

**DESENVOLVIMENTO, CALIBRAÇÃO, VALIDAÇÃO E APRIMORAÇÃO
DE UM SENSOR DE FLUXO DE SEIVA XILEMÁTICA PARA A
CULTURA DO CAFÉ CONILON**

ELTON FERREIRA LIMA

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DO NORTE
FLUMINENSE DARCY RIBEIRO**

**CAMPOS DOS GOYTACAZES - RJ
ABRIL-2025**

**DESENVOLVIMENTO, CALIBRAÇÃO, VALIDAÇÃO E APRIMORAÇÃO
DE UM SENSOR DE FLUXO DE SEIVA XILEMÁTICA PARA A
CULTURA DO CAFÉ CONILON**

ELTON FERREIRA LIMA

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: Prof. Elias Fernandes de Sousa

CAMPOS DOS GOYTACAZES - RJ
ABRIL –2025

FICHA CATALOGRÁFICA
UENF - Bibliotecas
Elaborada com os dados fornecidos pelo autor.

L732 Lima, Elton Ferreira.

DESENVOLVIMENTO, CALIBRAÇÃO, VALIDAÇÃO E APRIMORAÇÃO DE UM SENSOR DE FLUXO DE SEIVA XILEMÁTICA PARA A CULTURA DO CAFÉ CONILON / Elton Ferreira Lima. - Campos dos Goytacazes, RJ, 2025.
80 f. : il.
Inclui bibliografia.

Tese (Doutorado em Produção Vegetal) - Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Centro de Ciências e Tecnologias Agropecuárias, 2025.
Orientador: Elias Fernandes de Sousa.

1. Eficiência na irrigação. 2. estresse hídrico. 3. monitoramento hídrico. I. Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro. II. Título.

CDD - 630

**DESENVOLVIMENTO, CALIBRAÇÃO, VALIDAÇÃO E APRIMORAÇÃO
DE UM SENSOR DE FLUXO DE SEIVA XILEMÁTICA PARA A
CULTURA DO CAFÉ CONILON**

ELTON FERREIRA LIMA

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.

Aprovada em 11 de abril de 2025

Comissão Examinadora:

Documento assinado digitalmente
 JOSE ALTINO MACHADO FILHO
Data: 31/07/2025 18:13:28-0300
Verifique em <https://validar.itd.gov.br>

Pesquisador José Altino Machado Filho (D.Sc. Produção Vegetal)–INCAPER

Documento assinado digitalmente
 ELIEMAR CAMPOSTRINI
Data: 02/08/2025 13:53:14-0300
Verifique em <https://validar.itd.gov.br>

Prof. Eliemar Campostrini (D.Sc. Produção Vegetal)–UENF

Documento assinado digitalmente
 RICARDO FERREIRA GARCIA
Data: 03/08/2025 19:50:54-0300
Verifique em <https://validar.itd.gov.br>

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

Documento assinado digitalmente
 ELIAS FERNANDES DE SOUSA
Data: 30/07/2025 21:04:18-0300
Verifique em <https://validar.itd.gov.br>

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

*Aos meus pais Manoel Ferreira
Lima e Maria Silva Lima, por todo
apoio a mim concedidos
independente de tudo, pois sem eles
eu não teria chegado aqui.*

AGRADECIMENTOS

A Deus, por todas as bênçãos alcançadas e por me permitir concluir este trabalho.

Aos meus pais, Manoel Ferreira Lima e Maria Silva Lima (*in memoriam*), por todo o suporte e pelas condições que me deram para chegar até aqui.

À minha amiga Rakiely Martins da Silva, pela amizade sincera que construímos, pela cumplicidade, pelos momentos de descontração e por me suportar falando sobre o mesmo assunto várias e várias vezes. Por não ter soltado a minha mão nos momentos fáceis e, principalmente, nos difíceis.

Ao meu orientador, Elias Fernandes de Sousa, pela paciência e compreensão ao longo desses quatro anos, pelos ensinamentos transmitidos, pelas oportunidades que me concedeu de desenvolver minha didática e por todo o suporte na condução dos experimentos.

Às minhas amigas-irmãs de longa data que a vida me deu, Jainara Netto e Jossimara Ferreira Damascena, por sempre estarem comigo, mesmo à distância. Pelo suporte emocional em um dos momentos mais difíceis que enfrentei na vida no último ano, pelas palavras de incentivo e por me fazerem acreditar que a vida voltaria a sorrir, mesmo quando eu já não acreditava mais.

Às minhas ex-professoras, hoje grandes amigas, Letícia Araújo e Priscila Gonçalves, por todo o incentivo, pelos ensinamentos e pelos momentos que compartilhamos ao longo da vida.

À minha amiga Jéssica Martins, pela amizade sincera que construímos, pela cumplicidade e por todos os bons momentos vividos — e põe momentos nisso.

Aos meus ex-orientadores Wilson Araújo da Silva e Cristiane Matos da Silva, que foram os primeiros a me abrir as portas para o mundo da pesquisa e os grandes responsáveis por eu amar tanto a área da irrigação.

Aos meus amigos, Daniel Medeiros, Beatriz Salles, Adriely Canedo, Dádiva Paula, Barbara Oliveira, Raudielle Ferreira e Jéssica Loss pela amizade, pelos bons momentos que compartilhamos e pelos momentos ruins também.

Ao Gustavo Henrique da Silva Conceição, que chegou na minha vida em um momento que eu não esperava por ninguém, por me ensinar que as relações são mais que meros encontros, por me despertar para o mundo dos concursos, por ser uma

pessoa amável, por me fazer sentir amado e por me suportar com todas as minhas inseguranças e as vezes os surtos.

Aos membros da banca por aceitarem o convite e pelas contribuições valiosas feitas no trabalho,

À UENF e ao Programa de Pós-Graduação em Produção Vegetal pelas intalações que me permitiram executar e concluir esse trabalho

A CAPES pela concessão da bolsa.

SUMÁRIO

RESUMO.....	VIII
ABSTRACT.....	IX
1 INTRODUÇÃO GERAL.....	12
2 REVISÃO DE LITERATURA.....	15
2.1 Medição do fluxo de seiva xilemático.....	15
2.2 A cultura do café no brasil.....	17
2.3 Requerimento hídrico da cultura do café	18
2.4 Estresse hídrico na cultura do café.....	20
2.5 Medição do fluxo de seiva em plantas de café.....	21
3 TRABALHOS.....	23
3.1 DESENVOLVIMENTO, CALIBRAÇÃO E VALIDAÇÃO DE UM SENSOR DE FLUXO DE SEIVA XILEMÁTICA.....	23
3.2 APRIMORAMENTO DE UM SENSOR DE FLUXO DE SEIVA XILEMÁTICA PARA MEDIÇÃO DA TRANSPIRAÇÃO DE CAFÉ CONILON EM CONDIÇÕES IRRIGADAS E DE DÉFICT HÍDRICO.....	51
4 CONCLUSÕES.....	67
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	70

RESUMO

LIMA; Elton Ferreira D.Sc.; Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro; Abril de 2025; DESENVOLVIMENTO, CALIBRAÇÃO, VALIDAÇÃO E APRIMORAÇÃO DE UM SENSOR DE FLUXO DE SEIVA XILEMÁTICA PARA A CULTURA DO CAFÉ CONILON; Orientador: Prof.^{a.} Ds.c. Elias Fernandes de Sousa.

Considerada uma cultura perene, o café é fortemente impactado pelas mudanças climáticas, que se agravam a cada ano. O aumento das temperaturas e a escassez de água afetam todos os aspectos da cafeicultura, resultando em variações na produção e no aumento dos preços do produto final. Em um futuro próximo, áreas atualmente adequadas para o cultivo do café podem se tornar impróprias, comprometendo a sustentabilidade do setor. Esses desafios impactam desde os pequenos produtores, que dependem dessa cultura para sua subsistência, até o consumidor final, que sente os efeitos na disponibilidade e no custo do café. Diante desse cenário, torna-se urgente o desenvolvimento de estratégias eficazes para minimizar os efeitos das mudanças climáticas, especialmente no que se refere à escassez de água. Entre as abordagens promissoras, o monitoramento do status hídrico das plantas por meio da medição do fluxo de seiva tem ganhado destaque. No entanto, os sensores disponíveis no mercado apresentam limitações significativas, como alto custo, elevado consumo de energia, modelos complexos que dificultam a aplicação em larga escala e a necessidade de inserção de sondas na planta, o que pode causar ferimentos e comprometer a precisão das medições. Pensando em superar essas limitações, este trabalho teve como objetivo desenvolver, calibrar, validar e aprimorar um novo modelo de sensor de fluxo de seiva para a cultura do café conilon. Para isso, foram conduzidos dois estudos com o clone A1 do café conilon na Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro (UENF). No primeiro estudo, os sensores de fluxo de seiva foram desenvolvidos, calibrados em laboratório e validados em casa de vegetação, com o modelo desenvolvido se destacando por sua simplicidade, pois necessita de apenas quatro medições para computar o fluxo de seiva: o produto das amplitudes e a soma das fases tanto para condições de fluxo quanto para quando não há fluxo. Nesse estudo, as medições feitas pelo sensor foram comparadas a dados gravimétricos do fluxo de água obtidos em laboratório e a um sistema aberto de múltiplas câmaras em casa de vegetação, que media as trocas gasosas do dossel inteiro. No segundo estudo, foram desenvolvidos três fluxímetros, compostos por uma caixa organizadora de 30 litros, que servia como reservatório de água, e uma bandeja de 10 litros com um

orifício central, permitindo a passagem da água do reservatório para o seu interior. Cada fluxímetro continha um tubo de Mariotte, que abastecia o reservatório de forma a manter a lâmina de água na bandeja constante. Em dois desses fluxímetros, cada bandeja de 10 litros continha 10 mudas de café conilon, e o sensor de fluxo de seiva foi instalado em uma muda de cada bandeja para monitoramento. O terceiro fluxímetro serviu como referência para controle da entrada e saída de ar. Quinze dias após o início do experimento, o abastecimento de água de um dos fluxímetros foi interrompido, e as plantas foram submetidas a um déficit hídrico gradual, com o objetivo de testar a capacidade do sensor em identificar a escassez de água. Os dados medidos pelo sensor de fluxo de seiva também foram comparados aos obtidos pelo sistema aberto de múltiplas câmaras, que media as trocas gasosas do dossel inteiro, proporcionando uma avaliação mais ampla da eficiência do sensor. Os resultados obtidos mostraram que o sensor aqui desenvolvido pode ser usado para medição do fluxo de seiva em plantas em substituição a outros métodos disponíveis no mercado.

Palavras-chave: Eficiência na irrigação, stresse hídrico, monitoramento hídrico.

ABSTRACT

LIMA; Elton Ferreira; D.Sc.; Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro; abril de 2025; DEVELOPMENT, CALIBRATION, VALIDATION, AND IMPROVEMENT OF A XYLEM SAP FLOW SENSOR FOR CONILON COFFEE CULTIVATION; Adviser: Prof.^a. Ds.c. Elias Fernandes de Sousa.

Considered a perennial crop, coffee is strongly impacted by climate change, which intensifies every year. The increase in temperatures and water scarcity affect all aspects of coffee production, resulting in variations in yield and higher prices for the final product. In the near future, areas currently suitable for coffee cultivation may become unsuitable, jeopardizing the sustainability of the sector. These challenges affect not only small producers, who rely on this crop for their livelihood, but also the final consumer, who feels the effects on coffee availability and cost. In light of this scenario, the development of effective strategies to minimize the effects of climate change, especially regarding water scarcity, becomes urgent. Among the promising approaches, monitoring the water status of plants through sap flow measurement has gained prominence. However, the sensors available on the market present significant limitations, such as high cost, high energy consumption, complex models that hinder large-scale application, and the need to insert probes into the plant, which can cause damage and compromise the accuracy of the measurements. Aiming to overcome these limitations, this study aimed to develop, calibrate, validate, and improve a new sap flow sensor model for conilon coffee cultivation. To achieve this, two studies were conducted with the A1 clone of conilon coffee at the State University of Northern Rio de Janeiro (UENF). In the first study, sap flow sensors were developed, calibrated in the laboratory, and validated in a greenhouse, with the developed model standing out for its simplicity, as it requires only four measurements to compute the sap flow: the product of the amplitudes and the sum of the phases for both flow and no-flow conditions. In this study, the measurements taken by the sensor were compared to gravimetric water flow data obtained in the laboratory and to an open system with multiple chambers in the greenhouse, which measured the gas exchanges of the entire canopy. In the second study, three fluxmeters were developed, consisting of a 30-liter organizer box that served as a water reservoir and a 10-liter tray with a central hole, allowing the water to pass from the reservoir into the tray. Each fluxmeter contained a Mariotte tube, which supplied water to the reservoir, keeping the water level in the tray constant. In two of these fluxmeters, each 10-liter tray contained 10 conilon coffee

seedlings, and the sap flow sensor was installed in one seedling in each tray for monitoring. The third fluxmeter served as a reference for controlling the entry and exit of air. Fifteen days after the start of the experiment, the water supply to one of the fluxmeters was cut off, and the plants were subjected to a gradual water deficit to test the sensor's ability to identify water scarcity. The data measured by the sap flow sensor were also compared to those obtained from the open system with multiple chambers, which measured the gas exchanges of the entire canopy, providing a broader evaluation of the sensor's efficiency. The results obtained showed that the sensor developed here can be used to measure sap flow in plants, replacing other methods currently available on the market.

Keywords: Irrigation efficiency, water stress, water monitoring.

1 INTRODUÇÃO GERAL

Uma compreensão mais aprofundada do status hídrico das culturas envolve a estimativa separada dos componentes da evapotranspiração da cultura (ETc) (Cui et al., 2021, Ochege et al., 2022), que inclui a evaporação do solo e das superfícies e a transpiração das plantas, que, geralmente, representa o principal componente da ETc, variando entre aproximadamente 61% e 100% (Xiao et al., 2018). Além de ser considerada o consumo efetivo de água, pois está diretamente relacionada à produtividade da planta, enquanto a evaporação é perda ineficaz de água (Kool et al., 2014).

Nas últimas décadas, diversos métodos instrumentais foram desenvolvidos para o particionamento da evapotranspiração (ET), incluindo o sistema de covariância de vórtice (Balocchi, 2014), microlisímetros (Lima et al., 2021), modelos de simulação como o modelo Penman-Monteith, o modelo Shuttleworth-Wallace, e o modelo FAO double kc (Kool et al., 2014; Ma e Song, 2019), que fornecem medidas de alta frequência de evapotranspiração em áreas fixas onde são usados. No entanto, em alguns desses métodos ainda é difícil desembaraçar os diferentes componentes dos fluxos evaporativos, exigindo dados adicionais (Liebhard et al., 2022; Petrik et al., 2022).

