sentelhas\\_1997/1997\\_RB\\_Agro\\_5\(1\)\\_89-97\\_ETPM%E9todosSP.pdf](http://www.leb.esalq.usp.br/agmfacil/artigos/artigos_sentelhas_1997/1997_RB_Agro_5(1)_89-97_ETPM%E9todosSP.pdf).
- Čermák, J., Deml, M., Penka, M. (1973) A new method of sap flow rate determination in trees. *Biologia Plantarum*, 15(3), 171–178. <https://doi.org/10.1007/bf02922390>.
- Čermák, J., Kučera, J., Nadezhdina, N. (2004) Sap flow measurements with some thermodynamic methods, flow integration within trees and scaling up from sample trees to entire forest stands. *Trees - Structure and Function*, 18(5), 529–546. <https://doi.org/10.1007/s00468-004-0339-6>.
- Clearwater, M. J., Luo, Z., Mazzeo, M., Dichio, B. (2009) An external heat pulse method for measurement of sap flow through fruit pedicels, leaf petioles and other small-diameter stems. *Plant, Cell and Environment*, 32(12), 1652–1663. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3040.2009.02026.x>.
- Cohen, Y., Fuchs, M., Green, G. C. (1981). Improvement of the heat pulse method for determining sap flow in trees. *Plant, Cell & Environment*, 4(5), 391–397. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3040.1981.tb02117.x>.
- CONAB. (2021) *Companhia Nacional de Abastecimento: Boletim Hortigranjeiro* (Vol. 7).
- Daum, C. R. (1967) A Method for Determining Water Transport in Trees. *Ecology*, 48(3), 425–431. <https://doi.org/10.2307/1932677>.
- Do, F. C., Isarangkool, N. A. S., Rocheteau, A. (2011) Transient thermal dissipation method for xylem sap flow measurement: Implementation with a single probe. *Tree Physiology*, 31(4), 369–380. <https://doi.org/10.1093/treephys/tpr020>.
- Do, F. C., Rocheteau, A. (2002) Influence of natural temperature gradients on measurements of xylem sap flow with thermal dissipation probes. 1. Field

- observations and possible remedies. *Tree Physiology*, 22(9), 641–648. <https://doi.org/10.1093/treephys/22.9.641>.
- Flo, V., Martínez-Vilalta, J., Steppe, K., Schuldt, B., Poyatos, R. (2019) A synthesis of bias and uncertainty in sap flow methods. *Agricultural and Forest Meteorology*, 271(March), 362–374. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2019.03.012>.
- Freire, L. R., Balieiro, F. de C., Zonta, E., dos Anjos, L. H. C., Pereira, M. G., Lima, E., Guerra, J. G. M., Ferreira, M. B. C., Leal, M. A. de A., Campos, D. V. B. de, Polidoro, J. C. (2013) *Manual de calagem e adubação*. Brasília: Embrapa; Seropédica, RJ: Universidade Rural, 430p.
- Fuchs, S., Leuschner, C., Link, R., Coners, H., Schuldt, B. (2017) Calibration and comparison of thermal dissipation, heat ratio and heat field deformation sap flow probes for diffuse-porous trees. *Agricultural and Forest Meteorology*, 244-245:151-161. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2017.04.003>.
- Galán Saúco, V., Rodríguez Pastor, M. A. C. (2007) GREENHOUSE CULTIVATION OF PAPAYA. *Acta Horticulturae*, 740:191-195. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2007.740.22>.
- Garnier, S. (2018) *Viridis: Default Color Maps from "matplotlib."* <https://cran.r-project.org/package=viridis>.
- Granier, A. (1985) Une nouvelle méthode pour la mesure du flux de sève brute dans le tronc des arbres. *Annales Des Sciences Forestières*, 42(2):193-200. <https://doi.org/10.1051/forest:19850204>.
- Grolemund, G., Wickham, H. (2011) Dates and Times Made Easy with lubridate. *Journal of Statistical Software*, 40(3):1-25. <http://www.jstatsoft.org/v40/i03/>.
- IBGE. (2017) *Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, Censo Agropecuário*. Censo Definitivo 2017. <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/pesquisa/24/76693>.
- Knight, R. J. (1980) Origin and world importance of tropical and subtropical fruit crops. In S. Nagy & S. P. E. (Eds.), *Tropical and subtropical fruits: composition, properties and uses*. AVI Publishing Co., Inc.
- López-Bernal, Á., Testi, L., Villalobos, F. J. (2017) A single-probe heat pulse method for estimating sap velocity in trees. *The New Phytologist*, 216(1), 321–329. <https://doi.org/10.1111/nph.14694>.
- Mares, R., Barnard, H. R., Mao, D., Revil, A., Singha, K. (2016) Examining diel patterns of soil and xylem moisture using electrical resistivity imaging. *Journal of Hydrology*, 536, 327–338. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.03.003>.
- Marshall, D. C. (1958) Measurement of Sap Flow in Conifers by Heat Transport. *Plant Physiology*, 33(6), 385–396. <https://doi.org/10.1104/pp.33.6.385>.
- Nadezhdina, N. (2018) Revisiting the heat field deformation (HFD) method for measuring sap flow. *IForest*, 11(1), 118–130. <https://doi.org/10.3832/ifor2381-011>.

- Ogden, M. A. H., Jackson, L. K., Fas, I., Campbell, C. W. (1981) FLORIDA TROPICAL FRUIT CULTURE VIA MASTER GARDENER. 222–225.
- Pearsall, K. R., Williams, L. E., Castorani, S., Bleby, T. M., Mcelrone, A. J. (2014) Evaluating the potential of a novel dual heat-pulse sensor to measure volumetric water use in grapevines under a range of flow conditions. *Functional Plant Biology*, 41(8), 874–883. <https://doi.org/10.1071/FP13156>.
- Pereira, A. B., Villa Nova, N. A., Pires, L. F., Angelocci, L. R., Beruski, G. C. (2014) Estimation method of grass net radiation on the determination of potential evapotranspiration. *Meteorological Applications*, 21(2), 369–375. <https://doi.org/10.1002/met.1346>.
- Pilau, F. G., Angelocci, L. R., Scarpore Filho, J. A. (2007) Radiation balance of an orange tree in orchard and its relation with global solar radiation and grass net radiation. *Revista Brasileira de Agrometeorologia*, 257–266.
- Posse, R. P., Sousa, E. F. de, Bernardo, S., Pereira, M. G., Gottardo, R. D. (2009) Total leaf area of papaya trees estimated by a nondestructive method. *Scientia Agricola*, 66(4), 462–466. <https://doi.org/10.1590/S0103-90162009000400005>.
- Poyatos, R., Granda, V., Molowny-Horas, R., Mencuccini, M., Steppe, K., Martínez-Vilalta, J. (2016) SAPFLUXNET: Towards a global database of sap flow measurements. *Tree Physiology*, 36(12), 1449–1455. <https://doi.org/10.1093/treephys/tpw110>.
- R Core Team. (2020) R: A Language and Environment for Statistical Computing. <https://www.r-project.org/>.
- Reis, F. de O., Campostrini, E., Sousa, E. F. de. (2009) Fluxo de seiva xilemática em mamoeiro “Golden” cultivado por microaspersão sobre copa: relações com as variáveis ambientais. *Bragantia*, 68(2), 285–294. <https://doi.org/10.1590/S0006-87052009000200001>.
- Saúco, V. G., Pastor, M. C. R. (2007) Greenhouse cultivation of papaya. *Acta Horticulturae*, 740, 191–196.
- Sousa, E. F. de, Santolin, M. A., Do, F. C. (2020) Estimation of steady water flux density in a porous medium by Fourier analysis of temperature variations in a cyclic heat pulse system. *Acta Horticulturae*, 1300, 187–192. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2020.1300.24>.
- Steppe, K., Pauw, D. J. W. De, Doody, T. M., Teskey, R. O. (2010) Agricultural and Forest Meteorology A comparison of sap flux density using thermal dissipation, heat pulse velocity and heat field deformation methods. *Agricultural and Forest Meteorology*, 150(7–8), 1046–1056. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2010.04.004>.
- Steppe, K., Vandegehuchte, M. W., Tognetti, R., Mencuccini, M. (2015) Sap flow as a key trait in the understanding of plant hydraulic functioning. *Tree Physiology*, 35(4), 341–345. <https://doi.org/10.1093/treephys/tpv033>

- Swanson, R. H., Whitfield, W. A. (1981) A Numerical Analysis of Heat Pulse Velocity Theory and Practice. *Journal of Experimental Botany*, 32(126), 221–239.
- Testi, L., Villalobos, F. J. (2009) New approach for measuring low sap velocities in trees. *Agricultural and Forest Meteorology*, 149(3–4), 730–734. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2008.10.015>.
- Van de Put, H., De Pauw, D. J. W., Steppe, K. (2020) Evaluation and optimization of a 3D-printed external heat pulse sensor. *Computers and Electronics in Agriculture*, 173, 105413. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2020.105413>.
- Vandeghechuchte, M. W., Burgess, S. S. O., Downey, A., Steppe, K. (2015) Influence of stem temperature changes on heat pulse sap flux density measurements. *Tree Physiology*, 35(4), 346–353. <https://doi.org/10.1093/treephys/tpu068>.
- Vandeghechuchte, M. W., Steppe, K. (2012) Use of the correct heat conduction-convection equation as basis for heat-pulse sap flow methods in anisotropic wood. *Journal of Experimental Botany*, 63(8), 2833–2839. <https://doi.org/10.1093/jxb/ers041>.
- Vandeghechuchte, M. W., Steppe, K. (2013) Corrigendum to: Sap-flux density measurement methods: working principles and applicability. *Functional Plant Biology*, 40(10), 1088. [https://doi.org/10.1071/fp12233\\_co](https://doi.org/10.1071/fp12233_co).
- Venturin, A. Z., Guimarães, C. M., Sousa, E. F. de, Machado Filho, J. A., Rodrigues, W. P., Serrazine, Í. de A., Bressan-Smith, R., Marciano, C. R., Camostrini, E. (2020) Using a crop water stress index based on a sap flow method to estimate water status in conilon coffee plants. *Agricultural Water Management*, 241(June), 106343. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106343>.
- Wickham, H. (2016) *ggplot2: Elegant Graphics for Data Analysis*. Springer-Verlag New York. <https://ggplot2.tidyverse.org>.
- Wickham, H., Averick, M., Bryan, J., Chang, W., McGowan, L. D., François, R., Grolemund, G., Hayes, A., Henry, L., Hester, J., Kuhn, M., Pedersen, T. L., Miller, E., Bache, S. M., Müller, K., Ooms, J., Robinson, D., Seidel, D. P., Spinu, V., ... Yutani, H. (2019) Welcome to the tidyverse. *Journal of Open Source Software*, 4(43), 1686. <https://doi.org/10.21105/joss.01686>.
- Wickham, H., Seidel, D. (2020) *scales: Scale Functions for Visualization*. <https://cran.r-project.org/package=scales>.
- Willmott, C. J. (1981) On the validation of models. *Physical Geography*, 2(2), 184–194. <https://doi.org/10.1080/02723646.1981.10642213>.
- Wolfe, H. S., Lynch, S. J. (1940) Papaya culture in Florida. *Bulletin. Florida Agricultural Experiment Station*, 350, 35 pp.
- Xu, D.-Q., Shen, Y.-K. (2005) External and Internal Factors Responsible for Midday Depression of Photosynthesis. In U. S. A. Pessarakli, Mohammad

(University of Arizona Tucson, Arizona (Ed.), *Handbook of Photosynthesis* (Second Ed.).