Por outro lado, os métodos de fluxo de seiva oferecem talvez a rota mais promissora para simplificar a implementação e reduzir os custos das medições de transpiração (Beslity et al., 2022). Isso se deve principalmente, ao seu menor custo em comparação com outras metodologias e pela possibilidade de medição constante do fluxo de água (Capurro et al., 2024). Além disso, esses métodos fornecem estimativas de ETc que apresentam alta concordância com aquelas obtidas por técnicas como o balanço hídrico (Gong et al., 2007; Sun et al., 2012) e o balanço de energia baseado na razão de Bowen (Zhang et al., 2011).

O fluxo de seiva é o movimento da água no tecido condutor do xilema das plantas (Sun et al., 2022) funcionando como um indicador essencial da transpiração das plantas (Miner et al., 2017), já que 99,9% desse fluxo é destinado a transpiração foliar (Granier et al., 1987), portanto, sua medição precisa é fundamental para compreender a dinâmica do uso da água pelas plantas. Medições precisas de fluxo de seiva podem ser obtidas por diversos métodos térmicos desenvolvidos e comercializados na

atualidade. Todos esses métodos dependem da medição das diferenças de temperatura no alburno após a aplicação de calor (VANDEGEHUCHTE et al., 2013) e são baseados em três princípios básicos: dissipação térmica, balanço de calor e velocidade do pulso de calor (Smith e Allen, 1996).

Dentre esses princípios, aqueles baseados no pulso de calor apresentam diversas vantagens em relação aos demais. Entre as principais vantagens, destacam-se: (i) maior precisão, (ii) capacidade de estimar variações circunferenciais no fluxo de seiva, (iii) dispensa de calibrações específicas e (iv) menor susceptibilidade a gradientes naturais de temperatura (Steppe et al., 2010; Vandegehuchte e Steppe, 2013).

Independentemente das vantagens que um método possa apresentar em relação a outro, dependendo das condições de aplicação, a realidade é que todos os métodos de fluxo de seiva disponíveis e comercializados atualmente são influenciados por diversos fatores. Entre os principais, destacam-se o custo e o elevado consumo de energia (Beslity et al., 2022), os ferimentos nos tecidos e a obstrução do fluxo causada pelas agulhas inseridas, frequentemente resultando na subestimação do fluxo real de seiva (Swanson e Whitfield, 1981; Vandegehuchte e Steppe, 2012). Além disso, o desalinhamento da sonda pode comprometer a precisão de métodos que exigem espaçamento exato para seus cálculos, como o método T-max e o método de velocidade de pulso de calor de compensação (CHP), ou instalação fixa das agulhas, como no método de razão de calor (HRM) (Burgess et al., 2001; Hatton et al., 1995; Ren et al., 2017).

Para enfrentar esses desafios, é proposto neste trabalho um novo design inovador de sensor de fluxo de seiva, para a cultura do café que é uma das culturas agrícolas mais produzidas e comercializadas do mundo (Vegro e Almeida, 2020). A partir do fruto do café é produzida uma bebida que é consumida por bilhões de pessoas (Kusumah et al., 2022). A produção da cultura do café é um além de meio de subsistência, que permite a muitos sairem da pobreza, tem papel importante no produto interno bruto do Brasil (PIB) e na geração de empregos (Maskell et al., 2021). Nos últimos anos, a área cultivada com café no mundo foi superior a 11 milhões de ha (loc, 2016), com uma produção de aproximadamente 164,839 milhões de sacas de 60 kg, das quais cerca de 56,300 milhões foram produzidas no Brasil (café arábica + café conilon) (Usda, 2021) o que faz desse país o maior produtor e exportador mundial da cultura (Cecafé, 2020).

Considerando apenas o café conilon (*Coffea canephora* Pierre ex A. Froehner), o Brasil se destaca como o segundo maior produtor e exportador mundial dessa espécie (USDA, 2021). Diante da expressiva relevância econômica e social da cultura, torna-se essencial aprofundar os estudos sobre seu status hídrico, especialmente em um cenário de mudanças climáticas e crescente escassez de recursos hídricos que pode comprometer não apenas a produtividade da cultura (O'Neill et al., 2017), mas também impactar diretamente a volatilidade dos preços (ICO, 2021) e a viabilidade das áreas atualmente cultivadas, tornando-as inadequadas para o plantio (Davis et al., 2012; Moat et al., 2017).

O sensor desenvolvido neste trabalho busca superar muitas das limitações enfrentadas por designs convencionais de múltiplas sondas. Nosso protótipo integra todos os componentes do sensor em um único cabeçote, permitindo sua instalação diretamente na superfície do caule da planta, sem a necessidade de perfuração. Essa abordagem não apenas garante um alinhamento preciso e consistente a cada instalação, eliminando erros causados por desalinhamento, mas também reduz significativamente o tempo e a complexidade do processo de instalação, tornando-o mais eficiente e prático. Diante disso, o objetivo desse trabalho foi desenvolver, calibrar, validar e aprimorar um sensor de fluxo de seiva xilemática para a cultura do café conilon.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Medição do fluxo de seiva xilemático

O fluxo de seiva corresponde ao movimento da água através do tecido condutor do xilema nas plantas (Sun et al., 2022). Esse fluxo é amplamente empregado para estimar a transpiração vegetal (Ren et al., 2022), uma vez que aproximadamente 99% da água transportada através da planta é perdida nesse processo (Raven et al., 1999). Como a transpiração está diretamente relacionada com produtividade das culturas agrícolas, é necessário entender a base da medição do fluxo de seiva e as prováveis armadilhas para investigar as relações planta-água, de modo que medições confiáveis possam ser feitas (Sun et al., 2022).

Os métodos de fluxo de seiva são usados para medir todo o fluxo de seiva ou a densidade do fluxo de seiva do xilema através de uma área condutora rastreando o transporte de calor convectivo promovido pelo fluxo de seiva (Poyatos et al., 2016). As primeiras tentativas de medição termométrica do fluxo de seiva em caules remontam à década de 1930, quando Huber (1932) utilizou o tempo de viagem de um pulso de calor induzido externamente até um ponto a jusante como medida da velocidade da seiva (Fuchs et al., 2017).

Atualmente, diversas técnicas, instrumentos e ferramentas são utilizadas para a medição do fluxo de seiva em plantas (Dix e Aubrey, 2021). Todas elas apresentam vantagens e desvantagens, utilizam o calor como traçador para o movimento da seiva no xilema e se baseiam em três princípios básicos: dissipação de calor, balanço de calor e pulso de calor (Mancha et al., 2021).

Dentre os princípios de funcionamento dos métodos de medição do fluxo de seiva xilemático, o da dissipação térmica é de longe o mais utilizado (Peters et al., 2018) devido ao seu baixo custo e simplicidade de configuração e gerenciamento (Rana et al., 2019). Nesse método, a diferença de temperatura entre duas agulhas, das quais a superior é aquecida com uma fonte de calor constante, é medida, e a densidade do fluxo de seiva é calculada a partir dessa diferença de temperatura (Tanaka, 2023).

Estudos teóricos e experimentais anteriores indicaram que o método de dissipação térmica fornece estimativas precisas de transpiração em espécies arbóreas, independentemente do tamanho do caule ou da anatomia do xilema,

quando a equação proposta por Granier é usada (Rana et al., 2019). Apesar disso, a compreensão teórica sobre a funcionalidade do método e as suposições subjacentes usadas no cálculo da densidade do fluxo de seiva permanecem um tanto obscuras. Além disso, diversos autores observaram uma discrepância entre os resultados obtidos por esse método em relação aqueles obtidos por outros métodos quando aplicados às mesmas árvores.

Por sua vez, os métodos baseados no balanço de calor destacam-se perante as outras técnicas por ser um método absoluto e não-invasivo que dispensa procedimentos de calibração e exige equipamentos relativamente simples, sendo a construção de sensores relativamente fácil e de baixo custo (Marin et al., 2008). Segundo Nakano e Iwasaki. (2019), esse método foi desenvolvido com base na aplicação da teoria de transferência de calor na engenharia térmica para plantas, sendo aplicável a caules e troncos com diâmetros entre 2 e 150 mm.

O princípio de funcionamento do método consiste na aplicação contínua de calor por meio da circulação de corrente elétrica através de resistências dispostas na superfície ou no interior do caule de uma planta (Marin et al., 2008). A diferença de temperatura acima e abaixo da fonte de aquecimento é usada para a medição do fluxo de seiva (Marin et al., 2008). Esse método tem sido utilizado em sensores para determinar a taxa de fluxo de seiva de maneira não destrutiva. No entanto, a taxa medida por esses dispositivos nem sempre é precisa, pois, os resultados refletem o fluxo combinado de seiva tanto no floema quanto no xilema (Nakano e Iwasaki., 2019).

Uma alternativa aos métodos anteriores, sobretudo quando se deseja medir o fluxo de seiva em nível de campo, são os sensores baseados no pulso de calor, que quando comparados aos métodos de dissipação térmica e deformação do campo de calor, oferecem inúmeras vantagens. Eles têm maior precisão, podem estimar variações circunferenciais no fluxo de seiva, não requerem calibrações específicas e não são severamente impactados por gradientes naturais de temperatura (Steppe et al., 2010; Vandegehuchte e Steppe, 2013).

Os métodos baseados em pulso de calor derivam da equação de convecção-dispersão térmica de Marshall para meios porosos (Marshall, 1958). Balaran e Snirivasan. (2024) relatam que essa equação descreve o movimento de um pulso de calor dentro do alburno do xilema, considerando que o calor é transportado principalmente por convecção na direção do fluxo de seiva (x) e disperso nas direções x , y e z . No modelo, o alburno do xilema é tratado como um meio homogêneo, com

dimensões infinitas nas direções x e y e espessura finita na direção z. No entanto, o arranjo dos vasos do xilema ao longo do fluxo de seiva (x) confere ao sistema um comportamento anisotrópico em relação à dispersão do calor. O pulso de calor é gerado por uma sonda aquecedora posicionada na origem, que atravessa toda a espessura do alburno na direção z. Ao considerar uma velocidade uniforme da seiva e aplicar condições de contorno sem fluxo nas superfícies interna e externa do alburno, eliminam-se gradientes de temperatura na direção z. Isso simplifica o problema, reduzindo a modelagem térmica de três dimensões (x, y, z) para duas (x, y), tornando a análise mais eficiente.

Independentemente do método utilizado, apesar de suas limitações, a realidade é que as medições de fluxo de seiva fornecem dados únicos e valiosos para estudar as relações hídricas entre plantas e o uso de água pelas culturas. E vale destacar que, embora originalmente desenvolvidos para medir o fluxo em caules, esses sensores também são aplicados em ramos, permitindo uma análise mais detalhada das variações no transporte de seiva em diferentes partes da planta. Essa abordagem é especialmente interessante para o estudo de espécies arbóreas como o café, onde o fluxo em ramos auxilia na compreensão da dinâmica hídrica em resposta a fatores ambientais e fisiológicos.

2.2 A cultura do café no Brasil

O café (*Coffea* sp.), é uma planta perene pertencente a família das rubiáceas (Yilmaz et al., 2017), subgênero *coffea*, com mais de 100 espécies conhecidas, das quais, apenas o *Coffea arabica* e *Coffea canephora* são cultivadas com interesse econômico em nível global (Pinto, 2017; Da Matta et al., 2018; De Abreu et al., 2022).

Essas plantas possuem um caule proeminente com sistema radicular raso (Murthy e Naidu, 2012), folhas persistentes, floração em posição axial e flores em forma de glomérulos (Oliveira et al., 2012). Para um bom desenvolvimento, exigem temperaturas nas faixas de 14 a 26 °C (embora tolerem temperaturas fora dessas faixas), solos com pH entre 5,3 e 6,0, precipitação bem distribuída em torno de 1500 mm anuais e altitude variando de 610 m a 1830 m, embora em alguns locais possam ser cultivadas em condições de altitudes mais baixas (Yilmaz et al., 2017), principalmente a espécie conilon que pode ser cultivada em regiões com altitudes inferiores a 500 m (Rodrigues et al., 2012).

Originário da África, acredita-se que o café chegou ao Brasil primeiramente em Belém do Pará por volta de 1727 a pedido do governador do Maranhão (Abic, 2009). A partir do Maranhão, a cultura do café foi difundida rapidamente para outras regiões, devido a sua rusticidade e capacidade de se adaptar ao clima e solo das diferentes regiões do país (Rodrigues, Dias e Teixeira, 2015). Inicialmente, o cultivo foi voltado para o mercado interno, porém, com a grande aceitação e demanda pelo público consumidor, rapidamente esse grão passou a ser o produto base da economia brasileira (Oliveira et al., 2012).

Entre 1850 e 1960, o café já representava cerca de 55% de todas as receitas de exportação do país (Kruger, 2007) e em 2016 as receitas geradas com as exportações de café já ultrapassavam 4,86 bilhões de dólares (Volsi et al., 2019). Atualmente, com uma área de aproximadamente 2.200.019,5 milhões de ha, produzindo cerca de 47.716 mil sacas beneficiadas, das quais 8.932,1 mil correspondem ao café conilon (Conab, 2022), o Brasil se tornou o maior produtor e exportador mundial de café (Volsi et al., 2019), gerando muitos empregos todos os anos (Abic, 2009).

A produção de café evoluiu ao longo do desenvolvimento e industrialização do Brasil (Martinez et al., 2021). Apesar dessa notável evolução, a produção no Brasil é concentrada apenas em 15 estados (Ibge, 2018), entre os quais, Minas Gerais com uma produção de 22.142,3 mil sacas e Espírito Santo com 14.166 mil sacas beneficiadas se destacam como os maiores produtores do país (c. arábica e c. robusta) (Conab, 2022). Além de Minas Gerais e Espírito Santo, se destacam também os estados de São Paulo, Bahia, Rondônia, Paraná e Goiás (Conab, 2022). Em alguns desses estados a economia local é altamente dependente da agricultura o que faz do café uma cultura com grande importância social e econômica, visto que essa cultura é responsável por até 50% do Produto Interno Bruto (PIB) em alguns desses estados (Kruger, 2007).

2.3 Requerimento hídrico da cultura do café

A água desempenha um papel fundamental no desenvolvimento das plantas, sendo um dos principais fatores que influenciam diretamente seu crescimento e produtividade (Humphries et al., 2024; Zhang et al., 2018). Conhecer sua disponibilidade e quantidade requerida pelas culturas ao longo das diferentes fases

do crescimento nos capacita a otimizar os rendimentos e mitigar possíveis problemas associados a práticas de irrigação excessivas ou inadequadas (Tran, 2024).

Especialmente para a cultura do café que é considerada uma cultura sensível a seca (Gabuya et al., 2024), conhecer o requerimento hídrico da cultura ao longo das diferentes fases do ciclo de desenvolvimento é fundamental, principalmente diante da crescente pressão das mudanças climáticas, que ameaçam alterar a aptidão de regiões atualmente favoráveis ao cultivo dessa cultura (RAZA et al., 2019). Esse fator se torna ainda mais crítico considerando a relevância socioeconômica do café, que sustenta aproximadamente 25 milhões de pequenos produtores ao redor do mundo e movimenta mais de US\$ 200 bilhões anualmente. Além disso, o mercado global da cultura apresenta uma tendência de crescimento de 2,2%, reforçando a necessidade do conhecimento das necessidades hídricas da cultura para garantir a sustentabilidade e a viabilidade econômica da produção (Koutouleas et al., 2022; HERNANDEZ-AGUILERA et al., 2019).

Nesse contexto, diversos estudos anteriores abordaram as exigências hídricas da cultura do café. Humphries et al. (2024), ao analisarem a evapotranspiração potencial e as necessidades hídricas do café nas regiões Norte e Nordeste da Tailândia, concluíram que a cultura requer um mínimo de 1.200 a 1.600 mm de água por ciclo. Além disso, identificaram que a demanda hídrica varia durante os estágios de floração, oscilando entre 16,7 e 33,7 mm, dependendo da região.

Em um estudo realizado na região leste de Cuba, Gonzalez et al. (2015) concluíram que áreas com precipitação anual entre 1.200 e 1.800 mm oferecem condições favoráveis para o desenvolvimento do café conilon, uma vez que esses volumes estão associados a maiores produtividades. De maneira semelhante, José et al. (2025), ao avaliarem o índice de satisfação das necessidades hídricas do café conilon na Amazônia Ocidental, identificaram um baixo risco climático para a cultura na região, onde os volumes de chuva variaram de 1.591,8 a 2.749,6 mm.

Além dessas pesquisas, estudos adicionais têm aprofundado o conhecimento sobre o consumo hídrico do café conilon, fornecendo estimativas mais precisas para diferentes regiões e condições climáticas. Venancio et al. (2020), por exemplo, ao analisarem o impacto da seca associada a altas temperaturas em plantios de *Coffea canephora* em nove localidades e seis períodos do ano no estado do Espírito Santo, concluíram que uma precipitação anual em torno de 1200 mm, distribuída entre os meses de setembro e março, é essencial para garantir um desenvolvimento adequado

da cultura. Em um estudo semelhante, de Souza et al. (2022) determinando o balanço hídrico para o cultivo do café (*Coffea canephora*) em três localidades no estado do Acre, observaram que o consumo de água pode variar de acordo com a região, época do ano e tipo de solo.

Com base nas informações supracitadas, torna-se evidente a necessidade de novos estudos para um melhor entendimento das exigências hídricas do café conilon em diferentes fases do seu ciclo de desenvolvimento e em escala local. Isso é particularmente interessante para minimizar os impactos das mudanças climáticas nas regiões produtoras, especialmente a escassez de água, que pode comprometer o crescimento e a produtividade da cultura. Afinal, a água é um dos principais fatores limitantes da produção agrícola.

2.4 Estresse hídrico na cultura do café

Definida como um excesso de demanda de água sobre a oferta disponível, a escassez de água é um dos estresses abióticos que mais impactam a agricultura. Estima-se em escala global que de 1983 a 2009, 454 milhões de hectares de terras agrícolas sofreram perda de rendimento induzida pela falta de água e suas perdas acumuladas de produção correspondem a 166 bilhões de dólares (Kim et al., 2019). Sem melhorias na gestão da água nas áreas irrigadas ou de esforços globais para minimizar os efeitos das mudanças climáticas, a previsão é que a queda de produção nas áreas produtoras continue a aumentar, uma vez que, até 2050 o mundo deverá experimentar escassez de água agrícola em mais de 80% de suas terras cultiváveis (Liu et al., 2022).

Especialmente para a cultura do café conilon, a escassez de água resultante dos avanços das mudanças climáticas pode levar a perda de 55% das áreas hoje consideradas aptas para seu cultivo (Magrach e Ghazoul, 2015). Além de ser o principal fator ambiental que limita o crescimento e a produtividade dessa cultura, principalmente em cultivos sem irrigação (Moat et al., 2017; Ovalle-Rivera et al., 2015; Silva et al., 2022).

Os efeitos do déficit hídrico na cultura do café de forma geral, vão muito além de apenas reduzir a produtividade, pois ao afetar processos fisiológicos como a fotossíntese e a translocação de nutrientes pode reduzir a qualidade do grão (Venancio et al., 2022). Estudos como o de Silva et al. (2022) relatam que o déficit

hídrico reduz diretamente o crescimento dos órgãos à medida que o potencial hídrico foliar e o teor relativo de água diminuem. Bhusal et al. (2019) destacam que como mecanismo de resposta ao déficit hídrico as plantas fecham seus estômatos e isso leva a uma redução da entrada de CO₂ e como consequência uma queda na fotossíntese.

Outros estudos como o de DaMatta et al. (2018) relatam que o estresse hídrico estimula a senescênci precoce das folhas, especialmente nas fisiologicamente mais velhas, o que pode ser uma consequência direta da falha hidráulica. Além disso, esses mesmos autores relatam que a falta de água afeta as plantas de café em todas as fases do seu ciclo de vida.

Marraccini et al. (2012) destacam que, mesmo sob estresse hídrico moderado, a floração, o enchimento e o desenvolvimento dos grãos são reduzidos, comprometendo diretamente a produtividade e que em condições de estresse hídrico severo, os danos podem ser ainda mais graves, podendo levar à morte da planta. Diante desse cenário, o desenvolvimento de estratégias para monitoramento do status hídrico das plantas é fundamental. Dentre as estratégias que podem ser adotadas, o uso de sensores para medição do fluxo de seiva xilemática se destacam como uma ferramenta eficaz para auxiliar no manejo da irrigação e minimizar os impactos do déficit hídrico nas plantas.

2.5 Medição do fluxo de seiva em plantas de café

A cafeicultura, uma das atividades agrícolas mais relevantes do mundo, é influenciada por uma complexa interação de fatores ambientais, como temperatura, precipitação e radiação solar, além de práticas de manejo, incluindo irrigação, poda, densidade de plantio, fertilização e controle de pragas e doenças (Camargo, 2010; da Mota et al., 2023; DaMatta & Ramalho, 2006; Souza et al., 2023; Verdin Filho et al., 2016). Esses fatores impactam diretamente todos os estádios fenológicos do cafeeiro, desde o crescimento vegetativo até a fase reprodutiva (Bongase, 2017; Camargo, 2010; Haggar & Schepp, 2012; Nunes et al., 2010; Soares et al., 2021).

Nesse contexto, a compreensão da variabilidade climática e seus impactos sobre o cultivo do café de uma maneira geral, torna-se cada vez mais relevante, especialmente diante das projeções de mudanças climáticas para as próximas décadas. O aquecimento global pode comprometer significativamente a qualidade e a

produtividade dessa cultura, tornando não aptas regiões hoje consideradas adequadas para o seu desenvolvimento (Bracken et al., 2023; Bunn et al., 2015; Dias et al., 2024; Pham et al., 2019; Ramalho et al., 2014; Verhage et al., 2017).

Essa alteração poderá levar a uma necessidade de redistribuição geográfica das áreas adequadas para o cultivo de café exigindo que os produtores adotem novas estratégias de manejo ou até mesmo se realoquem para regiões mais favoráveis, o que pode elevar os custos de produção e aumentar a necessidade de uma gestão eficiente dos recursos hídricos (Ayalew et al., 2022; DaMatta et al., 2019; DaMatta et al., 2018; Fontes et al., 2022; Kath et al., 2023; Ovalle-Rivera et al., 2015; Tavares et al., 2018). Pensando em uma gestão mais eficiente dos recursos hídricos, medições do fluxo de seiva nessa cultura surgem como ferramentas fundamentais.

Ao longo dos últimos anos, numerosos trabalhos foram desenvolvidos com a cultura do café nos quais se empregou sensores de fluxo de seiva para medição da transpiração das plantas em diferentes idades e condições ambientais. Estudos como o de Almeida et al. (2018) avaliaram a transpiração em *Coffea canephora* utilizando métodos como lisimetria e sensores de fluxo de seiva pelo método do balanço de calor no caule, fornecendo estimativas precisas da dinâmica hídrica da cultura.

Galote (2022) desenvolveu um sistema de aquisição de dados para medição do fluxo de seiva pelo método do pulso de calor em cafeeiros, visando melhorar a estimativa da transpiração e auxiliar no manejo da irrigação. Delgado-Rojas (2003) analisou a densidade do fluxo de seiva em plantas de *Coffea arabica* durante períodos de déficit hídrico e após irrigação, demonstrando a eficiência do uso desses sensores para monitoramento da resposta fisiológica das plantas. Venturim et al. (2020) utilizaram sensores de fluxo de seiva para desenvolver um índice de estresse hídrico visando a determinação de melhor momento para proceder a irrigação em plantas de café conilon.

3 TRABALHOS

3.1 DESENVOLVIMENTO, CALIBRAÇÃO E VALIDAÇÃO DE UM SENSOR DE FLUXO DE SEIVA XILEMÁTICA

RESUMO

O objetivo desse trabalho foi desenvolver, calibrar e validar um sensor baseado na série de Fourier para medidas do fluxo de seiva xilemática (FSX). O experimento foi dividido em duas partes: na primeira parte, foi realizado a construção e calibração do sensor no laboratório de Engenharia Agrícola (LEAG) do Centro de Ciências e Tecnologias Agropecuárias (CCTA) da Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro (UENF); na segunda foi realizada a validação do sensor em plantas de café cultivadas em vasos em casa de vegetação, do Setor de Fisiologia Vegetal, da UENF. O sensor desenvolvido usa um modelo matemático baseado na série de Fourier, e que possui potencial para ser aplicável a espécies lenhosas. No laboratório, o fluxo de seiva xilemática estimado por meio do sensor proposto foi comparado com o fluxo de água (avaliado gravimetricamente) através dos materiais utilizados. Esse fluxo avaliado pelo método gravimétrico foi calculado como a variação na massa de água que passava através de segmentos de caules de *Vitis vinifera* L, *Coffea canephora*, *Mangifera indica* L, ou de um tubo de papel preenchido com algodão. Após a finalização das medições de FSX, 0,05% de fucsina ácida foi puxado sobre um segmento de caule de cada uma das espécies por 15 a 20 minutos e a área condutora foi determinada visualmente pela mudança de cor entre a área ativa e inativa. Para avaliação da calibração, ajustou-se um modelo de regressão linear simples entre os valores observados gravimetricamente e os valores fornecidos pelo sensor. Após o processo de calibração, o sensor desenvolvido foi instalado em um ramo plagiotrópico no lado norte do terço inferior de plantas de café cultivadas em vasos de 80 litros em uma casa de vegetação. Nas mesmas plantas em que o sensor foi instalado, foram feitas avaliações da trocas gasosas em todo o dossel por intermédio de um sistema aberto de múltiplas câmaras. O FSX estimado por intermédio do sensor foi convertido em transpiração do ramo e foi comparado a transpiração medida pelo sistema aberto de múltiplas câmaras por meio de regressão linear e pela comparação da resposta diária da transpiração da planta inteira. Os resultados obtidos mostraram que uma única calibração em determinada espécie de planta dicotiledônea não é o suficiente para que o sensor possa ser usado em qualquer outra espécie de dicotiledônea, o que foi confirmado pelas medições de casa de vegetação relatadas nesse estudo. Tais estudos mostraram que o sensor desenvolvido pode ser usado com confiabilidade para monitoramento da transpiração de plantas de café.

Palavras-chave: Transpiração, fluxo de seiva, séries de Fourier.

ABSTRACT

The objective of this work was to develop, calibrate and validate a sensor based on the Fourier series for measuring sap flow in agricultural crops. The experiment was divided into two parts: in the first, the construction and calibration of the sensor was carried out in the Agricultural Engineering laboratory (LEAG) of the Center for Agricultural Sciences and Technologies (CCTA) of the Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro (UENF); in the second, the sensor was validated on coffee plants grown in pots in a greenhouse, also located at UENF. The developed sensor uses a mathematical model based on the Fourier series, which is believed to be applicable to all plant species regardless of the structure and distribution of the sap-conducting vessels. In the laboratory, the sap flow estimated through the sensor was compared with that measured gravimetrically, which was calculated as the variation in the mass of water that passed through segments of vine stems, coffee, mango or a paper tube filled with cotton, divided by the section area of these materials. After completion of flow measurements, 0.05% acid fuchsin was pulled over a stem segment of each species for 15 to 20 minutes and the conductive area was determined visually by the color change between the active and inactive area. To evaluate the calibration, a simple linear regression model was adjusted between the values observed gravimetrically and those provided by the sensor. After the calibration process, the developed sensor was installed on a plagiotropic branch on the north side of the lower third of coffee plants grown in 80-liter pots in a greenhouse. In the same plants where the sensor was installed, gas exchange measurements were made throughout the canopy using an open multiple-chamber system. The sap flow measured through the sensor was converted into transpiration and was compared to the transpiration measured by the open multiple chamber system through linear regression and by comparing the daily transpiration behavior. The results obtained showed that a single calibration on a given species of dicotyledonous plant is enough for the sensor to be used on any other species of dicotyledonous plant, which was confirmed by the field measurements reported in this study, which showed that the developed sensor can be used reliably for monitoring the transpiration of coffee plants.

Keywords: Transpiration, sap flow, Fourier series.

1 INTRODUÇÃO

Globalmente, estima-se que cerca de 70% da retirada de água de rios, lagos e águas subterrâneas é usada pela agricultura, e em algumas regiões esse valor pode ser superior a 90% (FAO, 2017, FAO, 2020). Devido aos eventos associados às mudanças climáticas, e para atender a demanda de alimentos de uma população crescente, a retirada contínua de água desses reservatórios pela agricultura irrigada, tem elevado a escassez deste recurso no planeta (Qin et al., 2019, Richter et al., 2020, Rashed et al., 2023).

Nas áreas irrigadas, e sem melhorias na gestão da água, a escassez deste recurso continuará aumentando. Como consequência, a produção de alimentos e, portanto, a segurança alimentar da população futura estará ameaçada (Meixner et al., 2016, He et al., 2018, Yawson, 2022, Zhang et al., 2023). Devido a esse cenário, é necessário o desenvolvimento de estratégias de manejo hídrico capazes de promover um uso mais sustentável e eficiente da água na agricultura (Sunyer-Caldú et al., 2022).