## 3.2 DESENVOLVIMENTO DE SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS DE FLUXO DE SEIVA, PELO MÉTODO TÉRMICO

### 3.2.1 RESUMO

Como uma alternativa econômica aos modelos de equipamentos comerciais disponíveis, normalmente voltados para espécies arbóreas de médio e grande porte e por consequência altos volumes de fluxo de seiva, buscou-se desenvolver um sensor capaz de mensurar a velocidade de escoamento de seiva, nos vasos xilemáticos, de forma não destrutiva. Os equipamentos foram desenvolvidos no Laboratório de Engenharia Agrícola, do Centro de Ciências e Tecnologias Agrícolas da Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro. Em seu desenvolvimento, foram utilizados componentes de baixo custo, e linguagem de programação de arquitetura aberta, no total foram desenvolvidos oito sistemas de aquisição de dados de fluxo de seiva, pelo método térmico, cada equipamento contendo dois cabeçotes com sensores de fluxo de seiva não incisivos compostos de três termistores de  $10\text{ k}\Omega$  ( $0,62\text{ W} \pm 250\text{ mA}$ ) e um resistor SMD  $47\ \Omega$ . O sistema foi testado em campo, em experimento montado no delineamento em blocos randomizados, em esquema fatorial. O primeiro fator foi composto do manejo de irrigação (com irrigação e sem irrigação) e o segundo fator foi composto de clones de cafeeiro Conilon (*Coffea canephora* Pierre Ex. Froehner): clone 14/86 e o clone 109a. Objetivando validar a eficiência dos equipamentos desenvolvidos neste trabalho, comparou-se os valores de fluxo de seiva obtidos

pelos sensores térmicos desenvolvidos, com os valores de fluxo de seiva obtidos com o uso de sondas comerciais do tipo TDP. Ambos os sensores, foram instalados em ramos ortotrópicos de cafeeiro Conilon, com face voltada para o norte. Além disso, buscou-se comparar os valores de fluxo de seiva, com dados de evapotranspiração de referências ( $ET_0$ ) ajustado às condições locais. Os valores de fluxo de seiva obtidos pelos sensores térmicos ajustaram-se aos valores observados de fluxo de seiva pelo método TDP, em função do tipo de clone de cafeeiro Conilon, sendo que o clone 109a com o modelo de ajuste  $\hat{Y} = 2,3307x$  apresentou coeficiente de determinação de 98% ( $R^2 = 0,981$ ), os valores estimados comparados com os valores observados pelo método TDP apresentaram forte correlação positiva ( $r \approx 0,98$ ) e o índice de confiança e desempenho de Carmargo e Sentelhas para o modelo foi classificado como “ótimo” ( $cs > 0,85$ ). Para o clone 14 o modelo de ajuste para estimar os valores de fluxo de seiva com base nos valores observados pelo sensor térmico foi  $\hat{Y} = 1,4303x$ , o modelo apresentou coeficiente de determinação de  $R^2 = 0,9542$ , o coeficiente de correlação apresentou forte correlação positiva ( $r = 0,9326$ ) e o índice de confiança e desempenho de Camargo e Sentelhas foi de ( $cs = 0,8947$ ) classificado como “ótimo”. Além disso, observou-se que a relação entre o fluxo de seiva obtido para ambos os sensores, não apresentaram relação linear em relação à evapotranspiração de referência ( $ET_0$ ). O custo total para fabricação de 8 sistemas de aquisição de dados de fluxo de seiva pelo método do térmico foi de R\$ 2.908,69. Demonstrando uma alternativa de baixo custo, não destrutiva, não incisiva, de fácil instalação, para os estudos sobre os fluxos de seiva e as propriedades hidráulicas em plantas.

Palavras-chave: Manejo de irrigação, Automação, STM32, Sensor.

## DEVELOPMENT OF SAP FLOW DATA ACQUISITION SYSTEM, BY THERMAL METHOD

### 3.2.2 ABSTRACT

As an economical alternative for equipments models suitable usually for medium and large tree species, consequently, sap volumes. We sought to develop a sensor capable of measuring the velocity of the sap flow in the xylem in a non-destructive way. The equipment was developed at the Agricultural Engineering Laboratory of the Agricultural Science and Technology Center of the Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro. In development low-cost flows were used with open programming. In totally eight sapflow data acquisition systems by thermal method were developed. Each equipment of two non-incisive sapflow sensors composed of three 10 k $\Omega$  thermistors (0.62 W + 250 mA) and a 47  $\Omega$  SMD resistor. The system was tested in the field, in an experiment set up in randomized blocks, in a factorial scheme. The first factor was composed of irrigation management (with and without irrigation) and the second factor was composed of Conilon coffee clones (*Coffea canephora* Ex. Froehner): clone 14/86 and clone 109a. Aiming at the flow efficiency of the improved equipment, comparing them with the thermal dissipation method (T) by the Granier model. Both were installed in orthotropic branches of Conilon coffee, with the frontal sensors facing north. Furthermore, we sought to compare the values of sap flow, evapotranspiration data with references ( $ET_0$ ) adjusted to local conditions. The sapflow values obtained by the thermal adjustment sensors correspond to the observed values of sap flow by the TDP method, depending on the type of Conilon coffee clone, with clone 109a with the adjustment model  $\hat{Y} = 2,3307x$ , the coefficient of determination of 98% ( $R^2 = 0.81$ ), the estimated values compared with the observed values showed strong positive results ( $r = 0.98$ ) and the performance and confidence index to Carmargo Sentelhas for the model was announced as "excellent" ( $cs > 0.85$ ). For clone 14, the adjustment flow to estimate the sap model values based on the values observed by the thermal sensor was  $\hat{Y} =$



1,4303x, the coefficient of determination presented of  $R^2 = 0.9542$ , the correlation coefficient had a strong positive performance ( $r = 0.9326$ ) and the performance and confidence index to Carmargo Sentelhas ( $cs = 0.894$ ) as “excellent”. Furthermore, it was observed that the relationship between the sap flow obtained for the sensors does not present a linear relationship with the reference evaporation ( $ET_0$ ). The total cost of manufacturing 8 sap flow data acquisition systems using the thermal method was R\$ 2,908.69. Demonstrating a low-cost, non-destructive, non-incisive, easy-to-install alternative for studies on sap flows and hydraulic properties in plants.

Keywords: Irrigation management, Automation, STM32, Sensor.

### 3.2.3 INTRODUÇÃO

Uma das formas disponíveis para o estudo e o monitoramento do nível de estresse hídrico das plantas é o acompanhamento da variação do fluxo de seiva e a sua interação com as condições do ambiente. Na literatura há relatos sobre as medidas de fluxo de seiva a partir dos anos de 1930 (Poyatos et al., 2016), tendo maior divulgação e aumentando o seu interesse a partir de 1958, com as novas abordagens propostas por Marshall (Burgess et al., 2001; Marshall, 1958). Grande parte dos estudos são voltados a espécies arbóreas de médio e grande porte (Flo et al., 2019; Steppe et al., 2010, 2015; Maes e Steppe, 2012; Vandegheuchte e Steppe, 2012a; Clearwater et al., 2009; Marshall, 1958). Atualmente, o método de dissipação térmica é o mais utilizado (Baïamonte e Motisi, 2020; Mares et al., 2016; Steppe et al., 2010; Granier, 1985), como também o método de balanço de calor (Steppe et al., 2010) e pulso de calor (Van de Put et al., 2020; Venturin et al., 2020; Vandegheuchte et al., 2015; Vandegheuchte e Steppe, 2012b, 2013; Clearwater et al., 2009; Cohen et al., 1981; Marshall, 1958).

Os estudos sobre o fluxo de seiva, permitem uma melhor compreensão das funções hidráulicas, transpiração, aporte de minerais, passando para transporte de solutos nas folhas e frutos (Steppe et al., 2015). Contudo, algumas técnicas são incisivas, por meio de sondas termoeletricas inseridas radialmente no alburno do vegetal (Clearwater et al., 2009), podendo resultar na formação de injúrias na secção do alburno, exercendo influências negativas nas leituras de velocidade de fluxo de seiva (López-Bernal et al., 2017a; Fuchs et al., 2017; Cohen et al., 1981).

O método do balanço de calor, consiste no balanço de calor entre dois seguimentos de um caule e ou tronco. O calor oriundo de um elemento aquecedor de forma constante é transmitido por convecção pela seiva no xilema. O calor é medido antes e após o elemento aquecedor. Trata-se de uma metodologia não destrutiva, que além de não incisiva o que evita a formação de injúrias, é uma alternativa para espécies vegetais com diâmetros de caules inferiores a 10 mm (Senock e Ham, 1993). Alguns autores relatam que o método em si pode apresentar erros superiores a 20% motivados por secções irregulares de troncos (Weibel e de Vos, 1994). Porém os erros podem ser reduzidos em plantas bem hidratadas, por apresentar troncos turgidos em relação a plantas em estresse hídrico (Čermák et al., 1995).

O Brasil é atualmente o maior produtor (38,7% da produção mundial) e exportador (29,6% da exportação) de café. O mercado nacional, nos quatros primeiros meses de 2021 movimentou US\$ 2 bilhões. Com estimativa para a safra 2021 a produção de 48.807 mil sacas de 60 kg de café beneficiado, com participação de 33.364,8 mil sacas de café arábica, e 15.442,2 mil sacas de cafeeiro Conilon, destacando o estado do Espírito Santo, como maior produtor de cafeeiro Conilon, responsável por 67% da produção nacional (CONAB, 2021). O que demonstra uma necessidade crescente por novas metodologias capazes de maximizar a produtividade, sobretudo ao uso consciente da água. Na Literatura, dados sobre os estudos sobre o fluxo de seiva para o cafeeiro são escassos, bem como, a disponibilidade de equipamentos que se adequem às estruturas vegetais do cafeeiro.

Como uma forma alternativa, de fácil manuseio, utilizando métodos não intrusivos, e sobretudo de baixo custo, objetivou-se nesse trabalho desenvolver

um sistema de aquisição de dados para medição de fluxo de seiva, pelo método térmico e analisar sua aplicabilidade em campo em plantas de café Conilon.

### **3.2.4 MATERIAL E MÉTODOS**

#### **3.2.4.1 CONSTRUÇÃO DOS EQUIPAMENTOS**

A elaboração e a construção dos equipamentos desenvolvidos neste trabalho foram realizadas no Laboratório de Engenharia Agrícola (LEAG), do Centro de Ciências e Tecnologias Agrícolas (CCTA) da Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro – UENF.

Na concepção dos equipamentos optou-se por componentes eletrônicos de baixo custo, de fácil aquisição, utilizando a plataforma de desenvolvimento e de programação do Arduino®.

##### **3.2.4.1.1 Sistema de aquisição de dados de fluxo de seiva, pelo método do térmico (DASSFT)**

O sistema desenvolvido foi elaborado utilizando dois módulos. O primeiro módulo compreendeu a alimentação, o regulador de voltagem, o controle de pulso e as conexões de entrada dos sensores (Figura 12). Para o controle de pulso de energia utilizou-se de dois transistores TIP32 PNP. A alimentação de entrada foi de 12 V, regulados para 3,3 V por meio de regulador de voltagem LM2596 DC-DC step-down. A conexão dos dois cabeçotes com sensores de fluxo de seiva foi por meio de pinos machos.

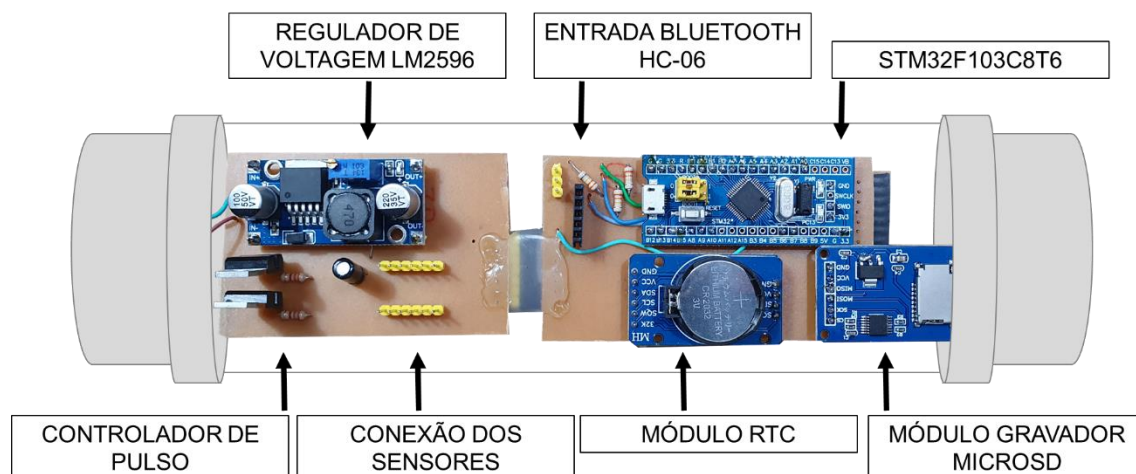


Figura 12. Hardware do sistema de aquisição de dados de fluxo seiva, pelo método térmico (DASFSMT).

O segundo módulo abrigou os componentes para programação e controle (microcontrolador), para a gravação, para a temporização e para a comunicação de dados. Para o controle foi utilizado microcontrolador STM32F103C8T6 modelo: Bluepill 32 bits Arm® Cortex®-M de 72 MHz. Para gravação dos dados, módulo shield gravador microSD. O temporizador foi o módulo shield RTC DS3231 alimentado por bateria de lítio CR2032 3 V.

Cada estação foi programada para transmissão dos dados gravados via bluetooth. Na comunicação via bluetooth foi utilizado módulo bluetooth 4.0 HC-06.

Os sensores elaborados foram compostos por duas partes principais: A primeira parte sendo o sensor propriamente, denominado cabeçote, contendo transdutores de temperatura e resistor SMD para emissão de calor. A segunda parte composta por um módulo conversor de sinal analógico/digital. Em seu desenvolvimento foram utilizados resistores SMD de 47 ohms, termistores NTC SMD 10 kΩ a 25 °C, e módulo ADS 1115 de 4 canais e 16 bit (Figura 13).

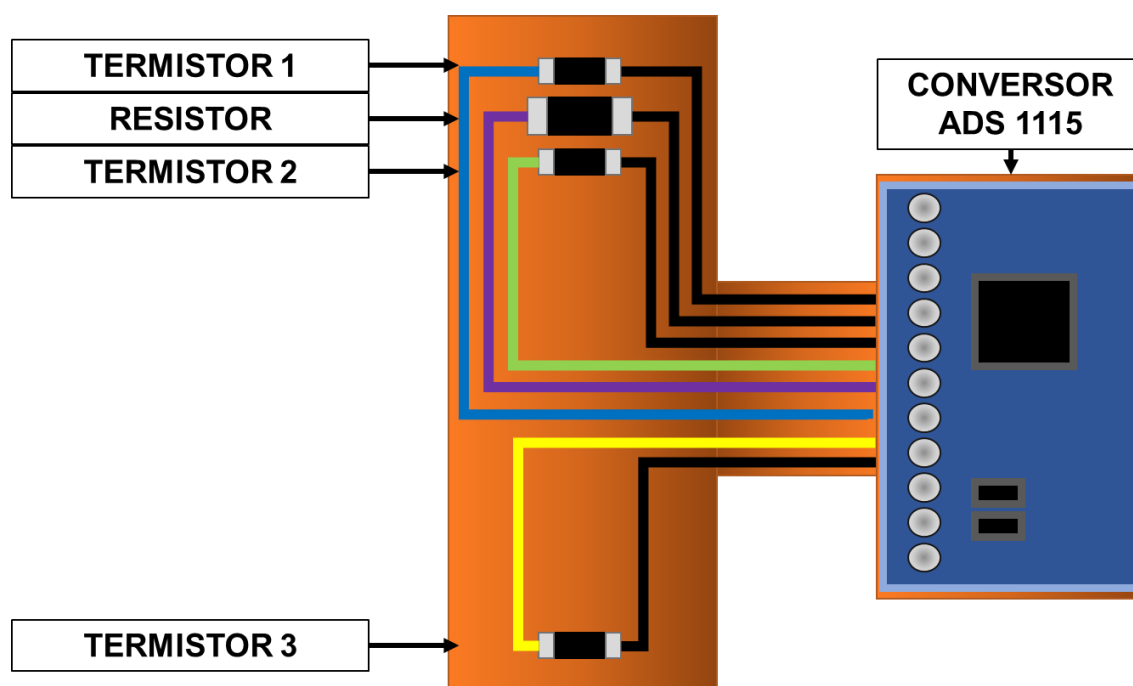


Figura 13. Representação da disposição dos sensores de fluxo de seiva, no cabeçote.

Na parte superior do cabeçote foram dispostos dois termistores SMD 10 k $\Omega$  a 25 °C, entre eles um resistor SMD de 47  $\Omega$ , para o arrefecimento os termistores ficaram equidistantes 2 mm em relação ao resistor de aquecimento. Na parte inferior do cabeçote, foi disponibilizado a 40 mm de distância do resistor, um termistor SMD 10 k $\Omega$  a 40 mm do resistor, destinado às leituras de temperatura de referência da planta. Os sensores comunicavam-se com o conversor ADS 1115 por meio de cabos de cobre de 1,75mm. Além disso, o corpo do cabeçote foi revestido por EVA e cortiça para isolamento térmico para conferir maleabilidade ao sensor. Os componentes foram impermeabilizados com adesivo líquido plástico (supercola).

### 3.2.4.1.2 Princípio de funcionamento

O sistema foi configurado para aplicar um pulso de calor de 250 ms sempre que verificasse variação de média de temperatura entre os termistores ( $\Delta T$ , °C) fosse menor que 5 °C. O pulso de calor aplicado tinha a potência de 0,144 W. Quando a variação de temperatura retornava a ser superior a 5 °C o

fornecimento de energia para o aquecimento era interrompido. Para o acompanhamento da variação de temperatura entre os termistores, o sistema foi configurado para leituras em frequência de 4 Hz. O número de pulsos de calor aplicados em um intervalo de 15 minutos ( $N_L$ ) foi computado, bem como o número de leituras de temperatura no mesmo período ( $N_T$ ).

### 3.2.4.2 EXPERIMENTO EM CAMPO

O experimento em campo foi conduzido na Fazenda Experimental do Instituto Capixaba de Pesquisa, Assistência Técnica e Extensão Rural – Incaper, localizado sob as coordenadas geográficas latitude:- 19,4178704 S, longitude - 40,0811398 O e a 18 m de altitude em relação ao nível médio do mar. O clima local é classificado como AW segundo classificação Koppen.

### 3.2.4.3 CONDIÇÕES CLIMÁTICAS

Os dados sobre as condições climáticas locais foram coletados e armazenados utilizando-se uma mini-estação agrometeorológica marca WatchDog Series 2000, composta por piranômetro com resolução espectral de 400 a 700 $\mu$  LigthScout Quantum, anemômetro digital, sensor de temperatura e umidade relativa do ar. Os dados médios foram armazenados com uma frequência de 15 minutos.

Para o cálculo do déficit de pressão de vapor d'água (DPV), pressão de saturação de vapor ( $e_s$ ) e pressão parcial de vapor ( $e_a$ ) utilizou-se equações propostas pelo Boletim FAO56 (Allen et al., 1998), conforme Equações 23 a 25.

$$DPV = (e_s - e_a) \quad (23)$$

$$e_s = 0,6108 e^{\left[ \frac{17,27(T_{ar})}{T_{ar} + 237,3} \right]} \quad (24)$$

$$e_a = e_s \left( \frac{RH}{100} \right) \quad (25)$$

em que:

- DPV – déficit de pressão de vapor, kPa;
- $e_s$  - Pressão de saturação de vapor, kPa;
- $e_a$  - Pressão atual de vapor, kPa;
- Tar – Temperatura do ar, °C e
- RH – umidade relativa do ar, %.

#### 3.2.4.4 DELINEAMENTO EXPERIMENTAL

O experimento foi avaliado em delineamento randomizado em arranjo experimental de parcela subdividida no tempo. A parcela foi constituída por efeito de manejo de irrigação: Irrigado, não irrigado, a subparcela foi composta por 2 clones de cafeeiro Conilon (*Coffea canephora* Pierre Ex. Froehner), Clone 109a que apresenta suscetibilidade ao estresse hídrico, e o Clone 14 que tem por característica principal sua tolerância ao estresse hídrico. A subsubparcela por sua vez foi composta pelo período avaliado. Foram utilizadas 4 repetições.

#### 3.2.4.5 PLANTIO, MANEJO DE IRRIGAÇÃO E DA CULTURA

A área experimental foi composta por 36 plantas de cafeeiro Conilon, sendo 18 plantas do 'clone 14' e 18 plantas do 'clone 109a'. Após a determinação da bordadura foram utilizadas 16 plantas úteis, sendo 8 plantas para cada clone.

O transplante das mudas foi realizado em 3 de setembro de 2020, com espaçamento de 2,5 metros entre plantas e de 2,0 metros entre ruas, em covas de 40 x 40 x 40 cm, conforme apresentado no croqui do experimento na Figura 14.

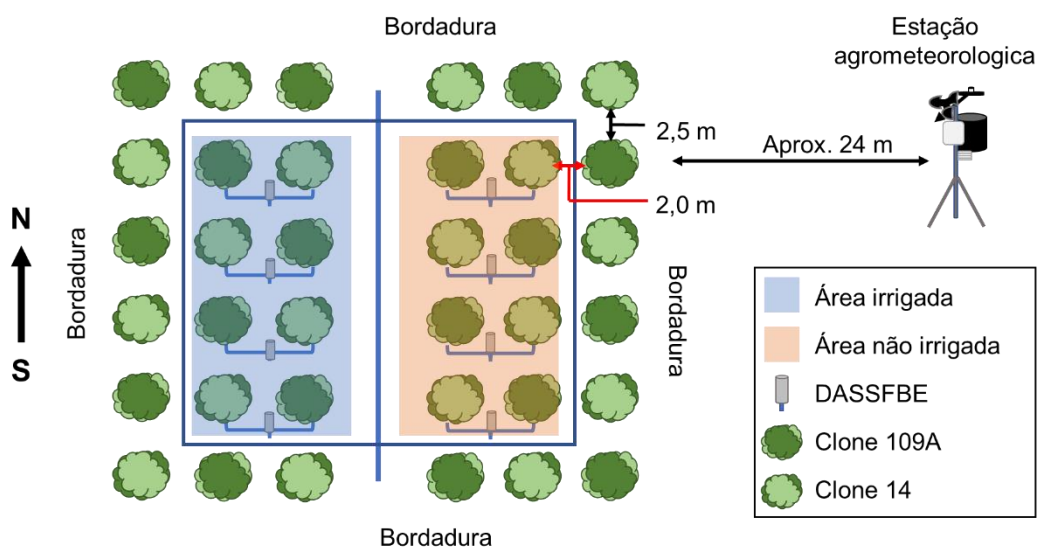


Figura 14. Croqui do experimento, em detalhe: A área irrigada; A área não irrigada; Espaçamentos entre linhas; Espaçamentos entre plantas; Localização da estação agrometeorológica; Clones de café Conilon: clone 109A e clone 14.

A irrigação foi realizada utilizando sistema de irrigação localizada por gotejamento. Utilizou-se mangueira gotejadora da marca Azud, com espaçamento entre emissores de 0,30 m, em linha simples, com vazão nominal de  $0,90 \text{ Lh}^{-1}$ . A água foi bombeada por um conjunto motobomba de 3 cv. O sistema foi ligado 4 vezes ao dia por 50 minutos em intervalos de 48 horas. O solo local da área experimental é do tipo Sedimentos Aluviais Inconsolidados (Neossolo Flúvico) (SBCS, 2018).

Uma pré-análise das estações de medição de fluxo de seiva ocorreu no período de 02 a 23 de setembro. Neste período houve a primeira grande florada (4 de setembro de 2021). Até o último dia de avaliação 07 de novembro de 2021, ocorreram 10 floradas de baixa intensidade.

Os tratos culturais como limpeza da área e aplicação de herbicidas foram realizados de forma manual, sempre que necessários. Ocorreram 2 adubações com  $20 \text{ g cv}^{-1}$  do formulado 20-00-20, a primeira no mês de outubro (2021) e a segunda no mês de novembro (2021) seguindo o preconizado por Freire et al. (2013).



### 3.2.4.6 ESTIMATIVA DO FLUXO DE SEIVA

#### 3.2.4.6.1 Estimativa do fluxo de seiva

Para estimativa do fluxo de seiva, pelo método térmico, os cabeçotes contendo os sensores foram instalados nos ramos ortotrópicos dos cafeeiros, aproximadamente 100 mm acima das sondas do tipo TDP, na face do ramo voltado para o norte (Figura 15).



Figura 15. Cabeçote instalado no ramo ortotrópico do cafeeiro Conilon.

Graças à disposição das plantas, cada um dos equipamentos possuía um cabeçote instalado em um clone de cafeeiro Conilon 109A e outro cabeçote no clone 14/86, de cada tratamento.

O cálculo do fluxo de seiva, pelo método térmico ( $J_{\text{sapflow}}$ ) foi realizado utilizando-se as Equação 26 a 32.

$$J_{\text{sapflow}} = \frac{\Delta Q}{\rho c (\Delta T)} \therefore \frac{P \left( \frac{N_L - N_0}{N_T} \right)}{4,19 (\Delta T)} \quad (26)$$

$$P = \frac{V^2}{R} \therefore P = \frac{(2,6)^2}{47} = 0,144W \quad (27)$$

$$Q = \frac{N_L}{N_T} P \quad (28)$$

$$\Delta Q = (Q - Q_0) \quad (29)$$

$$\Delta T = \frac{2}{(\Delta T_2 - \Delta T_1)} \quad (30)$$

$$\Delta T_1 = (T_1 - T_3) \quad (31)$$

$$\Delta T_2 = (T_2 - T_3) \quad (32)$$

em que:

$\rho c$  - Capacidade térmica volumétrica da madeira,  $J m^{-3} K^{-1}$ ;

$P$  - Potência de energia aplicada, W;

$V$  - Voltagem aplicada ao resistor, V;

$R$  - Resistência conferida pelo resistor,  $\Omega$ ;

$Q$  - Potência real aplicada em intervalos de 15 min, W;

$\Delta Q$  - Potência absorvida pelo fluxo de seiva, W;

$N_L$  - Número de acionamentos do aquecedor em intervalos de 15 min;

$N_T$  - Número máximo de acionamentos em intervalos de 15 min;

$\Delta T$  - Variação média de temperatura,  $^{\circ}C$ ;

$\Delta T_1$  - Variação de temperatura entre  $T_1$  e  $T_3$ ,  $^{\circ}C$ ;

$\Delta T_2$  - Variação de temperatura entre  $T_2$  e  $T_3$ ,  $^{\circ}C$ ;

$T_1$  - Temperatura do sensor, localizado 2 mm acima do resistor,  $^{\circ}C$ ;

$T_2$  - Temperatura do sensor, localizado 2 mm abaixo do resistor,  $^{\circ}C$  e

$T_3$ : Temperatura do termistor de referência, localizado 40 mm abaixo do resistor,  $^{\circ}C$ .