Um melhor uso da água na agricultura irrigada implica em melhorar as estimativas das necessidades hídricas das culturas (Yi e Xu, 2023). Nesse contexto, e ao longo das últimas décadas, numerosas metodologias e tecnologias (Pereira et al., 2021) foram desenvolvidas com o objetivo de estimar com maior precisão o consumo de água das plantas (Allen et al., 2011, Kool et al., 2014). No entanto, a maioria desses métodos requer a utilização de equipamentos de elevado custo e de mão de obra qualificada para a operação destes equipamentos, além de exigir a coleta dos dados obtidos no local ou a disponibilidade de grandes áreas com vegetação uniforme (Paço et al., 2019). Em nível mundial, devido a estas exigências, a metodologia que relaciona a evapotranspiração de referência (ET₀), baseada método de Penman-Monteith, a um coeficiente de cultura (kc), ainda é a mais utilizada (Pereira et al., 2021).

Embora a associação da ET₀ ao kc seja a forma mais usual para estimativa do consumo de água das plantas, ela ignora a relação entre alguns fatores ambientais e o abastecimento e demanda de água pela vegetação. Além disso, esta associação da ET₀ ao kc assume que as culturas sempre crescem em condições ideais, o que em condição de campo, nem sempre é verdade. Logo, os resultados obtidos por essa metodologia podem não refletir o consumo real de água das culturas (González-Altozano et al., 2008, Ohana-Levi et al., 2020, Jiang et al., 2022, Friedman, 2023). O ideal seria a utilização de métodos que possam medir o consumo de água diretamente

na planta. Nesta direção, os métodos que utilizam o calor como traçador do movimento de água na planta para a medição do fluxo de seiva xilemática (FSX) têm apresentado resultados confiáveis de medidas da transpiração (Esteves et al., 2015, Poyatos et al., 2021).

Como a transpiração representa cerca de 80 - 90% da evapotranspiração terrestre (JASECHKO et al., 2013, Fu et al., 2022), a quantificação deste processo permite analisar consumo de água pelas plantas (Steppe et al., 2015, Mancha et al., 2021, Zhao et al., 2022). Os métodos termométricos são amplamente utilizados para medir a transpiração bem como avaliar o status hídrico das plantas (Steppe et al., 2015, Poyatos et al., 2016, Hoelscher et al., 2018,; Hassler et al., 2018).

A literatura atual apresenta uma série desses métodos termométricos para a medição de transpiração nas plantas (Ren et al., 2017, Fernandez et al., 2017). Todos estes métodos requerem medições da variação de temperatura da seiva no xilema após a aplicação do calor numa parte do tronco ou ramo da planta. São classificados em função da forma de aplicação de calor, sendo associados quanto à dissipação térmica, ao balanço de calor, e o pulso de calor-(Smith e Allen, 1986; Vandegehuchte e Steppe, 2013). Dentre os métodos associados ao pulso de calor, em especial, se destaca o método que utiliza o pulso descontinuo (PD). Em escala de campo, esse método PD tem se mostrado adequado para a medição da transpiração, uma vez que, este método PD pode resultar em reduzidos consumo de energia, e consequentemente, menor custo para o usuário (POBLETE-ECHEVERRÍA e ORTEGA-FARIAS, 2012; LÓPEZ-BERNAL, 2015).

De uma maneira geral, em relação a outros métodos, a avaliação da transpiração das plantas por meio de métodos de medidas do FSX apresenta uma série de vantagens (Smith e Allen, 1996; Mancha et al., 2021). Contudo, alguns pesquisadores ainda criticam o emprego dessas metodologias em que se usa o FSX para estimar a transpiração da planta (Flo et al., 2019), sobretudo, pelo fato de que estas metodologias consideram que o FSX tem uma relação direta e continua com os fatores ambientais que atuam sobre as plantas (Li et al., 2022), o que em algumas situações, o FSX não responde diretamente aos fatores ambientais (Zhang et al., 2019). Desta maneira, na tentativa de aumentar a precisão desses métodos em que se usa O FSX, muitos trabalhos propuseram modelos que relacionam o FSX com os diferentes fatores ambientais (Javis, 1976; Salazar et al., 2021).

A análise harmônica de Fourier têm sido usada em diversas aplicações para

estimar sinais periódicos em modelos dinâmicos de ocupação (Fidino e Magle, 2017), para aproximar os dados compostos de evapotranspiração e precipitação multiperíodos (Wang et al., 2023) e até mesmo para substituir dados ausentes (KOVÁŘ e BAČINOVÁ, 2015). No entanto, aplicações da série de Fourier para análise da onda de calor utilizada para a estimativa do FSX em plantas ainda são escassas. Diante disso, o objetivo desse trabalho foi desenvolver, calibrar e validar um sensor em que se utilizou a série de Fourier para a estimativa do FSX em plantas de *Coffea canephora*.

2 MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi realizado no período de março a junho de 2023 na Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro (UENF), localizada em Campos dos Goytacazes, RJ, Brasil. O experimento foi dividido em duas partes, sendo que na primeira parte (P1), foi realizado a construção e calibração do sensor no laboratório de Engenharia Agrícola (LEAG) do Centro de Ciências e Tecnologias Agropecuárias (CCTA) da UENF. Na segunda parte (P2), foi realizada a validação da resposta do sensor em plantas de café (*Coffea canephora*) de 6 meses de idade cultivadas em vasos de 100L, em casa de vegetação, também localizada na UENF. Os detalhes do cultivo do cafeeiro serão relatados no item 2.3.

2.1 Teoria

Qualquer função y periódica com período T pode ser representada como uma Série de Fourier.

$$y_i = C_0 + \sum_{n=1}^{\infty} C_n \cdot \cos\left(\frac{2\pi ni}{N} + \theta_n\right) \quad (1)$$

em que,

y_i – valor da função y na amostragem i ;

C_0 – amplitude de ordem zero;

C_n – amplitude de ordem n ;

θ_n - defasagem de fase de ordem n, radianos;

N - número de amostragens da função y dentro do período T.

Os coeficientes C_n e θ_n são obtidos utilizando-se de N amostragens da onda de calor no período T, em intervalos de tempo uniforme, e aplicando-a Transformada Discreta de Fourier.

No caso do sensor proposto neste presente trabalho, somente é necessária a ordem 1. Logo, a equação pode ser reescrita como

$$y_i = C_1 \cdot \cos\left(\frac{2\pi}{N} \cdot i + \theta_i\right) \quad (2)$$

2.1.1 Análise da variação da amplitude térmica da onda de calor em um meio uniforme

É possível demonstrar que a amplitude e fase de primeira ordem de uma onda de calor em um meio uniforme, após a geração de pulso térmico, varia em função da distância em relação à fonte e, em caso de um meio em movimento, varia em função da velocidade do meio. Assim, a amplitude da onda de calor a uma distância x em relação à fonte, pode ser expressa pela seguinte equação:

$$A_x = A_0 \cdot e^{\left(\frac{U}{2k} - p + c\right)x} \quad (3)$$

em que,

A_x - amplitude de primeira ordem na posição x, °C;

p – coeficiente relacionado a propriedade térmica do material;

U - velocidade do meio em movimento;

C - variável inserida para absorver qualquer erro que pressupõe que será constante;

k - difusividade térmica do meio.

De forma análoga, a amplitude da onda de calor a uma distância y da fonte de calor (A_y) será:

$$A_y = A_0 \cdot e^{\left(\frac{U}{2k} - p + c\right)y} \quad (4)$$

Se aplicar o logaritmo neperiano ao produto dessas amplitudes, terá:

$$a = \ln(A_x \cdot A_y) = \ln(A_x) + \ln(A_y) = \ln A_0 + \left(\frac{U}{2k} - p + C\right) \cdot x + \ln A_0 \cdot \left(\frac{U}{2k} - p + C\right) \cdot y \quad (5)$$

Resolvendo esses logaritmos e fazendo os ajustes necessários na equação, teremos:

$$\frac{\alpha}{M} = \frac{U}{2k} - p + C' \quad (6)$$

Em que,

α - valor obtido a partir dos dados observados;

M - soma das distâncias em relação a fonte, $x + y$;

C' – variável que integra todos os valores constantes da equação 5.

A equação 6 expressa a relação do valor medido com o fluxo, mas depende da condutividade térmica e dos valores de C' e p .

Fazendo $U = 0$ e denominando $\alpha = \alpha_0$ e $p = p_0$, para situação de fluxo zero, a equação 6 fica:

$$\frac{\alpha_0}{M} = -p_0 + C' \quad (7)$$

Assim, quando o fluxo for zero, C' pode ser determinado por:

$$C' = p_0 + \frac{\alpha_0}{M} \quad (8)$$

Substituindo a equação 8 em 6 e fazendo-se os ajustes necessários, tem-se:

$$p = \frac{U}{2k} + \frac{(\alpha_0 - \alpha)}{M} + p_0 \quad (9)$$

2.1.2 Análise da variação da fase da onda de calor em um meio uniforme

A fase amplia a sua defasagem com a distância em ponto x qualquer a partir da fonte de calor, sendo:

$$F_x = -q \cdot x + \varepsilon \quad (10)$$

em que:

F_x – defasagem de fase da onda de calor à distância x;

q - coeficiente que depende do fluxo, rad m⁻¹;

ε - fase na origem do pulso (para x = 0).

De forma análoga em um ponto y, a fase será:

$$F_y = -q \cdot y + \varepsilon \quad (11)$$

Somando-se $F_x + F_y$ tem-se:

$$F_x + F_y = -q \cdot (x + y) + 2\varepsilon \quad (12)$$

Denominando a soma das fases ψ , tem-se:

$$\psi = F_x + F_y - 2\varepsilon = -qM \quad (13)$$

Desta forma, valor de q pode ser obtido:

$$q = \frac{-\psi}{M} \quad (14)$$

Admitindo q uma função do fluxo, impondo-se fluxo igual a zero, e denominando q = q₀ e $\psi = \psi_0$, tem-se:

$$q_0 = \frac{-\psi_0}{M} \quad (15)$$

2.1.3 Densidade de fluxo (U)

A densidade de fluxo (U), ou velocidade do meio em movimento, pode ser obtida a partir das definições de p e q nas equações 9 e 14, respectivamente, e de tal maneira que possa satisfazer as propriedades 1 e 2, sendo:

Propriedade 1:

$$p \cdot q = \frac{\pi}{Tk} \quad (16)$$

em que:

T – período do ciclo entre dois pulso de calor consecutivos, s;
k - difusividade térmica, $\text{m}^2 \text{s}^{-1}$.

Isso significa que esse produto é constante para qualquer que seja o fluxo.

Propriedade 2

$$p^2 - q^2 = \left(\frac{U}{2k}\right)^2 \quad (17)$$

Assim, admite-se que os valores de p e q estão relacionados com o fluxo.

Aplicando a definições de p e q, equações 9 e 14 respectivamente, nas propriedades 1 e 2, equações 16 e 17, tem-se:

$$U = \frac{2\pi}{T} \cdot \frac{M}{\psi} \cdot \left\{ \frac{(\alpha - \alpha_0 \mp \psi_0)^2 - \psi^2}{(\alpha - \alpha_0 \mp \psi_0)^2 + \psi^2} \right\} \quad (18)$$

2.2 Construção e Calibração do sensor em laboratório

2.2.1 O Sensor proposto

O sensor proposto neste trabalho é constituído de dois termistores NTC 10 KΩ

a 25 °C, dispostos entre dois resistores de 47 Ω acoplados em um cabeçote (Figura 1). Cada componente é espaçado entre si em 3 mm. O princípio de funcionamento do sensor se baseia na produção de um pulso de calor, cíclico e alternado, utilizando-se dos resistores, e no monitoramento da variação da temperatura utilizando-se dos termistores. O pulso de calor produzido promove o aquecimento da seiva xilemática em determinado ponto de uma parte da planta. Relacionando-se o momento que em que a seiva está estacionada com os momentos que a seiva se movimenta na planta, é possível estimar o fluxo utilizando-se a equação 18.

Os pulsos de calor são cílicos, ou seja, repetem-se em períodos de tempo uniforme, e são alternados, pois a cada ciclo alternam-se os resistores para produção do pulso de calor.

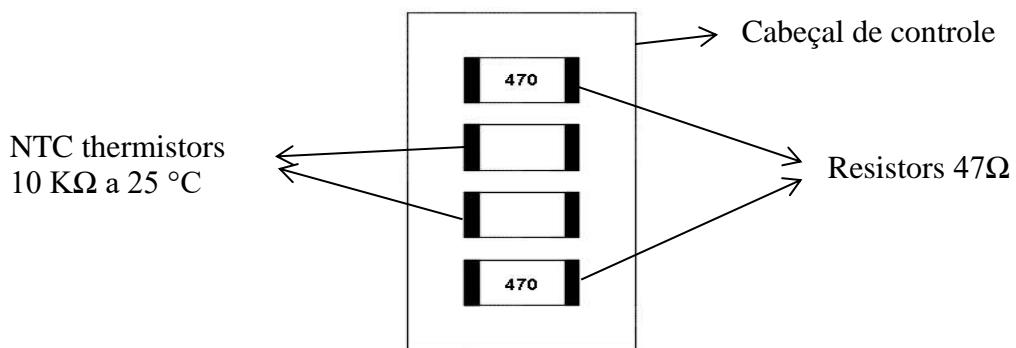


Figura 1. Ilustração do sensor de fluxo de seiva xilemática desenvolvido e as partes constituintes.

2.2.2 Calibração do sensor no laboratório

A fim de testar a sensibilidade do sensor ao fluxo da seiva, foi realizado um experimento de calibração em laboratório. O fluxo de água medido pelo sensor em tubos de papel e segmentos de ramos recém-cortados de plantas de manga (*Mangifera indica L.*), videira (*Vitis vinifera L.*) e café (*Coffea canephora*) foi comparado àquele medido gravimetricamente em balança de precisão.

O tubo de papel utilizado nos testes tinha 200 mm de comprimento e 5 mm de diâmetro. Foi preenchido com algodão e em seguida, um sensor foi instalado em sua superfície, na parte média do seu comprimento. De forma similar, com exceção do preenchimento com algodão, foi realizado o mesmo procedimento em ramos recém cortados de plantas de manga (*Mangifera indica L.*), videira (*Vitis vinifera L.*) e café

(*Coffea canephora*) com comprimento e diâmetro variando de 7 – 120 mm e 6 – 7 mm, respectivamente.

Para o estudo de calibração, o design experimental foi semelhante ao de Fernández et al. (2001), no qual utilizou uma estrutura capaz de promover o fluxo de água na sessão de um ramo vegetal ou de um tubo de papel, para simular o fluxo de seiva (Figura 2). Essa estrutura era constituída de um reservatório de água equipado com duas mangueiras, sendo que uma mangueira funcionava como sifão, enquanto a outra mangueira, foi conectada a uma câmara de pressão, e permitia a entrada de ar. À medida que era adicionado pressão na câmara, a água do reservatório se movimentava pela mangueira que funcionava como sifão em cuja extremidade foi colocado individualmente os materiais usados na calibração. Assim, era possível forçar a passagem de água pelo interior desses materiais, e os sinais do sensor eram registrados. A água que passava pelo interior dos materiais era coletada em um recipiente colocado sobre uma balança. A partir desta estrutura, foi possível obter um fluxo real de água, e este fluxo foi associado aos valores registrados pelo sensor.

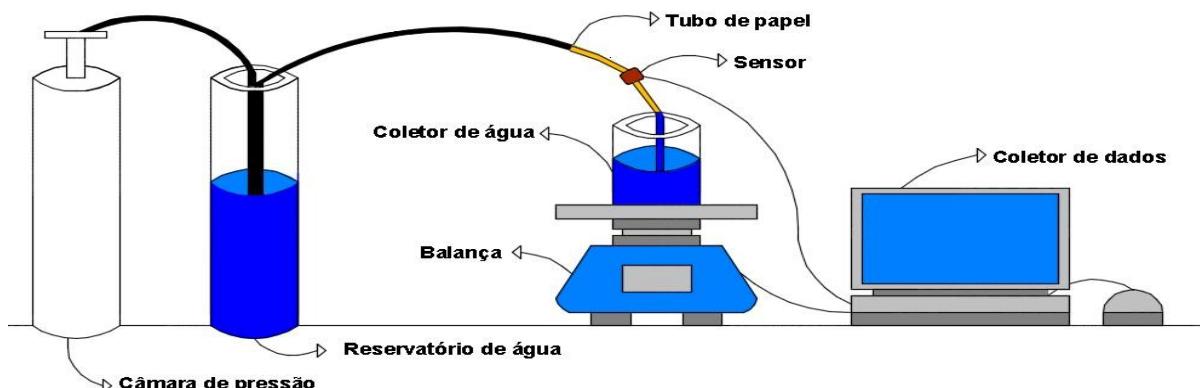


Figura 2. Esquema do aparelho desenvolvido para induzir e monitorar o fluxo de água na seção dos materiais usados na calibração.

A balança e o sensor eram conectados a um aparelho coletor de dados, que armazenava e transmitia os dados obtidos, simultaneamente, para a internet permitindo assim o monitoramento em tempo real dos dados. O coletor de dados realizava leituras a cada seis segundos e armazenava médias de 4 minutos (2 minutos do pulso a montante e dois minutos do pulso a jusante). A massa de água (g) coletada no recipiente colocado sobre a balança foi dividida pela diferença de tempo (s) entre duas leituras sucessivas e pela área da seção dos materiais testados. Assim, foi obtido

o fluxo de água ($\text{g m}^{-2} \text{s}^{-1}$). Quando o fluxo de água que passava pelo interior dos materiais utilizados na calibração atingia o valor zero, um novo material era conectado a mangueira e iniciava-se o processo novamente. Esse procedimento foi realizado quatro vezes para cada material testado, obtendo-se então quatro repetições por material.

Após a finalização das medições de fluxo, 0,05% de fucsina ácida foi forçado a passar sobre um segmento de caule de cada uma das espécies por 15 a 20 minutos, e a área do xilema ativo foi determinada visualmente pela mudança de cor entre a área ativa e inativa. Para avaliação da calibração, ajustou-se um modelo de regressão linear simples entre os valores observados gravimetricamente e os valores calculados pelo sensor.

2.3 Validação em campo

Após a calibração, foram utilizados dois sensores para o teste e validação em casa de vegetação. Esta validação foi feita comparando com a transpiração das plantas inteiras cultivadas nesta casa de vegetação. No experimento de casa de vegetação, os sensores foram testados ao longo de 15 dias. Dois sensores foram instalados em duas plantas do clone A1 de café conilon (*Coffea canephora*). Em cada planta, cada sensor foi instalado em um ramo plagiotrópico em plantas diferentes e o ramo estava localizado no terço inferior do lado norte, e cada sensor foi protegido da exposição direta do sol por meio de um papel alumínio. Os sensores foram conectados ao coletor automático de dados, o qual realizava leituras a cada 6 segundos e armazenava médias de 4 minutos. A instalação ocorreu em primeiro de junho de 2023, e os dados foram coletados até 15 de junho de 2023.

As plantas foram cultivadas em casa de vegetação em vasos de 100 L, preenchidos com latossolo vermelho-amarelo, irrigadas e fertilizadas de acordo com as necessidades das plantas e a análise de solo. A aplicação controlada de água foi feita por meio de um sistema de irrigação por gotejamento que irrigava as plantas sempre que necessário para manter a umidade do solo próximo a capacidade de vaso. No fim do período avaliado, o comprimento da nervura central de cada folha do ramo das plantas que os sensores estavam instalados foi avaliado e a área foliar foi determinada por meio da equação proposta por Partelli et al. (2006). Assim foi possível expressar os valores do fluxo de seiva xilemática em $\text{g H}_2\text{O m}^{-2} \text{ h}^{-1}$.

As avaliações das trocas gasosas do dossel foram realizadas nas mesmas plantas que o sensor foi instalado, com um sistema aberto de múltiplas câmaras (Figura 3), semelhante ao descrito por Rodrigues et al. (2016) com algumas adaptações. As câmaras com volume de 1 m³ foram construídas de plástico do tipo Mylar®, com um sistema de ventiladores e válvulas solenóides para controle da entrada e saída de ar da câmara, e assim efetuar a amostragem do ar que entrava e saía das câmaras. O ar de entrada e ao de saída amostrados passavam por um analisador de gases a infravermelho (CIRAS DC, PPSystems, USA) que avaliava o diferencial das concentrações de CO₂ e água que entrava e saia de cada câmara contendo uma planta de café. A partir destes diferenciais foi possível calcular a taxa de transpiração das plantas.

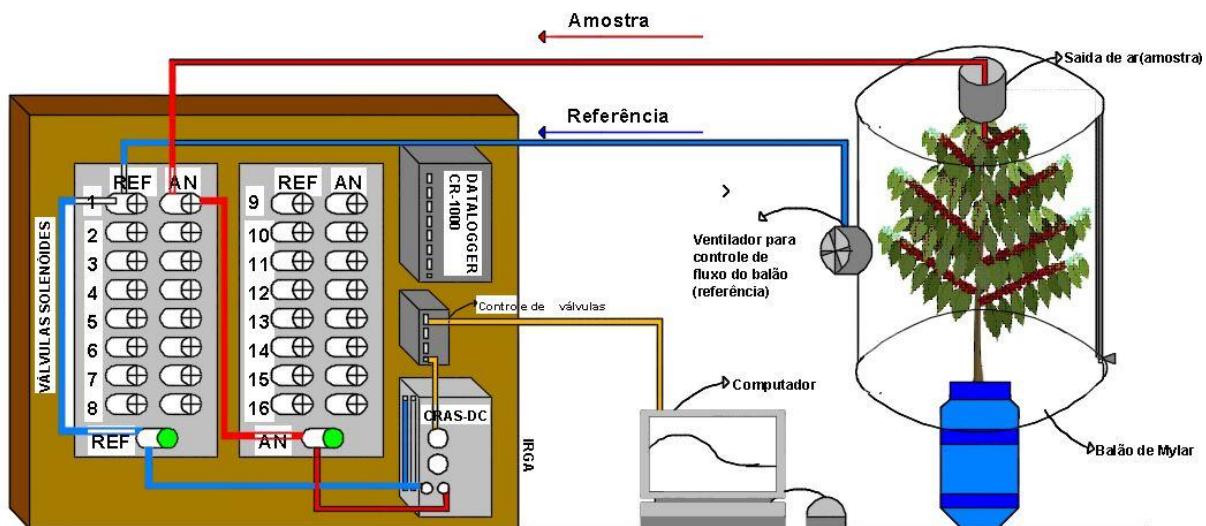


Figura 3. Esquema do sistema de troca gasosa do dossel usado durante o experimento.

Por meio de análise de regressão e da resposta diária da transpiração da planta inteira e da transpiração do ramo, os valores de transpiração do ramo obtidos por meio do sensor foram comparados aos valores da transpiração da planta inteira (dossel) obtidos pelo sistema aberto de múltiplas câmaras

3 RESULTADOS

3.1 Calibração de laboratório

Os valores de fluxo de água, tanto os calculados por meio das equações utilizando o sensor proposto, como os valores da quantidade de massa de água

obtidos por meio da balança de precisão, e avaliados nos diferentes materiais utilizados [ramo de *Mangifera indica* L., *Vitis vinífera* L. e tubo de papel com algodão (Figura 4a), e *Coffea canephora* (Figura 4b)], variaram entre 0 a 200 $\mu\text{m.s}^{-1}$. Em ambos os gráficos, os resultados mostraram uma forte tendência linear entre a taxa de fluxo calculada pelo sensor e a quantidade de água avaliada gravimetricamente. Os valores para o coeficiente de determinação (R^2) variaram de 0,94 a 0,98 indicando que houve um bom ajuste entre os valores de fluxo de água observados na balança e os valores calculados pelo sensor. Esses altos valores para o coeficiente de determinação implicam em dizer que cerca de 94 a 98% dos valores medidos pelo sensor podem ser de fato associados linearmente aos valores medidos gravimetricamente. Este resultado dá confiança de que sensor pode ser usado para o monitoramento do fluxo de água nas amostras utilizadas.

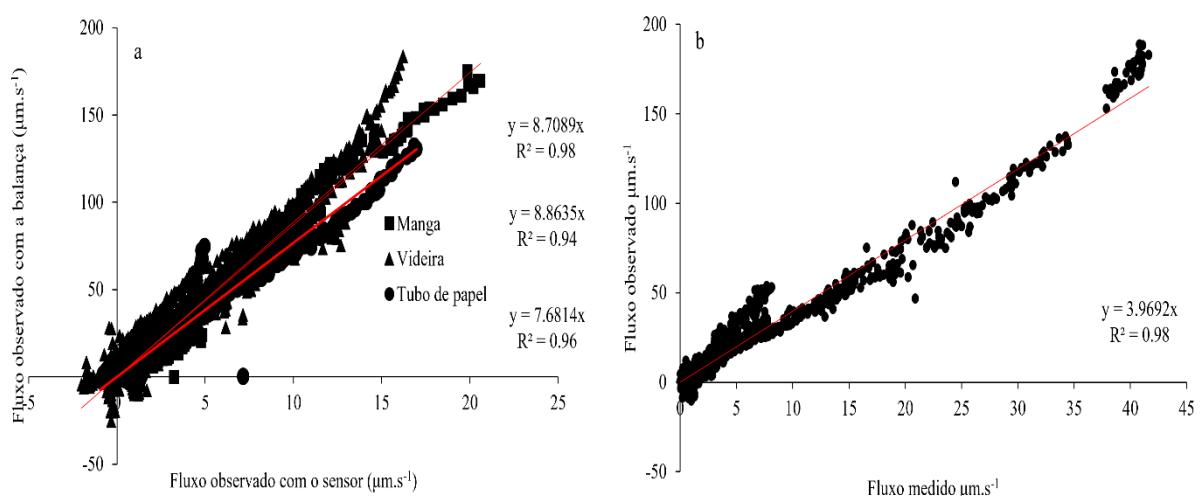


Figura 4. Relação entre o fluxo de água avaliado pelo método gravimétrico e calculado pelo sensor proposto em ramo de *Mangifera indica* L., *Vitis vinífera* L., e tubo de papel com algodão (a) e em ramo de *Coffea canephora* (b).

Apesar dos elevados valores de R^2 observados, os dados obtidos usando ramos de café (Figura 4b) apresentaram uma relação linear com inclinação diferente daquela obtida com os demais materiais testados, os quais apresentaram relação linear e inclinação próximos entre si (Figura 4a). Essa diferença observada pode ser explicada devido a anatomia diferencial do xilema (Figura 5a, 5b e 5c).

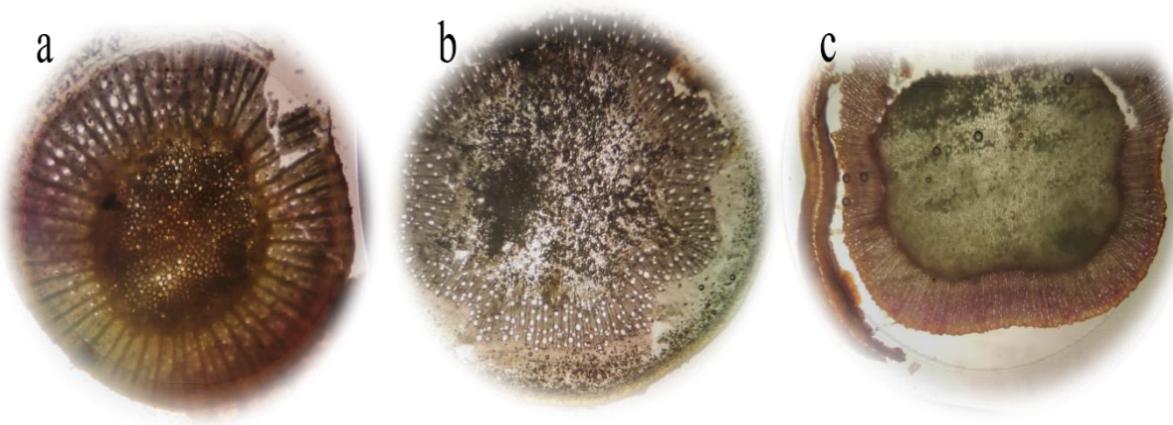


Figura 5. Seções transversais dos segmentos de ramos usados para a calibração do sensor. (a) videira, (b) manga e (c) café.

As seções transversais de videira e manga apresentam os tubos xilemáticos com distribuição difusa enquanto na amostra de café a distribuição dos tubos xilemáticos apresentou-se compartimentada nas bordas da seção do ramo. Por outro lado, o tubo de papel preenchido com algodão tende a ter uma distribuição aleatória dos espaços vazios, por onde a água se movimenta, assim tende a ter um padrão de distribuição que simula a distribuição difusa dos tubos xilemáticos. Assim, pode-se agrupar as amostras em tubos com distribuição difusa em detrimento do café que apresentou uma distribuição compartimentada dos tubos xilemáticos.

3.2 Validação em casa de vegetação

3.2.1 Variação da amplitude e da fase dos pulsos a montante e a jusante

A Figura 6 mostra a variação diurna do logarítmico do produto das amplitudes e a soma das defasagem de fase dos pulsos a montante e a jusante, requeridos pelo modelo para estimar o fluxo de seiva xilemática. Durante o período avaliado, as mudanças do logarítmico do produto das amplitudes do pulso a montante (Figura 6a) foram aproximadamente iguais aos da soma das fases, com valores próximos ou iguais a zero a partir de meia noite até as seis da manhã, e os valores maiores do que zero nos demais horários do dia. Por outro lado, observa-se que para o pulso a jusante (Figura 6b), apesar da variação semelhante aos do pulso a montante, os valores observados para o produto das amplitudes foram em alguns períodos bem diferentes

daqueles obtidos na soma das fases. Essa diferença de resposta entre o produto das amplitudes e soma de fases dos pulsos a montante e a jusante, provavelmente está relacionado ao contato do sensor com o material utilizado, pois é provável que o resistor a jusante do pulso tenha ficado em menor contato com o material utilizado, o que pode justificar essa diferença.