### 3.2.4.6.2 Estimativa do fluxo de seiva por meio de sondas do tipo TDP (Granier)

O sistema tipo TDP utilizado para estimativa do fluxo de seiva foi composto de um registrador de dados modelo CR1000x da Campbell® Scientific,

um multiplexador de canal modelo AM16/32 da Campbell® Scientific, um regulador de voltagem automático AVR DC Voltage Range 1,25 V a 10,5 V da DYNAMAX configurado para 3 V, uma interface modelo SC32B da Campbell® Scientific para comunicação de dados com computadores e 16 sondas TDP com 16 cabos extensores de 10 m.

As sondas do tipo TPD, (Figura 16) foram instaladas nas plantas de cafeeiro Conilon entre o primeiro e o segundo nó no ramo ortotrópico, distanciadas de 40 mm entre a sonda com termopar e aquecedor (superior), da sonda com termopar (inferior) nas faces do cafeeiro voltadas para o norte (Dynamax, 2007).

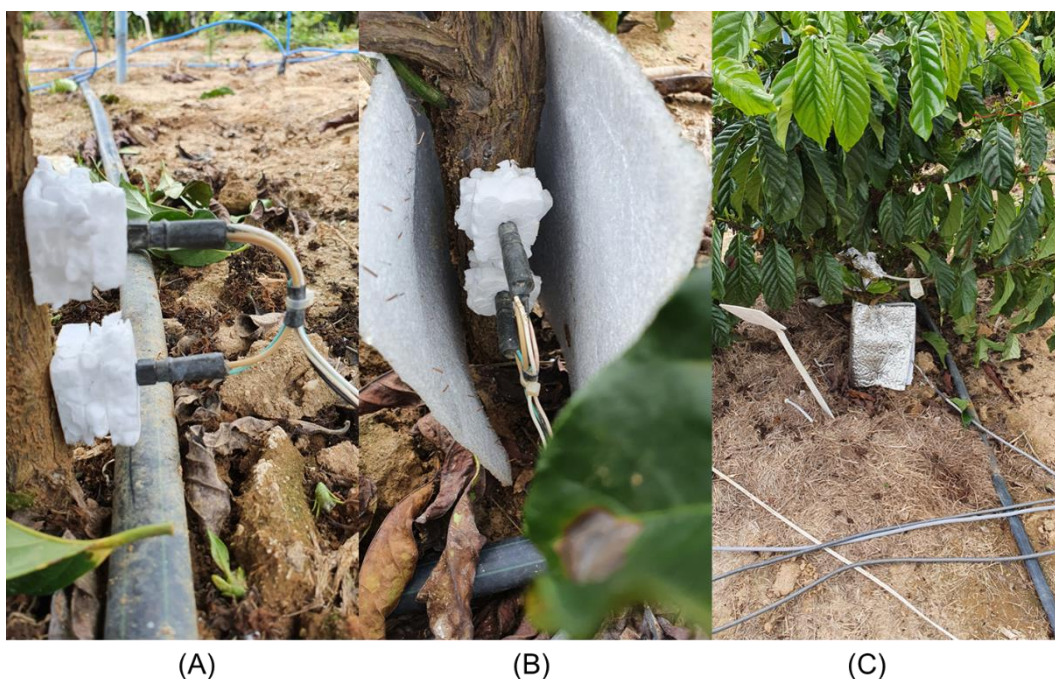


Figura 16. Instalação das sondas TDP (Granier) entre o 1º e 2º nó no ramo ortotrópico com face voltada para o N. Sondas fixadas a 40 mm equidistantes com isolamento externo por poliestireno expandido (A), aplicação de manta termoacústica para proteção térmica da secção do ramo (B) e resultado da aplicação das sondas com proteção termoacústica (C) em cafeeiro Conilon.

As sondas TDP 30 utilizadas, com 3 cm de comprimento, normalmente são indicadas para árvores de médio e grande porte, com maior secção radial de alburno. Para que as regiões sensíveis das sondas ficassem próximas às regiões xilemáticas no caule do cafeeiro (0,8 mm), a partir do córtex. Jesus et al. (2010;

Queiroz-Voltan et al., 1998), estipularam que as sondas penetrariam apenas 15 mm, na parte exposta isolada do ambiente por meio de poliestireno expandido (Figura 16A). Além disso, conforme preconizado por Dynamax (2007), utilizou-se de material com isolamento térmica na secção do caule onde as sondas foram instaladas, por meio de manta termoacústica (Figura 16B, Figura 16C).

Para estimar o fluxo de seiva por meio das sondas TDP, utilizou-se das Equações 33, 34 e 35, baseada na metodologia desenvolvida por Granier (1985) adaptada por Bird et al. (2001). Este método leva em consideração as variáveis: difusidade da madeira ( $K$ ), e densidade de fluxo de seiva ( $u$ ), para calcular o volume de fluxo de seiva  $SF$ , em um dado segmento ( $S_a$ ).

$$SF = u \cdot S_a \quad (33)$$

$$u = a \cdot K^b \quad (34)$$

$$K = \frac{(dT_M - \Delta T)}{\Delta T} \quad (35)$$

em que:

$SF$  - Volume de fluxo de seiva,  $m^3 s^{-1}$ ;

$u$  - Densidade de fluxo de seiva,  $m^3 s^{-1}m^{-2}$ ;

$S_a$  - Área da seção transversal do caule abrangido pelo xilema,  $m^2$ ;

$a$  - Constante relativa ao método Granier,  $0,000119 m^3 s^{-1}m^{-2}$ ;

$b$  - Constante relativa ao método Granier,  $1,231 m^3 s^{-1}m^{-2}$ ;

$K$  - O coeficiente de fluxo, adimensional;

$dTM$  - Máxima diferença de temperatura entre as sondas, sem fluxo, K e

$\Delta T$  - Diferença de temperatura entre as sondas, com fluxo, K.

A metodologia da dissipação térmica, considera como fluxo de seiva mínimo ou nulo quando ocorre a diferença máxima de temperatura ( $dTM$ ) entre as sondas em 24 horas. Essas diferenças de temperatura variam conforme a quantidade de fluxo de seiva ascendente nos vasos xilemáticos. Sendo máxima quando não há fluxo, e quando há o fluxo de seiva, menores valores são observados, pois ocorre uma maior dissipação do calor aplicado pela sonda por convecção da seiva.

### 3.2.4.7 ANÁLISES ESTATÍSTICAS

As análises estatísticas foram realizadas com o auxílio do software R (R Core Team, 2021), os dados qualitativos foram submetidos à análise de variância e teste de médias de Scott-Knott ao nível de 5%. Já os dados quantitativos foram submetidos à análise de regressão linear e não linear, ao nível de 5%.

Os dados foram submetidos às análises de correlação de Pearson ( $r$ , Equação 36) que verifica a assimetria dos dados, o índice de Willmott (1981) ( $d$ , Equação 37) capaz de descrever a exatidão dos resultados, o índice de confiança e desempenho de Camargo e Sentelhas (1997) ( $c$ , Equação 38, Tabela 3).

$$r = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n \left( \frac{O_i - \bar{O}}{S_o} \right) \left( \frac{P_i - \bar{P}}{S_{P_i}} \right) \quad (36)$$

$$d = 1 - \left[ \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|P_i - \bar{O}| + |O_i - \bar{O}|)^2} \right] \quad (37)$$

$$cs = d \times c \quad (38)$$

em que:

$P_i$  - Valores estimados;

$O_i$  - Valores observados;

$n$  - Tamanho da amostra;

$S_o$  - Desvio amostral das observações;

$S_{P_i}$  - Desvio amostral dos valores estimados;

$\bar{O}$  - Média das observações e

$\bar{P}$  - Média dos valores estimados.

Tabela 3. Índice de confiança e desempenho de Camargo e Sentelhas (1997)

Classificação	Critério
Ótimo	$cs > 0,85$
Muito Bom	$0,76 \leq cs \leq 0,85$
Bom	$0,66 \leq cs \leq 0,75$
Mediano	$0,61 \leq cs \leq 0,65$
Sufrível	$0,51 \leq cs \leq 0,60$
Mau	$0,41 \leq cs \leq 0,50$
Péssimo	$cs \leq 0,40$

Para a elaboração dos gráficos, dentro do ambiente, foram utilizados os pacotes “ggplot2” (Wickham, 2016), “scales” (Wickham e Seidel, 2020), “lubridate” (Grolemund e Wickham, 2011), “viridis” (Garnier, 2018), “ggmisc” (Aphalo, 2021) e “tidyverse” (Wickham et al., 2019).

### 3.2.5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Durante o período experimental os registros referentes à temperatura do ar, assim como as demais condições climáticas avaliadas são apresentadas na Figura 17.

O período que compreende de setembro a novembro, corresponde a estação da primavera no hemisfério sul, o que para o cafeeiro Conilon, trata-se do período ao qual ocorre sua floração principal (Fazuoli et al., 2009). Verificou-se a ocorrência de floração intensa no experimento no dia 4 de setembro de 2021. Após este evento, dá-se início ao aumento na taxa de crescimento vegetativo (Marcolan et al., 2009; Amaral et al., 2007; Silveira e Carvalho, 1996) quando no primeiro ano de idade da planta, e o crescimento reprodutivo, quando no segundo ano de desenvolvimento (Marcolan et al., 2009).

A temperatura do ar (Figura 17, Temp.) variou 14,2 °C no dia 26 de setembro de 2021 a 35,6 °C no dia 2 de outubro de 2021. A temperatura média registrada para o período experimental foi de 24,8 °C.

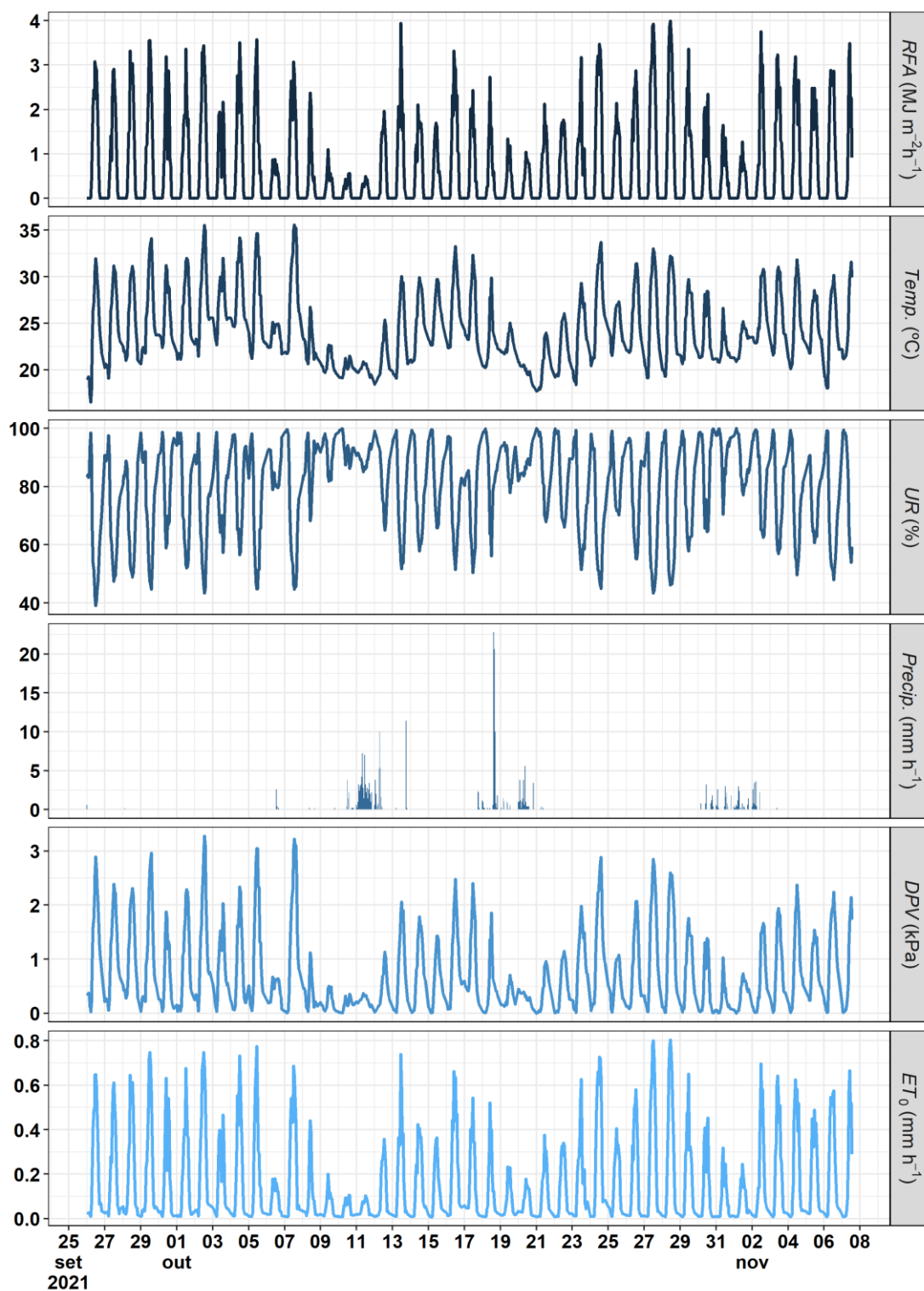


Figura 17. Variáveis climatológicas: radiação fotossinteticamente ativa (*RFA*), temperatura do ar (*Temp.*), umidade relativa (*UR*), precipitação (*Precip.*), déficit de pressão de vapor (*DPV*) e evapotranspiração (*ET<sub>0</sub>*). Linhares, ES.

Estudos realizados por Partelli et al. (2010) em cafeeiro Conilon (*Coffea canephora*) no município de Campos dos Goytacazes, em plantas com 4 anos no período de 14 de novembro de 2003 a 27 de julho de 2004, correlacionaram incremento na taxa de crescimento de ramos plagiotrópicos na planta com base no aumento da temperatura.

A cultura do cafeeiro Conilon, apresenta algumas restrições quanto ao clima, sendo indicadas como zonas com aptidão aquelas, que apresentam temperaturas médias anuais entre 22 °C e 26 °C com média de déficit hídrico inferiores a 200 mm. Do mesmo modo, as zonas são consideradas marginais aquelas que ao longo do ano apresenta temperaturas variando de 21 °C a 22 °C com deficiência hídrica anual variando de 200 mm a 400 mm. Por fim, são consideradas regiões inaptas ao cultivo do cafeeiro, aquelas, que, na ausência de sistema de irrigação, que apresente temperaturas médias inferiores a 21 °C e superiores a 26 °C com deficiências hídricas superiores a 400 mm ano (Matiello et al., 2010).

Em relação à radiação solar, os valores registrados para a parcela da radiação fotossinteticamente ativa (Figura 17, RFA) variaram de 0 MJ m<sup>-2</sup>h<sup>-1</sup> a 4 MJ m<sup>-2</sup>h<sup>-1</sup>.

A umidade relativa do ar (Figura 17, UR) variou de 37,98% a 100%, sendo que dos 37 dias avaliados, cerca de 27 apresentaram valores de umidade relativa do ar de 100%.

Com relação aos dados de precipitação (Figura 17, Precip.) ao longo do período experimental houve 18 dias com eventos de chuva, totalizando 284 mm. Destes cerca de 257 mm ocorreram no mês de outubro. Os menores valores de precipitação registrados ocorreram nos dias 28 de setembro de 2021, 9 de outubro de 2021 e 3 de novembro de 2021 com precipitações de 0,2 mm. A maior precipitação ocorreu no dia 11 de outubro de 2021 com 66,2 mm. Os valores mensais registrados apresentaram-se superiores às médias históricas para o município de Linhares – ES.

O DPV variou de 0,0 kPa a 3,435 kPa, o valor máximo foi registrado no dia 27 de outubro de 2021. Os valores reduzidos de DPV ocorreram pelos valores elevados de umidade relativa do ar registrados, temperaturas médias não muito elevadas, além de vários eventos de precipitação ao longo do período experimental.



A  $ET_0$  variou de  $0,007 \text{ mm h}^{-1}$  a  $0,805 \text{ mm h}^{-1}$ , os valores reduzidos de evapotranspiração de referência são resultados da alta umidade do ar registradas, temperaturas não muito elevadas.

Os valores de fluxo de seiva, obtidos por meio dos sensores térmicos desenvolvidos neste trabalho, foram confrontados com os valores de fluxo de seiva, oriundos de sensores do tipo TDP, obtidos de 8 plantas de cafeeiro Conilon, conforme observa-se na Figura 18.

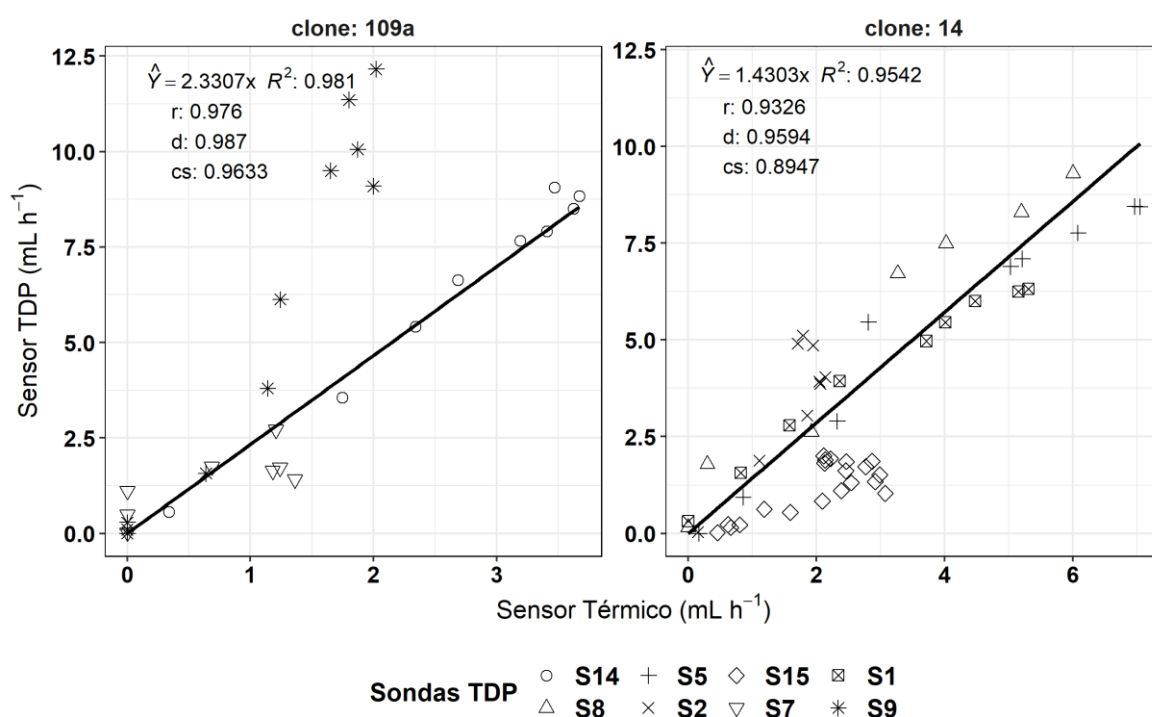


Figura 18. Modelo de ajuste, coeficiente de determinação ( $R^2$ ), coeficiente de correlação de *Peason* ( $r$ ), índice de Willmott ( $d$ ) e índice de confiança e desempenho de Camargo e Sentelhas ( $cs$ ), para os valores de fluxo de seiva medidos por sondas tipo TDP em função de valores de fluxo de seiva medidos por sensores térmicos, para clones de cafeeiro Conilon tolerantes ao estresse hídrico (clone 14) e suscetível ao estresse hídrico (clone 109a).

Os sensores TDP do tipo Granier apresentaram valores elevados para o coeficiente de determinação ( $R^2$ ) quando correlacionados aos valores observados nos sensores térmicos. Tal fato possibilitou ajustes de  $\approx 98\%$  (Figura 18, clone 109a) e  $95\%$  (Figura 8, clone 14) com base no clone de cafeeiro Conilon avaliado.

Quando analisadas as correlações entre o método térmico e o método TDP pelo índice de Willmott, em ambos os clones estudados pode-se verificar que os métodos tiveram correlações satisfatórias com valores de  $d > 0,95$ . A relação entre os métodos pode ser classificada como “ótimo” ( $c > 0,85$ ) segundo o índice de confiança e desempenho de Carmago e Sentelhas (Figura 18).

Os sensores térmicos desenvolvidos neste trabalho, apresentam valores fortemente correlacionados aos valores dos sensores do tipo TDP, indicando a sua utilização como uma alternativa viável com um custo reduzido quando comparados aos custos de aquisição de equipamentos TDP comerciais. E, por serem instalados externamente ao caule, os danos ao tecido vegetal das plantas são significativamente menores.

Objetivando analisar a aplicabilidade dos sensores térmicos para medição de fluxo de seiva, desenvolvidos neste trabalho, comparou-se os valores de fluxo de seiva, com dados de evapotranspiração de referência ( $ET_0$ ) para as condições locais de campo. Na Figura 19 são apresentados valores médios estratificados de fluxo de seiva, para os dois modelos de sensores testados, sobre os valores de  $ET_0$  para os dois clones de cafeeiro Conilon.

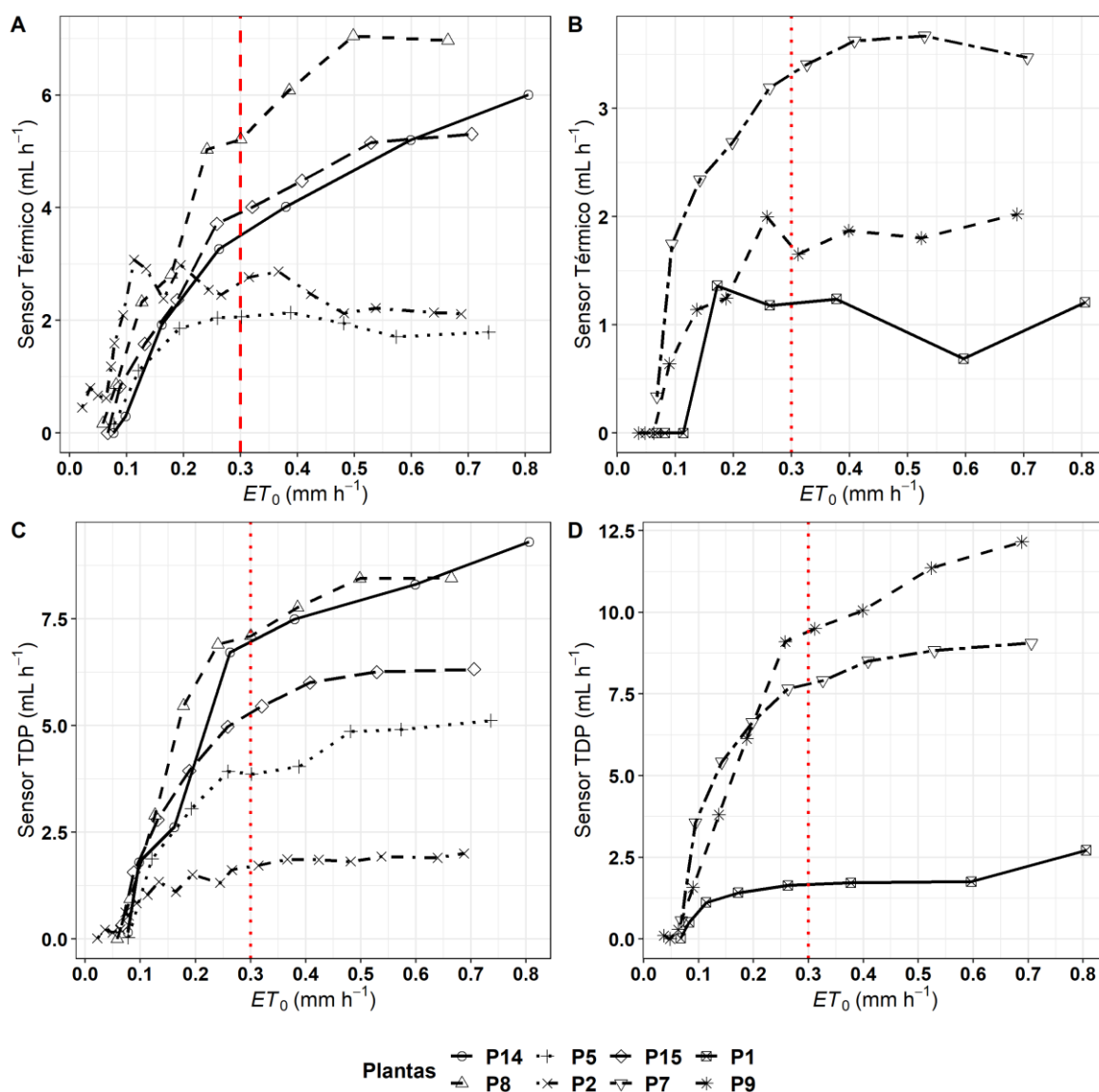


Figura 19. Perfil de variação dos valores médios de fluxo de seiva de dois modelos de sensor: sensor térmico e sensor TDP (*Granier*) em função dos valores horários de evapotranspiração de referência ( $ET_0$ ). Para os dois clones de cafeeiro Conilon: 'clone 14' (A e C) e 'clone 109a' (B e D).