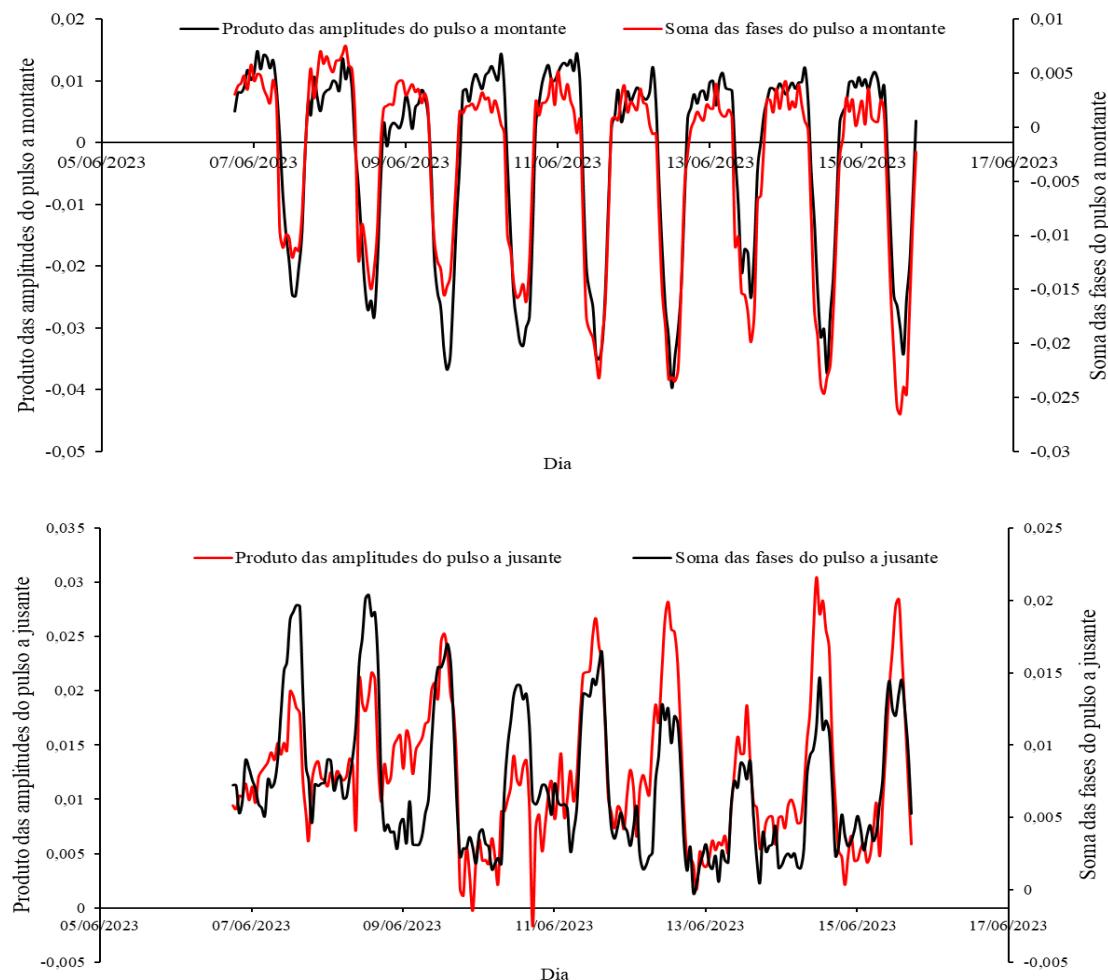


Figura 6. Variação do produto das amplitudes e soma das fases dos pulsos a jusante (a) e a montante (b) em ramo de *Mangifera indica* L., *Vitis vinifera* L., e tubo de papel com algodão e em ramo de *Coffea canephora*.

3.2.2 Experimento em casa de vegetação

A dinâmica da transpiração do ramo avaliada por intermédio do sensor proposto versus a transpiração do dossel avaliada por intermédio do sistema aberto de múltiplas câmaras para as plantas de café (Figura 3) é mostrada na Figura 7a e 7b,

e a correlação entre esses valores é mostrada na Figura 8a e 8b. Observa-se que, para ambos os sensores utilizados, os valores de transpiração do ramo estimados pelos sensores estão em escala diferentes àqueles valores estimados para transpiração de todo o dossel. Entretanto, isto não invalida a aplicação do sensor, uma vez que as diferenças na transpiração estão associadas à parte que cada medição representa, ou planta inteira ou a um ramo do cafeeiro. Observa-se também com base nos valores do fluxo obtido, bem como na relação entre a transpiração do ramo e do dossel (Figuras 7a e 7b) e na variação da transpiração em ambas as partes da planta de cafeeiro ao longo dos dias, que houve uma pequena diferença entre os valores da transpiração dos dois sensores. Tal resultado possa ser devido a diferença na altura e área foliar total das plantas.

A resposta da transpiração do ramo e do dossel apresentaram uma forma senoidal, com aumento no início da manhã e picos mais elevados no início da tarde em respostas as condições de luz e demanda atmosférica, seguidos de uma redução gradual que se estabilizou próximo de zero a partir da meia noite. Para a maioria dos dias os picos de transpiração positivos e negativos medidos pelo sensor acompanharam os picos medidos pelo balão. As taxas de transpiração negativas observadas pelo sensor correspondem ao fluxo reverso que o sensor mede e foram sempre menores que aquelas observadas pelo balão, além de terem sido verificadas em menor frequência.

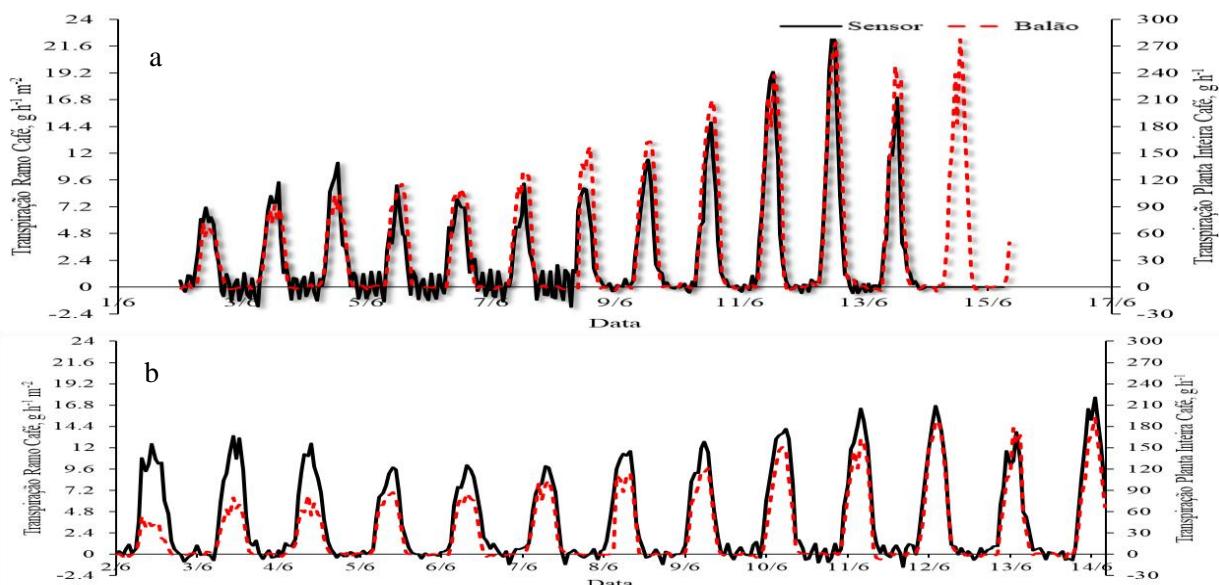


Figura 7. Variação diária da transpiração medida por meio do sensor 1 (a) e do sensor

2 (b) em duas plantas de café, sendo que cada sensor utilizado foi utilizado instalado em um ramo em cada planta, em comparação com a transpiração da planta inteira avaliada por meio das câmaras.

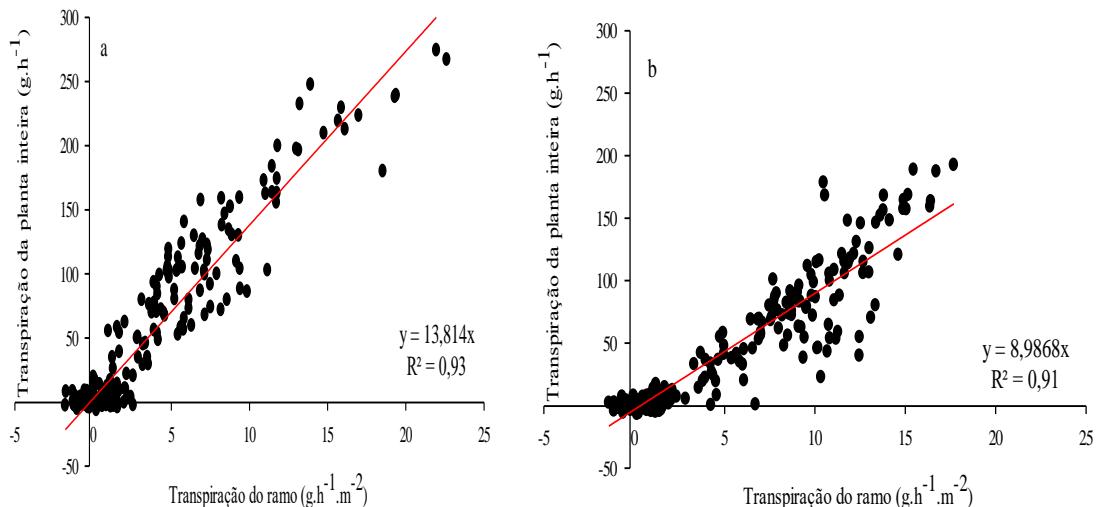


Figure 8. Relação entre a transpiração medida pelo sensor e pelo sistema de câmara, para (a) o sensor 1 e (b) o sensor 2.

4 DISCUSSÃO

A área condutora de água no xilema dos ramos de café foi substancialmente menor do que a dos outros materiais usados (Figura 5), o que justifica a diferença na inclinação da regressão linear apresentada por essa espécie em relação aos outros materiais usados. Vários estudos apontam que a grande diferença entre a calibração de um mesmo sensor para espécies diferentes ou até mesmo para a mesma espécie foi devida ao a anatomia do caule (Fernandez et al., 2006; Bush et al., 2010; Sam, 2016).

O fato do sensor apresentado neste trabalho ter sido primeiramente calibrado em material poroso sintético (tubo de papel preenchido com algodão), que é um meio poroso muito diferente daquele apresentado nos ramos das plantas, é explicado uma vez que assumimos que a calibração era independente da espécie de planta utilizada. Isso não foi confirmado pelos resultados que indicam que para cada espécie que o sensor for testado há a necessidade de se fazer uma calibração. Por isso, recomendamos verificar os resultados por algum tipo de validação principalmente devido a característica da anatomia do caule das plantas que crescem em diferentes

regiões antes que o sensor possa ser usado para monitoramento do fluxo de seiva xilemática. Além disso, ressalta-se que todas as espécies usadas nesse trabalho pertencem a classe das dicotiledôneas, logo, para monocotiledôneas os resultados podem ser diferentes devido as diferenças existentes entre as estruturas dos vasos dessas espécies.

Por ser o primeiro estudo com o sensor desenvolvido, não há trabalhos na literatura que permitam a comparação dos resultados aqui obtidos com de outros autores. No entanto, Isarangkool Na Ayutthaya et al. (2010) avaliando um método de dissipação térmica para medição do fluxo de seiva xilemática em três espécies tropicais, *Hevea brasiliensis* Müll. Arg, *Mangifera indica* L e *Citrus maxima* Merr, verificaram que a calibração era independente da espécie, e que o fluxo medido na seção de ramos dessas espécies ficou dentro da variação da calibração ao usar um material sintético preenchido com pó de serragem. Tfawala et al. (2018) calibrando um sensor baseado no pulso de calor para três espécies de árvores nativas, e utilizando um lisímetro de pesagem, também chegaram à conclusão de que a calibração em uma única espécie foi suficiente para que o sensor desenvolvido pelos autores pudesse ser utilizado em outras espécies de plantas. Diferente desses achados, Alla et al. (2022) corroborando com os resultados aqui encontrados, ao calibrar sondas de dissipação térmica para tamareira verificaram que a anatomia do xilema dessa espécie pode ser uma fonte de erro para o método, e que por isso, uma calibração universal não é viável. A exigência de uma única calibração é uma característica desejável aos sensores de fluxo de seiva, pois além de economizar tempo, espaço e recursos, também reduzirá o custo de aquisição pelo produtor.

O modelo proposto exige a determinação de apenas quatro componentes medidos ciclo após ciclo para estimar o fluxo. Sendo, α (logarítmico do produto das amplitudes a montante e a jusante) e ψ (soma das fases a montante e a jusante) para a condição de fluxo e α_0 (logarítmico do produto das amplitudes a montante e a jusante) e ψ_0 (soma das fases a montante e a jusante) para a condição de fluxo zero. Os parâmetros α_0 e ψ_0 são obtidos em condição de fluxo de seiva com velocidade igual a zero, normalmente durante o período ante-manhã, quando a alta umidade do ar e estando os estômatos das plantas fechados, o fluxo de seiva é mínimo podendo ser considerado igual a zero. Uma vez que α_0 e ψ_0 foram determinados, torna-se simples determinar α e ψ , pois basta medir a amplitude e a fase para a condição de fluxo, fazendo do modelo uma forma simples e prática para determinação do fluxo de seiva.

As medições em casa de vegetação aqui relatadas mostraram que o sensor desenvolvido pode ser usado com confiabilidade para monitoramento da transpiração de plantas de café neste ambiente e que pode ser testado em condição de campo. Os resultados mostraram uma adequada relação entre as medições realizadas nos ramos com o sensor desenvolvido e proposto neste trabalho com as avaliações realizadas com a câmara de plástico de Mylar®. Isso é indicado pelo elevado valor de R^2 (Figura 8a e 8b), e pela tendência similar de variação da transpiração diurna. Essa transpiração diurna varia em função das variáveis micrometeorológicas.

Para a maioria dos dias, e ao longo do período avaliado, foi evidenciado o elevado grau de sobreposição das curvas (Figuras 7a e 7b), o que mostra que os valores do fluxo de seiva xilemática avaliado pelo sensor são confiáveis.