É possível observar uma variação similar para ambos os sensores (Térmico e TDP) para os dados de fluxo de seiva, quando comparados aos dados de evapotranspiração ( $ET_0$ ). A partir de uma demanda evapotranspirativa superior a 0,3 mm h<sup>-1</sup> os valores de fluxo de seiva tenderam a reduzir-se a valores quase constantes (Figura 19). Demonstrando que com o início dos processos evapotranspirativo ocorre um aumento acentuado do fluxo de seiva, tendendo a estabilizar a partir de valores de  $ET_0$  superiores a 0,3 mm h<sup>-1</sup>.

Os custos na aquisição dos componentes para o desenvolvimento dos sistemas de aquisição de dados de fluxo de seiva, pelo método do balanço de calor (DASFSMT) são apresentados na Tabela 4.

O custo médio individual de cada DASFSMT (Tabela 4) foi de R\$ 363,59. Cabe ressaltar que neste levantamento não estão inseridos os valores dos componentes de proteção do circuito, sua mão de obra para manufatura e recurso humano no desenvolvimento da programação.

O custo médio total (Tabela 4) para o desenvolvimento de oito DASFSMT contendo ao todo 16 cabeçotes sensores de fluxo de seiva foi de R\$ 2.908,90. Em comparação com modelos comerciais, aos quais necessitam não somente dos sensores, mas de registradores, multiplexadores, reguladores de voltagem e inversores ópticos. O valor gasto para o desenvolvimento dos equipamentos corresponde a 2,91% dos custos envolvidos na aquisição de apenas um modelo comercial de registrador de 16 canais (SIGAPREGAO, 2020), utilizado no experimento.

Tabela 4. Levantamento de custos médios no período de junho a agosto de 2021 realizados em lojas online para os componentes utilizados na montagem de oito sistemas de aquisição dados de fluxo de seiva, pelo método térmico

Descrição	Apresentação	Valor unitário	Quantidade	Valor Total
Placa fenolite 7 cm x 4,5 cm	10 cm x 15 cm	R\$ 5,95	7	R\$ 41,65
Shield RTC	unidade	R\$ 31,50	8	R\$ 252,00
Shield microSD	unidade	R\$ 14,50	8	R\$ 116,00
STM32 f103c8t6 Bluepill	unidade	R\$ 47,50	8	R\$ 380,00
Shield Regulador de tensão step-down LM2596	unidade	R\$ 12,50	8	R\$ 100,00
Barra pino fêmea MCI 2,54 mm 180°	1 x 40	R\$ 5,00	4	R\$ 20,00
Barra pino macho 2,54 mm 180°	1 x 40	R\$ 1,85	4	R\$ 7,40
Resistores 1/4 W	unidade	R\$ 0,13	40	R\$ 5,20
Transistor TIP32c PNP	unidade	R\$ 8,61	16	R\$ 137,76
Capacitor eletrolítico 100 µf 16 V	unidade	R\$ 0,20	8	R\$ 1,56
Cabo tipo manga 5 vias AWG 1,5mm	metro	R\$ 6,01	28	R\$ 168,28
Chave gangorra	unidade	R\$ 2,62	8	R\$ 20,92
Conector tipo Mike 5 vias macho	unidade	R\$ 5,50	16	R\$ 88,00
Conector tipo Mike 5 vias fêmea	unidade	R\$ 8,70	16	R\$ 139,20
Conector fêmea Jack P4	unidade	R\$ 1,07	8	R\$ 8,56
Conector macho P4	unidade	R\$ 2,95	8	R\$ 23,60
Cartão microSD 16 Gb classe 10	unidade	R\$ 58,00	8	R\$ 464,00
Shield AD1115 4 canais 16 bit	unidade	R\$ 54,90	16	R\$ 878,40
Resistor SMD 47Ω	unidade	R\$ 0,60	16	R\$ 9,60
Termistor SMD 10kΩ	unidade	R\$ 0,97	48	R\$ 46,56
Total por DASFSMT				R\$ 363,59
Total				R\$ 2.908,69

### 3.2.6 CONCLUSÃO

Os sistemas de aquisição de dados de fluxo de seiva, pelo método térmico mostrou-se com desempenho similar aos valores de fluxo de seiva obtidos de modelo comercial por meio de sondas TDP.

Trata-se de uma alternativa para baratear os custos nas pesquisas sobre o comportamento hidráulico das plantas, sobretudo no transporte de seiva.

Verificou-se fortes correlações entre os valores de fluxo de seiva medidos por sondas TDP (Granier) e os valores medidos pelo sensor proposto.

Verificou-se comportamento não linear entre a evapotranspiração de referência e valores de fluxo de seiva, pelos dois métodos testados.

O sensor é promissor na estimação do fluxo de seiva pelo método do balanço de calor. Tornando uma ferramenta útil, de baixo custo, para as pesquisas do comportamento hidráulico das plantas.

### 3.2.7 AGRADECIMENTOS

À Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro (UENF), à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio de Janeiro (FAPERJ), ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPQ) e à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (Capes). Ao Instituto Capixaba de Pesquisa, Assistência Técnica e Extensão Rural (Incaper), sobretudo ao Centro de Pesquisa, Desenvolvimento e Inovação do Norte (CPDI-NORTE, Incaper), bem como a Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA).

### 3.2.8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., SMITH, M. (1998) FAO Irrigation and Drainage Paper Crop by. *Irrigation and Drainage*, 300(56), 300. <http://www.kimberly.uidaho.edu/water/fao56/fao56.pdf>
- Amaral, J. A. T. do, Lopes, J. C., Amaral, J. F. T. do, Saraiva, S. H., Jesus Jr, W. C. de. (2007) Crescimento vegetativo e produtividade de cafeeiros Conilon propagados por estacas em tubetes. *Ciência e Agrotecnologia*, 31(6), 1624–1629. <https://doi.org/10.1590/S1413-70542007000600004>
- Aphalo, P. J. (2021) *ggpmisc: Miscellaneous Extensions to “ggplot2.”* <https://cran.r-project.org/package=ggpmisc>
- Baiamonte, G., Motisi, A. (2020) Analytical approach extending the Granier method to radial sap flow patterns. *Agricultural Water Management*, 231(December 2019), 105988. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2019.105988>
- Bird, R. B., Stewart, W. E., Lightfoot, E. N. (2001) *Transport Phenomena* (2nd ed., Vol. 1, Issue 1). John Wiley & Sons, Inc.
- Burgess, S. S. O., Adams, M. A., Turner, N. C., Beverly, C. R., Ong, C. K., Khan, A. A. H., Bleby, T. M. (2001) An improved heat pulse method to measure low and reverse rates of sap flow in woody plants. *Tree Physiology*, 21(15), 1157.
- Camargo, A. P. de, Sentelhas, P. C. (1997) Performance evaluation of different potential evapotranspiration estimating methods in the State of São Paulo, Brazil. In *Revista Brasileira de Agrometeorologia* (Vol. 5, Issue 1, pp. 89–97). [http://www.leb.esalq.usp.br/agmfacil/artigos/artigos\\_sentelhas\\_1997/1997\\_RB\\_Agro\\_5\(1\)\\_89-97\\_ETPM%E9todosSP.pdf](http://www.leb.esalq.usp.br/agmfacil/artigos/artigos_sentelhas_1997/1997_RB_Agro_5(1)_89-97_ETPM%E9todosSP.pdf)
- Čermák, J., Cienciala, E., Kučera, J., Lindroth, A., Bednářová, E. (1995) Individual variation of sap-flow rate in large pine and spruce trees and stand transpiration: a pilot study at the central NOPEX site. *Journal of Hydrology*, 168(1–4), 17–27. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(94\)02657-W](https://doi.org/10.1016/0022-1694(94)02657-W)
- Clearwater, M. J., Luo, Z., Mazzeo, M., Dichio, B. (2009) An external heat pulse method for measurement of sap flow through fruit pedicels, leaf petioles and other small-diameter stems. *Plant, Cell and Environment*, 32(12), 1652–1663. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3040.2009.02026.x>
- Cohen, Y., Fuchs, M., Green, G. C. (1981) Improvement of the heat pulse method for determining sap flow in trees. *Plant, Cell & Environment*, 4(5), 391–397. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3040.1981.tb02117.x>
- CONAB. (2021) *Companhia Nacional de Abastecimento: Acompanhamento da Safra Brasileira* (8th ed., Vol. 7, Issue 6).

- Dynamax. (2007) *Dynagage Sap Flow Sensor User Manual*. [https://dynamax.com/images/uploads/papers/Dynagage\\_Manual.pdf](https://dynamax.com/images/uploads/papers/Dynagage_Manual.pdf)
- Fazuoli, L. C., Mistro, J. C., Braghini, M. T. (2009) Melhoramento do café robusta no Instituto Agronômico de Campinas. In L. Zambolim (Ed.), *Tecnologias para produção do café conilon* (pp. 201–248).
- Flo, V., Martínez-Vilalta, J., Steppe, K., Schuldt, B., Poyatos, R. (2019) A synthesis of bias and uncertainty in sap flow methods. *Agricultural and Forest Meteorology*, 271(July 2018), 362–374. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2019.03.012>
- Freire, L. R., Balieiro, F. de C., Zonta, E., dos Anjos, L. H. C., Pereira, M. G., Lima, E., Guerra, J. G. M., Ferreira, M. B. C., Leal, M. A. de A., Campos, D. V. B. de, Polidoro, J. C. (2013) Manual de calagem e adubação. In *Embrapa* (Vol. 91).
- Fuchs, S., Leuschner, C., Link, R., Coners, H., Schuldt, B. (2017) Calibration and comparison of thermal dissipation, heat ratio and heat field deformation sap flow probes for diffuse-porous trees. *Agricultural and Forest Meteorology*, 244–245(March), 151–161. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2017.04.003>
- Garnier, S. (2018) *viridis: Default Color Maps from “matplotlib.”* <https://cran.r-project.org/package=viridis>
- Granier, A. (1985) Une nouvelle méthode pour la mesure du flux de sève brute dans le tronc des arbres. *Annales Des Sciences Forestières*, 42(2), 193–200. <https://doi.org/10.1051/forest:19850204>
- Grolemund, G., Wickham, H. (2011) Dates and Times Made Easy with lubridate. *Journal of Statistical Software*, 40(3), 1–25. <http://www.jstatsoft.org/v40/i03/>
- Jesus, A. M. S., Carvalho, S. P. de, Castro, E. M. de, Gomes, C. N. (2010) Observações anatômicas em plantas de *Coffea arabica* L. obtidas por enraizamento de estacas. *Revista Ceres*, 57(2), 175–180. <https://doi.org/10.1590/s0034-737x2010000200006>
- López-Bernal, Á., Testi, L., Villalobos, F. J. (2017) A single-probe heat pulse method for estimating sap velocity in trees. *The New Phytologist*, 216(1), 321–329. <https://doi.org/10.1111/nph.14694>
- Maes, W. H., Steppe, K. (2012) Estimating evapotranspiration and drought stress with ground-base thermal remote sensing in agriculture: a review. *Journal of Experimental Botany*, 63(13), 4671–4712. <https://doi.org/10.1093/jxb/err313>  
Advance
- Marcolan, A. L., Ramalho, A. R., Mendes, A. M., Teixeira, C. A. D., Fernandes, C. de F., Costa, J. N. V., Vieira Júnior, J. R., Oliveira, S. J. M., Fernandes, S. R., Veneziano, W. (2009) Cultivo dos cafeeiros Conilon e Robusta para Rondônia. *Embrapa Rondônia*, 3, 61. [www.cpafrro.embrapa.br](http://www.cpafrro.embrapa.br)
- Mares, R., Barnard, H. R., Mao, D., Revil, A., Singha, K. (2016) Examining diel



- patterns of soil and xylem moisture using electrical resistivity imaging. *Journal of Hydrology*, 536, 327–338. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.03.003>
- Marshall, D. C. (1958) Measurement of Sap Flow in Conifers by Heat Transport. *Plant Physiology*, 33(6), 385–396. <https://doi.org/10.1104/pp.33.6.385>
- Matiello, J. B., Santinato, R., Garcia, A. W., Almeida, S. R., Fernandes, D. R. (2010) *Cultura de Café no Brasil: Manual de recomendações*. SARC/PROCAFÉ.
- Partelli, F. L., Vieira, H. D., Silva, M. G., Ramalho, J. C. (2010) Seasonal vegetative growth of different age branches of conilon coffee tree. *Semina: Ciências Agrárias*, 31(3), 619–626. <https://doi.org/10.5433/1679-0359.2010v31n3p619>
- Poyatos, R., Granda, V., Molowny-Horas, R., Mencuccini, M., Steppe, K., Martínez-Vilalta, J. (2016) SAPFLUXNET: Towards a global database of sap flow measurements. *Tree Physiology*, 36(12), 1449–1455. <https://doi.org/10.1093/treephys/tpw110>
- Queiroz-Voltan, R. B., Paradel Filho, O., Carelli, M. L. C., Fahl, J. I. (1998) Aspectos Estruturais De Cafeeiro Infectado Com *Xylella fastidiosa*. *Bragantia*, 57(1), 23–33. <https://doi.org/10.1590/s0006-87051998000100003>
- R Core Team. (2020) *R: A Language and Environment for Statistical Computing*. <https://www.r-project.org/>
- SBCS. (2018) Sistema brasileiro de classificação de solos. In *Embrapa Solos*. <https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/1094003/sistema-brasileiro-de-classificacao-de-solos>
- Senock, R. S., Ham, J. M. (1993) Heat balance sap flow gauge for small diameter stems. *Plant, Cell & Environment*, 16(5), 593–601. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3040.1993.tb00908.x>
- SIGAPREGAO. (2020) *SIGA PREGÃO*. Item Nº 01 - Registrador Eletronico De Pressao | Pregão Nº 177/2020 - UASG 926431. <https://www.sigapregao.com.br/app/historico-item/926431/177/2020/1>
- Silveira, J. S. M., Carvalho, C. H. S. de. (1996) Efeito da época de irrigação sobre o desenvolvimento do botão floral e floração do café Conilon. In SDR/PROCAFÉ/EMBRAPA (Ed.), *22º Congresso Brasileiro de Pesquisas cafeeiras* (p. 100).
- Steppe, K., Pauw, D. J. W. De, Doody, T. M., Teskey, R. O. (2010) Agricultural and Forest Meteorology A comparison of sap flux density using thermal dissipation , heat pulse velocity and heat field deformation methods. *Agricultural and Forest Meteorology*, 150(7–8), 1046–1056. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2010.04.004>
- Steppe, K., Vandegehuchte, M. W., Tognetti, R., Mencuccini, M. (2015) Sap flow as a key trait in the understanding of plant hydraulic functioning. *Tree*

- Physiology*, 35(4), 341–345. <https://doi.org/10.1093/treephys/tpv033>
- Van de Put, H., De Pauw, D. J. W., Steppe, K. (2020) Evaluation and optimization of a 3D-printed external heat pulse sensor. *Computers and Electronics in Agriculture*, 173(January), 105413. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2020.105413>
- Vandeghechuchte, M. W., Burgess, S. S. O., Downey, A., Steppe, K. (2015) Influence of stem temperature changes on heat pulse sap flux density measurements. *Tree Physiology*, 35(4), 346–353. <https://doi.org/10.1093/treephys/tpu068>
- Vandeghechuchte, M. W., Steppe, K. (2012a) Sapflow+: A four-needle heat-pulse sap flow sensor enabling nonempirical sap flux density and water content measurements. *New Phytologist*, 196(1), 306–317. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2012.04237.x>
- Vandeghechuchte, M. W., Steppe, K. (2012b) Use of the correct heat conduction-convection equation as basis for heat-pulse sap flow methods in anisotropic wood. *Journal of Experimental Botany*, 63(8), 2833–2839. <https://doi.org/10.1093/jxb/ers041>
- Vandeghechuchte, M. W., Steppe, K. (2013) Corrigendum to: Sap-flux density measurement methods: working principles and applicability. *Functional Plant Biology*, 40(10), 1088. [https://doi.org/10.1071/fp12233\\_co](https://doi.org/10.1071/fp12233_co)
- Venturin, A. Z., Guimarães, C. M., Sousa, E. F. de, Machado Filho, J. A., Rodrigues, W. P., Serrazine, Í. de A., Bressan-Smith, R., Marciano, C. R., Campostrini, E. (2020) Using a crop water stress index based on a sap flow method to estimate water status in conilon coffee plants. *Agricultural Water Management*, 241(June), 106343. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106343>
- Weibel, F. P., de Vos, J. A. (1994) Transpiration measurements on apple trees with an improved stem heat balance method. *Plant and Soil*, 166(2), 203–219. <https://doi.org/10.1007/BF00008334>
- Wickham, H. (2016) *ggplot2: Elegant Graphics for Data Analysis*. Springer-Verlag New York. <https://ggplot2.tidyverse.org>
- Wickham, H., Averick, M., Bryan, J., Chang, W., McGowan, L. D., François, R., Grolemund, G., Hayes, A., Henry, L., Hester, J., Kuhn, M., Pedersen, T. L., Miller, E., Bache, S. M., Müller, K., Ooms, J., Robinson, D., Seidel, D. P., Spinu, V., ... Yutani, H. (2019) Welcome to the tidyverse. *Journal of Open Source Software*, 4(43), 1686. <https://doi.org/10.21105/joss.01686>
- Wickham, H., Seidel, D. (2020) *scales: Scale Functions for Visualization*. <https://cran.r-project.org/package=scales>
- Willmott, C. J. (1981) On the validation of models. *Physical Geography*, 2(2), 184–194. <https://doi.org/10.1080/02723646.1981.10642213>

## 4 RESUMOS E CONCLUSÕES

Como alternativa aos modelos comerciais existentes, que em sua maioria são onerosos e indicados para espécimes vegetais de grande porte e alto fluxo de seiva, os sensores apresentados neste trabalho demonstraram-se eficazes no que lhe foram propostos. Pode-se identificar as velocidades de fluxo de seiva, em pecíolos de mamão com forte correlação positiva com relação ao déficit de pressão de vapor d'água e demanda transpirativa local, tanto para plantas com bom nível de hidratação, quanto para plantas em estresse. Os valores negativos indicam que o sensor é capaz de identificar também os fluxos reversos de seiva.

Em cafeeiro Conilon, sensores baseados no método de balanço de energia demonstram-se funcionais e aplicáveis para medições de fluxo de seiva, em cafeeiro, com diferentes estágios de hidratação com correlação forte positiva quando comparados aos valores de fluxo de seiva obtidos de modelos comerciais.

Os custos envolvidos no processo de aquisição dos componentes para montagens dos equipamentos representam cerca 0,37% do custo envolvendo a aquisição de um modelo comercial de registro de dados de 16 canais. Fazendo com que os equipamentos desenvolvidos no presente trabalho seja uma alternativa de baixo custo, não destrutiva, não incisiva, de fácil instalação, para os estudos sobre os fluxos de seiva e as propriedades hidráulicas em plantas.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., SMITH, M. (1998) FAO Irrigation and Drainage Paper Crop by. *Irrigation and Drainage*, 300(56), 300. <http://www.kimberly.uidaho.edu/water/fao56/fao56.pdf>
- ANA, Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (2021) Atlas Irrigação. Uso da água na agricultura irrigada. In *Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico*. <https://portal1.snirh.gov.br/ana/apps/storymaps/stories/a874e62f27544c6a986da1702a911c6b>
- Asad, U., Kumar, R., Han, X., Zheng, M. (2011) Precise instrumentation of a diesel single-cylinder research engine. *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation*, 44(7), 1261–1278. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2011.03.028>
- Baker, J. M., Van Bavel, C. H. M. (1987) Measurement of mass flow of water in the stems of herbaceous plants. *Plant, Cell & Environment*, 10(9), 777–782. <https://doi.org/10.1111/1365-3040.ep11604765>
- Burgess, S. S. O., Adams, M. A., Turner, N. C., Beverly, C. R., Ong, C. K., Khan, A. A. H., Bleby, T. M. (2001) Erratum: An improved heat pulse method to measure low and reverse rates of sap flow in woody plants. *Tree Physiology*, 21(15), 589-598.
- Čermák, J., Cienciala, E., Kučera, J., Lindroth, A., Bednářová, E. (1995) Individual variation of sap-flow rate in large pine and spruce trees and stand transpiration: a pilot study at the central NOPEX site. *Journal of Hydrology*, 168(1–4), 17–27. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(94\)02657-W](https://doi.org/10.1016/0022-1694(94)02657-W)
- Čermák, J., Deml, M., Penka, M. (1973) *A new method of sap flow rate determination in trees*. *Biologia Plantarum*, 15(3), 171–178. <https://doi.org/10.1007/bf02922390>

- Chase, O. (2007). Sistemas Embarcados. *Student Chapter of the Brazilian Automation Society*, 7. <http://www.lyfreitas.com.br/ant/pdf/Embarcados.pdf>
- Cohen, Y., Alchanatis, V., Sela, E., Saranga, Y., Cohen, S., Meron, M., Bosak, A., Tsipris, J., Ostrovsky, V., Orolov, V., Levi, A., Brikman, R. (2015) Crop water status estimation using thermography: multi-year model development using ground-based thermal images. *Precision Agriculture*, 16(3), 311–329. <https://doi.org/10.1007/s11119-014-9378-1>
- Cohen, Y., Fuchs, M., Green, G. C. (1981) Improvement of the heat pulse method for determining sap flow in trees. *Plant, Cell & Environment*, 4(5), 391–397. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3040.1981.tb02117.x>
- CONAB. (2021a) Companhia Nacional de Abastecimento: *Acompanhamento da Safra Brasileira*. In Companhia Nacional de Abastecimento: *Acompanhamento da Safra Brasileira* (8ed) ,7(6), 1–89.
- CONAB. (2021b) Companhia Nacional de Abastecimento: *Boletim Hortigranjeiro* (Vol. 7).
- Crafts, A. S., Currier, H. B., Stocking, C. R. (1949) Water in the Physiology of Plants. *Agronomy Journal*, 42(8), 416–416. <https://doi.org/10.2134/agronj1950.00021962004200080017x>
- Dalcomo, J. M. D., Henrique, D. V., Adesio, F., Fabio, L. P. (2017) Growth comparison of 22 genotypes of conilon coffee after regular pruning cycle. *African Journal of Agricultural Research*, 12(1), 63–70. <https://doi.org/10.5897/ajar2016.11261>
- Davis, A. P., Tosh, J., Ruch, N., Fay, M. F. (2011) Growing coffee: *Psilanthus* (Rubiaceae) subsumed on the basis of molecular and morphological data; implications for the size, morphology, distribution and evolutionary history of *Coffea*. *Botanical Journal of the Linnean Society*, 167(4), 357–377. <https://doi.org/10.1111/j.1095-8339.2011.01177.x>
- Dynamax. (2007) *Dynagage Sap Flow Sensor User Manual*. [https://dynamax.com/images/uploads/papers/Dynagage\\_Manual.pdf](https://dynamax.com/images/uploads/papers/Dynagage_Manual.pdf)
- Feng, Y., Hao, W., Gao, L., Li, H., Gong, D., Cui, N. (2019) Comparison of maize water consumption at different scales between mulched and non-mulched croplands. *Agricultural Water Management*, 216(February), 315–324. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2019.02.016>
- Ferrão M., A. G., Souza, E. M. R., Fonseca, A. F. A. da, Ferrão R., G. (2019) Self-incompatibility and Sustainable Production of Conilon Coffe. In *Conilon Coffee: Update and expanded* (3rd). Incaper. p974. <https://biblioteca.incaper.es.gov.br/digital/bitstream/123456789/3514/1/book-conilon-coffee-3rd-edition-2019-Incaper.pdf>
- Ferrão R., G., Fonseca, A. F. A. da, Ferrão M., A. G., De Muner, L. H. (2019) *Conilon Coffee: Update and expanded* (3rd). Incaper. p974.