A variação entre os valores do FSX calculado por meio das equações associadas aos sensores é explicada pelo fato de que eles foram instalados em plantas diferentes, que apesar de serem da mesma espécie e estarem submetidas às mesmas condições. Essas diferenças na estimativa da transpiração dos ramos entre os sensores possa ser devido à diferença no tamanho e área foliar total das plantas, bem como espessura e a anatomia dos ramos utilizados. Corroborando com os resultados aqui encontrados. Silva (2008) desenvolveu um sensor de FSX baseado no pulso de calor para a cultura do café, e também verificou diferenças entre a transpiração medida pelos sensores nas diferentes plantas de café em que foram instalados, e atribuiu essas diferenças aos mesmos fatores aqui relatados.

A menor quantidade de dias apresentando flutuações de fluxo abaixo de zero registrados pelo sensor pode estar associado a dois fatores, sendo que o primeiro é que, como o sensor avaliou a transpiração de um único ramo da planta, a queda de transpiração desse ramo em alguns dias pode não ter sido o suficiente para que o sensor detectasse valores negativos, visto que o fluxo de água não é uniforme em toda a planta. Além disso, a área foliar do ramo é muito menor, quando comparada a da planta inteira, o que pode justificar essa diferença em relação aos valores negativos observados nas plantas dentro da câmara. O segundo fator pode estar associado a forma como esses valores foram calculados, pois como os valores registrados a cada 4 minutos eram médias de valores medidos a cada 2 minutos no fluxo a jusante e 2 minutos no fluxo a montante, as variações das leituras durante esse tempo podem ter influenciado os resultados. Hu et al. (2022) realizando a calibração de sondas de dissipação térmica com aquecimento cíclico relatam que se o período do ciclo for muito

longo, o ciclo será afetado por mudanças no ambiente externo e haverá limitações associadas à baixa resolução de dados e pequeno volume de dados. Por outro lado, esses mesmos autores relatam que se o período do ciclo for muito curto, as propriedades térmicas da madeira são instáveis e a precisão da estimativa não pode ser garantida.

Apesar das discrepâncias supracitadas, o sensor desenvolvido e proposto neste trabalho apresenta algumas vantagens em relação ao sistema aberto de múltiplas câmaras, como por exemplo, quando testado, a possibilidade de ser usado em larga escala em condição e campo, menor custo com energia, menor custo de fabricação e aquisição e maior praticidade de instalação. Uma economia de tempo, espaço e recursos. Essas vantagens associadas aos resultados aqui apresentados, indicam que o sensor proposto tem um grande potencial para avaliar a transpiração de parte e do dossel de plantas de cafeiro em substituição ao sistema de múltiplas câmaras, e de outros métodos de maior custo.

5 CONCLUSÃO

O sensor desenvolvido forneceu valores satisfatórios da transpiração diária de ramos de cafeiro, quando foram comparados aos valores obtidos por meio do sistema aberto de múltiplas câmaras, indicando que o sensor pode ser uma ferramenta alternativa para o monitoramento da transpiração de ramos das plantas de café.

No primeiro experimento de calibração do sensor, os resultados apontam que a necessidade de calibração para que o sensor desenvolvido seja aplicável em todas as espécies de dicotiledôneas, pois a distribuição dos vasos xilemáticos varia de espécie para espécie, o que pode causar uma variação no tamanho da área condutora de seiva e consequentemente nos sinais do sensor.

Nesse estudo, foi apresentado duas linhas de evidência sobre a precisão e o desempenho do sensor desenvolvido. No entanto, cabe ressaltar que, embora os resultados obtidos em condição de casa de vegetação sejam bastantes promissores, uma maior quantidade de trabalhos avaliando o sensor desenvolvido em outras espécies são necessários. Isso inclui mais estudos de calibração com um número maior de hastes, bem como diferentes posições no dossel de diferentes espécies de plantas.

REFERÊNCIAS

- Alla, F., Jdaini, K., M'hamdi, H., Mechchate, H., AlZain, M. N., Alzamel, N. M., Elhoumaizi, M. A. (2022) Calibration of Thermal Dissipation Probes for Date Palm (*Phoenix dactylifera L.*). *Horticulturae*, v. 8, n. 2, p. 107.
- ALLEN, R.G.; Pereira, L.S.; Howell, T. A.; Jensen, M. E. (2011) Evapotranspiration information reporting: I. Factors governing measurement accuracy. *Agricultural Water Management*, v. 98, n. 6, p. 899-920.
- Bush, S. E., Hultine, K. R., Sperry, J. S., & Ehleringer, J. R. (2010) Calibration of thermal dissipation sap flow probes for ring-and diffuse-porous trees. *Tree physiology*, v. 30, n. 12, p. 1545-1554.
- Esteves, B.D.S.; Lousada, L.D.L.; Sousa, E.F.D.; Campostrini, E. (2015) Advanced techniques using the plant as indicator of irrigation management. *Ciência Rural*, v. 45, p. 821-827.
- Efrosinin, D.; Kochetkova, I.; Stepanova, N.; Yarovslavtsev, A.; Samouylov, K.; Valentini, R. (2020) The fourier series model for predicting sapflow density flux based on treetalker monitoring system. In: International Conference on Next Generation Wired/Wireless Networking. Cham: Springer International Publishing, p. 198-209.
- FAO, 2020. The State of Food and Agriculture 2020. Overcoming Water Challenges in Agriculture. Food and Agriculture Organization (FAO). Rome. <https://doi.org/10.4060/cb1447en>. Accessed 05 jul 2023.
- FAO, 2017. Water for Sustainable Food and Agriculture. A report produced for the G20 Presidency of Germany. Rome. Disponível em:<<https://www.fao.org/3/i7959e/i7959e.pdf>>. Acessed 05 jul 2023.

Fernández, E.; Čermák, J.; Cohen, Y.; Ferreira, I.; Nadezhina, N.; Testi, L.; Steppe, K. (2017) Methods to estimate sap flow. ISHS Working Group on Sap Flow, p. 1-9.

Fernández, J.E.; Palomo, M.J.; Díaz-Espejo, A.; Clothier, B.E.; Green, S.R.; Girón, I.F.; Moreno, F. (2001) Heat-pulse measurements of sap flow in olives for automating irrigation: tests, root flow and diagnostics of water stress. Agricultural water management, v. 51, n. 2, p. 99-123.

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, v. 271, p. 362-374.

FRIEDMAN, Shmulik P. (2023) Is the crop evapotranspiration rate a good surrogate for the recommended irrigation rate?. Irrigation and Drainage.

Fu, S.; Wei, X.; Wang, T.; Bai, Y. (2022) Effects of different water and fertilizer treatments on grapevine sap flow and water consumption characteristics. Scientia Horticulturae, v. 304, p. 111317.

González-Altozano, P.; Pavel, E.W.; Oncins, J.A.; Doltra, J.; Cohen, M.; Paço, T.; Castel, J.R. (2008) Comparative assessment of five methods of determining sap flow in peach trees. Agricultural water management, v. 95, n. 5, p. 503-515.

He, L.; Cleverly, J.; Wang, B.; Jin, N.; Mi, C.; Liu, D. L.; Yu, Q. (2018) Multi-model ensemble projections of future extreme heat stress on rice across southern China. Theoretical and Applied Climatology, v. 133, p. 1107-1118.

HASSLER, Sibylle Kathrin; WEILER, Markus; BLUME, Theresa. (2018) Tree-, stand- and site-specific controls on landscape-scale patterns of transpiration. Hydrology and Earth System Sciences, v. 22, n. 1, p. 13-30.

Hoelscher, M.T.; Kern, M.A.; Wessolek, G.; Nehls, T. (2018) A new consistent sap flow baseline-correction approach for the stem heat balance method using nocturnal water vapour pressure deficits and its application in the measurements of urban climbing plant

transpiration. Agricultural and Forest Meteorology, v. 248, p. 169-176.

Hu, M., Ma, C., Zhang, J., Ma, Y., Li, C (2022) Calibration of Thermal Dissipation Probes for Xylem Sap Flow in the Wood of a Diffuse-Porous and a Conifer Species under Cyclic Heating. Forests, v. 13, n. 11, p. 1964.

Isarangkool Na Ayutthaya, S., Do, F. C., Pannengpetch, K., Junjittakarn, J., Maeght, J. L., Rocheteau, A., & Cochard, H. (2010) Transient thermal dissipation method of xylem sap flow measurement: multi-species calibration and field evaluation. Tree Physiology, v. 30, n. 1, p. 139-148.

Jasechko, S.; Sharp, Z.D.; Gibson, J.J.; Birks, S.J.; Yi, Y.; Fawcett, P.J. (2013) Terrestrial water fluxes dominated by transpiration. Nature, v. 496, n. 7445, p. 347-350.

Jiang, T.; Sun, S.; Li, Z.; Li, Q.; Lu, Y.; Li, C.; Wu, P. (2022) Vulnerability of crop water footprint in rain-fed and irrigation agricultural production system under future climate scenarios. Agricultural and Forest Meteorology, v. 326, p. 109164.

Kool, D.; Agam, N.; Lazarovitch, N.; Heitman, J.L.; Sauer, T.J.; Ben-Gal, A. (2014) A review of approaches for evapotranspiration partitioning. Agricultural and forest meteorology, v. 184, p. 56-70.

Kovář, p.; Bačinová, H. (2015) Impact of evapotranspiration on diurnal discharge fluctuation determined by the Fourier series model in dry periods. Soil and Water Research, v. 10, n. 4, p. 210-217.

Li, Y.; Ye, J.; Xu, D.; Zhou, G.; Feng, H. (2022) Prediction of sap flow with historical environmental factors based on deep learning technology. Computers and Electronics in Agriculture, v. 202, p. 107400.

López-bernal, A. (2015) Efectos del Déficit Hídrico Sobre el Flujo de Savia y la Conductancia Estomática en Frutales. Tese de Doutorado. Departamento de Agronomía. Universidad de Córdoba.

Mancha, L.A.; Uriarte, D.; Prieto, M.H. (2021) Characterization of the transpiration of a vineyard under different irrigation strategies using sap flow sensors. *Water*, v. 13, n. 20, p. 2867.

Meixner, T., Manning, A. H., Stonestrom, D. A., Allen, D. M., Ajami, H., Blasch, K. W., ... & Walvoord, M. A. (2016). Implications of projected climate change for groundwater recharge in the western United States. *Journal of Hydrology*, 534, 124-138.

Ohana-Levi, N.; Munitz, S.; Ben-Gal, A.; Schwartz, A.; Peeters, A.; Netzer, Y. (2020) Multiseasonal grapevine water consumption—Drivers and forecasting. *Agricultural and Forest Meteorology*, v. 280, p. 107796.

Qin, Y., Mueller, N.D., Siebert, S., Jackson, R.B., AghaKouchak, A., Zimmerman, J.B., Tong, D., Hong, C.P., Davis, S.J. (2019) Flexibility and intensity of global water use. *Nat. Sustain.* 2 (6), 515–523.

Paço, T.A.; Paredes, P.; Pereira, L.S.; Silvestre, J.; Santos, F.L. (2019) Crop coefficients and transpiration of a super intensive Arbequina olive orchard using the dual Kc approach and the Kcb computation with the fraction of ground cover and height. *Water*, v. 11, n. 2, p. 383.

Pereira, L. S.; Paredes, P.; Hunsaker, D. J.; López-Urrea, R.; Shad, Z. M. (2021) Standard single and basal crop coefficients for field crops. Updates and advances to the FAO56 crop water requirements method. *Agricultural Water Management*, v. 243, p. 106466.

Poblete-echeverría, Carlos; ortega-farias, Samuel. (2012) Calibration and validation of a remote sensing algorithm to estimate energy balance components and daily actual evapotranspiration over a drip-irrigated Merlot vineyard. *Irrigation Science*, v. 30, n. 6, p. 537-553.

Poyatos, L.R.; Granda, V.; Molowny-Horas, R.; Mencuccini, M.; Steppe, K.; Martínez, V.J. SAPFLUXNET: (2021) towards a global database of sap flow measurements.

Poyatos, R.; Granda, V.; Molowny-Horas, R.; Mencuccini, M.; Steppe, K.; Martínez-Vilalta, J. SAPFLUXNET: (2016) towards a global database of sap flow measurements, *Tree Physiol.*, 36, 1449–1455.

Rashed, M.A.; Sefelnasr, A.; Sherif, M.; Murad, A.; Alshamsi, D.; Aliewi, A.; Ebraheem, A.A. (2023) Novel concept for water scarcity quantification considering nonconventional and virtual water resources in arid countries: Application in Gulf Cooperation Council countries. , v. 882.

Ren, R.; Liu, G.; Wen, M.; Horton, R.; Li, B.; Si, B. (2017) The effects of probe misalignment on sap flux density measurements and in situ probe spacing correction methods. *Agricultural and Forest Meteorology*, v. 232, p. 176-185.

Richter, B.D., et al., (2020) Water scarcity and fish imperilment driven by beef production. *Nat. Sustain.* 3 (4), 319–328.

Sam, M.C. (2016) Calibração de Técnicas de Fluxo de Seiva em Citrinos Usando o Método de Perfusão do Caule. doutorado Tese, University of Pretoria, Pretória, África do Sul.

Smith, D. M.; Allen, S. J. (1996) Measurement of sap flow in plant stems. *Journal of experimental Botany*, v. 47, n. 12, p. 1833-1844.

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*, v. 35, n. 4, p. 341-345.

Sunyer-Caldú, A.; Sepúlveda-Ruiz, P.; Salgot, M.; Folch-Sánchez, M.; Barcelo, D.; Diaz-Cruz, M. S. (2022) Reclaimed water in agriculture: a plot-scale study assessing crop uptake of emerging contaminants and pathogens. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, v. 10, n. 6, p. 108831.

Tfwala, C. M. van Rensburg, L. D., Bello, Z. A., & Green, S. R. (2018) Calibration of compensation heat pulse velocity technique for measuring transpiration of selected

indigenous trees using weighing lysimeters. Agricultural Water Management, v. 200, p. 27-33.

Vandegehuchte, M.W.; Steppe, K. (2013) Corrigendum to: Sap-flux density measurement methods: working principles and applicability. Functional Plant Biology, v. 40, n. 10, p. 1088-1088.

Wang, K.; Li, J.; Wang, W.; Zhang, Z.; Wang, X.; Wang, Q.; Yeh Tian-Chyi, J.; Hao, Y. (2023) Calibrating a model of depth to water table using Fourier series and Simpson numerical integration. Journal of Hydrology, v. 620, Part B.

Yawson, D.O. (2022) Balancing water scarcity, food production, and trade imperatives in the Caribbean: Could virtual water analysis help?, Journal of Cleaner Production, v. 376.

YI, Ruzhou; XU, Xianli. (2023) Species with larger vessel area have higher bias for the original Granier equation in calculating sap flux density. Journal of Hydrology, p. 129762.