<https://biblioteca.incaper.es.gov.br/digital/bitstream/123456789/3514/1/book-conilon-coffee-3rd-edition-2019-Incaper.pdf>

- Fuchs, S., Leuschner, C., Link, R., Coners, H., Schuldt, B. (2017) Calibration and comparison of thermal dissipation, heat ratio and heat field deformation sap flow probes for diffuse-porous trees. *Agricultural and Forest Meteorology*, 244–245(March), 151–161. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2017.04.003>
- Garcia, R. F., Queiroz, D. M. de, Miyagaki, O. H., Pinto, F. de A. de C. (2003) Programa computacional para aquisição de dados para avaliação de máquinas agrícolas. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 7(2), 375–381. <https://doi.org/10.1590/s1415-43662003000200032>
- Gesteira, L. G. G. K., Torres, E. A., Pepe, I. M. (2014) *Development of a Data Acquisition System for a Chassis Dynamometer of Automotive Vehicles*. 6, 858–867. [http://abcm.org.br/upload/files/PI\\_VIII\\_02%281%29.pdf](http://abcm.org.br/upload/files/PI_VIII_02%281%29.pdf)
- Granier, A. (1985) Une nouvelle méthode pour la mesure du flux de sève brute dans le tronc des arbres. *Annales Des Sciences Forestières*, 42(2), 193–200. <https://doi.org/10.1051/forest:19850204>
- Gutiérrez, M. V., Harrington, R. A., Meinzer, F. C., Fownes, J. H. (1994) The effect of environmentally induced stem temperature gradients on transpiration estimates from the heat balance method in two tropical woody species. *Tree Physiology*, 14(2), 179–190. <https://doi.org/10.1093/treephys/14.2.179>
- Gutiérrez, M. V., Meinzer, F. C. (1994) Estimating water use and irrigation requirements of coffee in Hawaii. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 119(3), 652–657. <https://doi.org/10.21273/jashs.119.3.652>
- IBGE. (2017) *Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, Censo Agropecuário*. Censo Definitivo 2017. <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/pesquisa/24/76693>
- Johnson, G. W., Jennings, R. (2006) Labview Graphical Programming (4nd edition). In *Industrial Robot: An International Journal* (Vol. 25, Issue 3). <https://doi.org/10.1108/ir.1998.04925cae.002>
- López-Bernal, Á., Testi, L., Villalobos, F. J. (2017) A single-probe heat pulse method for estimating sap velocity in trees. *New Phytologist*, 216(1), 321–329. <https://doi.org/10.1111/nph.14694>
- Marshall, D. C. (1958) Measurement of Sap Flow in Conifers by Heat Transport. *Plant Physiology*, 33(6), 385–396. <https://doi.org/10.1104/pp.33.6.385>
- Melo Lima, I. de, Ventura, J. A., Costa, H. (2021) *ES8161 Goytacá: Porta-enxerto clonal de cafeeiro Conilon resistente a nematoide-das-alhas*. Incaper.

- Partelli, F. L., Vieira, H. D., Silva, M. G., Ramalho, J. C. (2010) Seasonal vegetative growth of different age branches of conilon coffee tree. *Semina: Ciências Agrárias*, 31(3), 619–626. <https://doi.org/10.5433/1679-0359.2010v31n3p619>
- Pellison, A. T. (2018) DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA AUTMÁTICO DE AQUISIÇÃO DE DADOS DE EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA POR MEIO DE MICROCONTROLADORES DE CÓDIGO ABERTO E DE BAIXO CUSTO [Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” Campus de Botucatu]. In *Doutorado em Agronomia*. [https://repositorio.unesp.br/bitstream/handle/11449/154312/pellison\\_at\\_dr\\_botfca.pdf?sequence=3&isAllowed=y](https://repositorio.unesp.br/bitstream/handle/11449/154312/pellison_at_dr_botfca.pdf?sequence=3&isAllowed=y)
- Poyatos, R., Granda, V., Molowny-Horas, R., Mencuccini, M., Steppe, K., Martínez-Vilalta, J. (2016) SAPFLUXNET: Towards a global database of sap flow measurements. *Tree Physiology*, 36(12), 1449–1455. <https://doi.org/10.1093/treephys/tpw110>
- Ronchi, C. P., DaMatta, F. M. (2019) Physiological Aspects of Conilon Coffee. In G. Ferrão R., A. F. A. da Fonseca, A. G. Ferrão M., & L. H. De Muner (Eds.), *Conilon Coffee: Update and expanded* (3ed), pp.111–144. Incaper.
- Ryu, K. (2013) Effects of pilot injection timing on the combustion and emissions characteristics in a diesel engine using biodiesel-CNG dual fuel. *Applied Energy*, 111, 721–730. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.05.046>
- Sakuratani, T. (1981) A Heat Balance Method for Measuring Water Flux in the Stem of Intact Plants. *Journal of Agricultural Meteorology*, 37(1), 9–17. <https://doi.org/10.2480/agrmet.37.9>
- Senock, R. S., Ham, J. M. (1993) Heat balance sap flow gauge for small diameter stems. *Plant, Cell & Environment*, 16(5), 593–601. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3040.1993.tb00908.x>
- SIGAPREGAO. (2020) SIGA PREGÃO. Item Nº 01 - Registrador Eletronico De Pressao | Pregão Nº 177/2020 - UASG 926431. <https://www.sigapregao.com.br/app/historico-item/926431/177/2020/1>
- Silva, V. A., Antunes, W. C., Guimarães, B. L. S., Paiva, R. M. C., Silva, V. de F., Ferrão M., A. G., DaMatta, F. M., Loureiro, M. E. (2010) Physiological response of Conilon coffee clone sensitive to drought grafted onto tolerant rootstock. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 45(5), 457–464. <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2010000500004>
- Smith, G. M. (2020) *Histórico de Aquisição de Dados - dos Gravadores de Papel ao DAQ Digital*. <https://dewesoft.com/br/aquisicao-de-dados/historia-aquisicao-de-dados>
- Sousa, E. F. de, Santolin, M. A., Do, F. C. (2020) Estimation of steady water flux density in a porous medium by Fourier analysis of temperature variations in a cyclic heat pulse system. *Acta Horticulturae*, 1300, 187–192. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2020.1300.24>

- Steppe, K., Vandegehuchte, M. W., Tognetti, R., Mencuccini, M. (2015) Sap flow as a key trait in the understanding of plant hydraulic functioning. *Tree Physiology*, 35(4), 341–345. <https://doi.org/10.1093/treephys/tpv033>
- Swanson, R. H. (1994) Significant historical developments in thermal methods for measuring sap flow in trees. *Agricultural and Forest Meteorology*, 72(1–2), 113–132. [https://doi.org/10.1016/0168-1923\(94\)90094-9](https://doi.org/10.1016/0168-1923(94)90094-9)
- Thidar, M., Gong, D., Mei, X., Gao, L., Li, H., Hao, W., Gu, F. (2020) Mulching improved soil water, root distribution and yield of maize in the Loess Plateau of Northwest China. *Agricultural Water Management*, 241. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106340>
- Van de Put, H., De Pauw, D. J. W., Steppe, K. (2020) Evaluation and optimization of a 3D-printed external heat pulse sensor. *Computers and Electronics in Agriculture*, 173. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2020.105413>
- Venturin, A. Z., Guimarães, C. M., Sousa, E. F. de, Machado Filho, J. A., Rodrigues, W. P., Serrazine, Í. de A., Bressan-Smith, R., Marciano, C. R., Campostrini, E. (2020) Using a crop water stress index based on a sap flow method to estimate water status in conilon coffee plants. *Agricultural Water Management*, 241. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106343>
- Wang, Y., Zhang, X., Xiao, X., Heitman, J., Horton, R., Ren, T. (2017) An empirical calibration for heat-balance sap-flow sensors in maize. *Agronomy Journal*, 109(3), 1122–1128. <https://doi.org/10.2134/agronj2016.10.0611>
- Weibel, F. P., de Vos, J. A. (1994) Transpiration measurements on apple trees with an improved stem heat balance method. *Plant and Soil*, 166(2), 203–219. <https://doi.org/10.1007/BF00008334>
- Zucoloto, M., Schimdt, E. R., Coelho, R. I. (2015) *Fruticultura Tropical: Diversificação e consolidação*. <https://biblioteca.incaper.es.gov.br/digital/bitstream/123456789/3174/1/BRT-fruticulturatropical-v.1.pdf#page=158>



## APÊNDICES

## APÊNDICE A

Tabela 5. Levantamento de custos dos componentes para montagem do sistema de aquisição de dados de saldo de radiação (DASRN)

Descrição	Quantidade	Valor unitário	Valor Total
Barra pino fêmea MCI 2,54 mm 180° 1 x 40	1	R\$ 2,50	R\$ 2,50
Barra pino macho 2,54 mm 180° 1 x 40	1	R\$ 1,85	R\$ 1,85
Bateria de lítio Cr1220 3 V	1	R\$ 5,00	R\$ 5,00
Módulo shield data logger sd card	1	R\$ 35,00	R\$ 35,00
Capacitor cerâmico 103 10 nF 50 V	2	R\$ 0,18	R\$ 0,35
Capacitor eletrolítico 100 uf 16 V	1	R\$ 0,20	R\$ 0,20
Cartão microSD 16 Gb classe 10	1	R\$ 58,00	R\$ 58,00
Chave gangorra	1	R\$ 2,62	R\$ 2,62
Conector macho P4	1	R\$ 2,95	R\$ 2,95
Microcontrolador STM32 stm32f103c8t6 bluepill	1	R\$ 47,50	R\$ 47,50
Placa fenolite 10 cm x 15 cm	1	R\$ 5,95	R\$ 5,95
Regulador de Tensão ajustável para protoboad	1	R\$ 12,90	R\$ 12,90
Módulo shield ADS 1115 4 canais 16 bit	1	R\$ 34,90	R\$ 34,90
<b>Total</b>			<b>R\$ 209,72</b>

## APÊNDICE B

Tabela 6. Levantamento de custos dos componentes para montagem do sistema wireless de aquisição de dados de fluxo de seiva (WDAS)

Descrição	Quantidade	Valor unitário	Valor Total
Barra pino fêmea MCI 2,54 mm 180° 1 x 40	1	R\$ 2,50	R\$ 2,50
Barra pino macho 2,54 mm 180° 1 x 40	1	R\$ 1,85	R\$ 1,85
Bateria de lítio Cr3032 3,3 V	1	R\$ 10,00	R\$ 10,00
Capacitor cerâmico 103 10 nF 50 V	1	R\$ 0,18	R\$ 0,18
Capacitor eletrolítico 100 uf 16 V	2	R\$ 0,20	R\$ 0,40
Cartão microSD 16 Gb classe 10	1	R\$ 58,00	R\$ 58,00
Chave gangorra	1	R\$ 2,62	R\$ 2,62
Conector fêmea Jack P4	1	R\$ 1,07	R\$ 1,07
Conector macho P4	1	R\$ 2,95	R\$ 2,95
Led difuso 3mm verde	1	R\$ 0,21	R\$ 0,21
Microcontrolador STM32 stm32f103c8t6 bluepill	1	R\$ 47,50	R\$ 47,50
Shield bluetooth RS 232 HC-06	1	R\$ 33,70	R\$ 33,70
Shield wireless Nrf24l01 com antena externa	1	R\$ 30,78	R\$ 30,78
Placa fenolite 10 cm x 10 cm	1	R\$ 5,95	R\$ 5,95
Push bottom	1	R\$ 0,20	R\$ 0,20
Regulador de Tensão LM317T	1	R\$ 2,37	R\$ 2,37
Resistores 1/4 W	5	R\$ 0,13	R\$ 0,65
Shield microSD	1	R\$ 14,50	R\$ 14,50
<b>Total</b>			<b>R\$ 215,42</b>

## APÊNDICE C

Tabela 7. Levantamento de custos dos componentes para montagem de cinco estações wireless de fluxo de seiva (EWSF)

Descrição	Quantidade	Valor unitário	Valor Total
Arduino NANO ATMEGA 328p	5	R\$ 53,90	R\$ 269,50
Barra pino fêmea MCI 2,54 mm 180° 1 x 40	7	R\$ 5,00	R\$ 35,00
Barra pino macho 2,54 mm 180° 1 x 40	7	R\$ 1,85	R\$ 12,95
Cabo tipo manga 5 vias AWG 1,5 mm	20	R\$ 6,01	R\$ 120,20
Capacitor cerâmico 103 10 nF 50 V	15	R\$ 0,18	R\$ 2,63
Capacitor eletrolítico 100 µF 16 V	15	R\$ 0,20	R\$ 3,00
Capacitor eletrolítico 4700 µF 16 V	5	R\$ 1,82	R\$ 9,10
Chave gangorra	5	R\$ 2,62	R\$ 13,08
CI NE555	5	R\$ 1,45	R\$ 7,25
Conector fêmea Jack P4	5	R\$ 1,07	R\$ 5,35
Conector macho P4	5	R\$ 2,95	R\$ 14,75
Diôdo Zener SMD 3,3 V 1/2 W	5	R\$ 0,40	R\$ 1,98
Led difuso 3mm verde	5	R\$ 0,21	R\$ 1,05
Led difuso 3mm vermelho	5	R\$ 0,21	R\$ 1,05
Módulo wireless Nrf24l01 com antena externa	5	R\$ 30,78	R\$ 153,88
Placa fenolite 10 cm x 10 cm	7	R\$ 10,00	R\$ 70,00
Regulador de Tensão LM317T	15	R\$ 2,37	R\$ 35,55
Resistor 1/4 W	85	R\$ 0,13	R\$ 11,05
Resistor SMD 47Ω	5	R\$ 0,60	R\$ 3,00
Shield AD1115 4 canais 16 bit	10	R\$ 34,90	R\$ 349,00
Solda estanho 60 x 40 Fio 1,0 mm c/fluxo RA (T2) 500 g	0,5	R\$ 140,69	R\$ 70,35
Termistor SMD 10kΩ	10	R\$ 0,97	R\$ 9,70
Transistor TIP32c PNP	10	R\$ 8,61	R\$ 86,10
Total por EWSF			R\$ 257,10
Total			R\$ 1.285,50