Zhao, W.; Dong, X.; Wu, Z.; Wei, C.; Li, L.; Yu, D.; Ma, Y. (2022) Using infrared thermal imaging technology to estimate the transpiration rate of citrus trees and evaluate plant water status. Journal of Hydrology, v. 615, p. 128671.

Zhang, Y.; Wu, Z.; Singh, V. P.; Lin, Q.; Ning, S.; Zhou, Y.; Ma, Q. (2023) Agricultural drought characteristics in a typical plain region considering irrigation, crop growth, and water demand impacts. Agricultural Water Management, v. 282, p. 108266.

Zhang, R.; Xu, X.; Liu, M.; Zhang, Y.; Xu, C.; Yi, R.; Soulsby, C. (2019) Hysteresis in sap flow and its controlling mechanisms for a deciduous broad-leaved tree species in a humid karst region. Science China Earth Sciences, v. 62, p. 1744-1755.

3.2 APRIMORAMENTO DE UM SENSOR DE FLUXO DE SEIVA XILEMÁTICA PARA MEDAÇÃO DA TRANSPIRAÇÃO DE CAFÉ CONILON EM CONDIÇÕES IRRIGADAS E DE DÉFICIT HÍDRICO

RESUMO: O aumento das temperaturas e as alterações no regime de chuvas, intensificadas pelas mudanças climáticas, já comprometem a disponibilidade e o armazenamento de água em escala global. Esse cenário aumenta a pressão sobre a agricultura, que consome cerca de 70% da água doce disponível e precisa atender à demanda crescente de uma população que pode chegar a 9 bilhões até 2050. Diante desse desafio, torna-se essencial investir em tecnologias que auxiliem na gestão eficiente dos recursos hídricos. Nesse contexto, o uso de sensores para medição do fluxo de seiva xilemática destaca-se como uma estratégia promissora para otimizar o uso da água na agricultura, especialmente em áreas irrigadas, contribuindo para a maximização da eficiência hídrica e a sustentabilidade da produção agrícola. Baseado nisso, o objetivo desse trabalho foi aprimorar um sensor de fluxo de seiva baseado no pulso de calor para monitoramento da transpiração de plantas do clone A1 do café conilon (*Coffea canephora*) em condições irrigadas e de déficit hídrico. O experimento foi conduzido entre janeiro e fevereiro de 2025, na Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro (UENF), em Campos dos Goytacazes – RJ, sendo dividido em duas etapas: (i) aprimoramento dos sensores com a instalação de estrutura de alumínio sobre os resistores e termistores, tornando-os impermeáveis à água; e (ii) aplicação dos sensores nas plantas em casa de vegetação. Foram utilizadas 20 mudas de café conilon, cultivadas individualmente em sacos plásticos (11 x 18 cm) preenchidos com Latossolo vermelho-amarelo. Para o monitoramento hídrico, foram construídos três fluxímetros (evaporímetros) de bancada, cada um composto por uma caixa organizadora de 30 L como reservatório de água e uma bandeja superior de 10 L. Em dois dos fluxímetros, 20 mudas foram distribuídas (10 em cada), e a terceira estrutura foi utilizada como referência do controle de ar. Cada bandeja de 10L possuía orifício central para o fluxo de água, um tubo de Mariotte para manter o nível constante da lâmina de irrigação e uma camada de papel laminado para reduzir a evaporação. Os sensores foram instalados no ramo principal de duas mudas, uma em cada bandeja, com proteção térmica de papel alumínio. Após 14 dias de estabilização, foi aplicado déficit hídrico em uma das bandejas para testar a sensibilidade dos sensores na detecção de variações no fluxo de seiva. A coleta dos dados foi realizada automaticamente a cada 6 segundos, com médias calculadas a cada 4 minutos. Ao final, o fluxo de seiva foi expresso em $\text{g H}_2\text{O m}^{-2} \text{ h}^{-1}$, calculado com base na área foliar estimada por equação proposta por Partelli. Simultaneamente, a transpiração das plantas foi monitorada por um sistema aberto de múltiplas câmaras, confeccionadas em plástico Mylar® e acopladas a um analisador de gases por infravermelho (CIRAS DC, PPSystems, USA), o que possibilitou medir as trocas gasosas de todo o dossel das plantas. A comparação entre os dados obtidos pelos sensores e pelas câmaras foi realizada por meio de análise de regressão, cálculo do erro médio absoluto (EMA), raiz quadrada do erro médio (RMSE) e análise da resposta diária da transpiração. Os resultados validaram a eficiência dos sensores em estimar o fluxo de seiva e detectar o efeito do déficit hídrico, evidenciando o potencial da tecnologia como ferramenta de apoio à gestão hídrica na agricultura.

Palavras-chave: Gestão hídrica, fluxo de água, irrigação sustentável.

ABSTRACT: The increase in temperatures and changes in rainfall patterns, intensified by climate change, are already compromising water availability and storage on a global scale. This scenario puts additional pressure on agriculture, which consumes about 70% of available freshwater and needs to meet the growing demand of a population that may reach 9 billion by 2050. In the face of this challenge, it is essential to invest in technologies that assist in the efficient management of water resources. In this context, the use of sensors to measure xylem sap flow stands out as a promising strategy to optimize water use in agriculture, especially in irrigated areas, contributing to the maximization of water efficiency and the sustainability of agricultural production. Based on this, the objective of this study was to improve a heat-pulse-based sap flow sensor for monitoring transpiration in A1 clone conilon coffee plants (*Coffea canephora*) under irrigated and water deficit conditions. The experiment was conducted between January and February 2025 at the Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro (UENF), in Campos dos Goytacazes – RJ, and was divided into two phases: (i) improvement of the sensors by installing an aluminum structure over the resistors and thermistors, making them waterproof; and (ii) application of the sensors to plants in a greenhouse. Twenty conilon coffee seedlings were used, individually grown in plastic bags (11 x 18 cm) filled with Latossolo vermelho-amarelo. For water monitoring, three bench evaporimeters were constructed, each consisting of a 30 L organizer box as a water reservoir and a 10 L upper tray. In two of the evaporimeters, 20 seedlings were distributed (10 per tray), while the third structure was used as a control for air reference. Each 10 L tray had a central hole for water flow, a Mariotte tube to maintain a constant irrigation level, and a layer of laminated paper to reduce evaporation. Sensors were installed on the main stem of two plants, one in each tray, with thermal protection of aluminum foil. After 14 days of stabilization, a water deficit was applied to one of the trays to test the sensors' sensitivity to variations in sap flow. Data collection was performed automatically every 6 seconds, with averages calculated every 4 minutes. At the end, sap flow was expressed in $\text{g H}_2\text{O m}^{-2} \text{ h}^{-1}$, calculated based on the leaf area estimated using an equation proposed by Partelli. Simultaneously, the transpiration of the plants was monitored by an open system with multiple chambers made of Mylar® plastic and attached to an infrared gas analyzer (CIRAS DC, PPSystems, USA), allowing for the measurement of gas exchanges across the entire canopy. The comparison between the data obtained by the sensors and the chambers was performed using regression analysis, calculation of the mean absolute error (MAE), root mean square error (RMSE), and analysis of daily transpiration response. The results validated the sensors' efficiency in estimating sap flow and detecting the effect of water deficit, highlighting the potential of the technology as a tool to support water management in agriculture.

Keywords: Water management, water flow, sustainable irrigation.

1 INTRODUÇÃO

As mudanças climáticas representam uma ameaça significativa à disponibilidade de água e à produção de alimentos, fatores essenciais para sustentar a crescente população global(Arunrat et al.,2020; Mekonnen e Hoekstra, 2020). O aumento das temperaturas globais e as alterações nos padrões de precipitação têm levado a uma maior frequência e intensidade de eventos climáticos extremos, como secas e inundações, que comprometem a produtividade agrícola e a segurança hídrica (Padron et al., 2020).

Estudos recentes indicam que o aquecimento global afeta negativamente principalmente as culturas de sequeiro, que dependem majoritariamente da água da pegada verde (umidade do solo proveniente da chuva) (He e Rosa, 2023). Além disso, a escassez de água, exacerbada pelas mudanças climáticas, representa uma séria restrição à produção de alimentos em diversas regiões do mundo (Liu et al., 2022).

A interrupção na disponibilidade de alimentos, a redução no acesso e a diminuição da qualidade alimentar são consequências diretas dessas mudanças climáticas (EPA, 2025). Sem medidas eficazes para minimizar as mudanças climáticas, a segurança alimentar global estará em risco, afetando principalmente as populações mais vulneráveis e, além disso, o consumo global de água doce em breve atingirá seu limite máximo (FAO, 2021). Portanto, é fundamental adotar ações imediatas e coordenadas para combater as mudanças climáticas e assegurar a sustentabilidade dos recursos hídricos e a produção de alimentos para as gerações futuras.

Para enfrentar esses desafios, diversas estratégias têm sido desenvolvidas para minimizar os impactos das mudanças climáticas na disponibilidade hídrica e na produção de alimentos. Entre elas, o particionamento da evapotranspiração das culturas (ET_c) em seus componentes — evaporação do solo (E) e transpiração das plantas (T) — destaca-se como uma ferramenta fundamental. Essa abordagem é essencial para o planejamento eficiente da irrigação e para a otimização da produtividade hídrica principalmente em regiões áridas (Cui et al., 2021).

O particionamento da evapotranspiração em seus componentes para melhorar o uso da água nas áreas agrícolas tem sido realizado por meio de diversos métodos diretos e indiretos, abrangendo desde a escala de campo até a do ecossistema. Entre as principais abordagens utilizadas estão as técnicas de isótopos estáveis, lisímetros, covariância de vórtices, modelos hidrológicos, sensoriamento remoto e métodos de

fluxo de seiva (Wang et al., 2021, Ma et al. (2020), Williams et al., 2004; Kool et al., 2014; Wang et al., 2015a).

Dentre esses métodos, aqueles baseados na medição do fluxo de seiva são uma maneira eficaz de avaliar diretamente a transpiração de culturas, principalmente em plantas herbáceas e em pequenas parcelas onde é difícil aplicar outras abordagens (Momi et al., 2021). Além disso, eles são mais baratos do que os lisímetros e fornecem maior resolução temporal do que as técnicas de balanço hídrico do solo o que os torna amplamente utilizado para diversos fins na agricultura (Capurro et al., 2024).

Atualmente, essa técnica vem se consolidando como a principal abordagem para monitoramento contínuo e em tempo real da transpiração (T) das plantas, desempenhando um papel fundamental na gestão eficiente dos recursos hídricos (Kumar et al., 2022). Além disso, estudos têm demonstrado que o monitoramento do fluxo de seiva é essencial para estimar com precisão a dinâmica do uso da água (WU) e da transpiração das plantas, além de fornecer indicadores do vigor vegetal e das respostas fisiológicas a estresses hídricos (Ozcelik et al., 2022; West et al., 2023).

Baseados nisso, nas últimas décadas, vários métodos de medição de fluxo de seiva foram desenvolvidos-(Li et al., 2022, Zeng et al., 2022). No entanto, o método do pulso de calor é amplamente utilizado e apresenta algumas vantagens em relação a outros métodos como: têm (i) maior precisão, (ii) podem estimar variações circunferenciais no fluxo de seiva, (iii) não requerem calibrações específicas e (iv) não são severamente impactados por gradientes naturais de temperatura (Steppe et al., 2010, Vandegehuchte e Steppe, 2013). E além disso são mais recomendados para aplicação em escala de campo por resultar em um menor consumo de energia e consequentemente maior lucro ao produtor. Pensando nisso, o objetivo desse trabalho foi aprimorar um sensor de fluxo de seiva baseado no pulso de calor para monitoramento da transpiração de plantas do clone A1 do café conilon (*Coffea canephora*) em condições irrigadas e de déficit hídrico.

2 MATERIAL E MÉTODOS

O estudo foi conduzido em duas fases distintas. Na primeira, aprimoraram-se os sensores de fluxo de seiva, com a instalação de uma estrutura de alumínio sobre os resistores e termistores, tornando-os impermeáveis à água (Figura 1). Na segunda fase, os sensores foram aplicados para medir o fluxo de seiva em mudas do clone A1

de café conilon (*Coffea canephora*) cultivadas em casa de vegetação. Ambas as etapas foram realizadas entre janeiro e fevereiro de 2025 na Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, em Campos dos Goytacazes, RJ, Brasil.

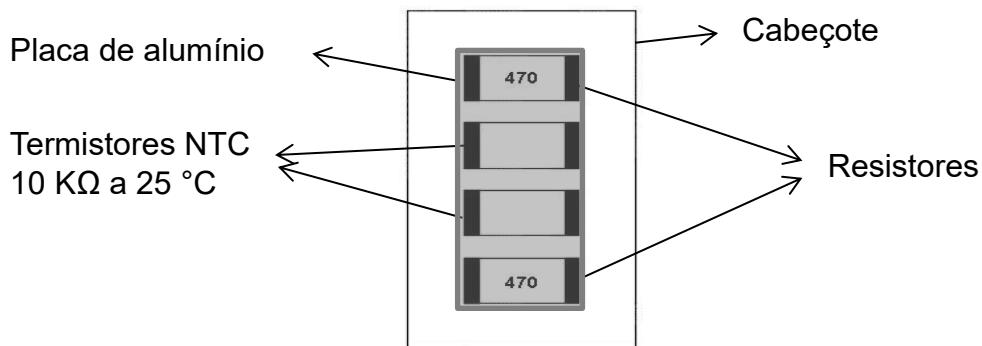


Figura 1. Ilustração do sensor de fluxo de seiva xilemática desenvolvido e as partes constituintes.

2.1 Princípio de funcionamento do sensor desenvolvido

O funcionamento do sensor fundamenta-se na geração e monitoramento de pulsos de calor, os quais promovem o aquecimento da seiva xilemática, em um segmento de caule, ramo ou colmo da planta. No sensor desenvolvido, a aplicação do pulso de calor ocorre de forma cíclica e alternada por meio do aquecimento de resistores. Inicialmente, o resistor posicionado a montante do fluxo gera um pulso, seguido, após um intervalo de 120 segundos, pela ativação do resistor localizado a jusante, estabelecendo um ciclo contínuo de emissão de calor. Esse processo permite o rastreamento da dissipação do calor ao longo do xilema, possibilitando a quantificação precisa do fluxo de seiva.

Obtendo-se N amostras dos valores das temperaturas em cada termistor, em intervalos uniformes, pode-se, por intermédio da Análise Harmônica de Fourier, determinar as amplitudes (A_x e A_y) e as defasagem de fase (F_x e F_y) da onda de calor que propaga, após a aplicação de um pulso de calor pelo resistor, nas posições x e y de cada termistor, respectivamente.

É possível demonstrar que, matematicamente, a densidade de fluxo (U , $\text{m}^3 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) pode ser calculada utilizando-se a Equação 1.

$$U = \frac{2\pi}{T} \cdot \frac{M}{\psi} \cdot \left\{ \frac{(\alpha - \alpha_0 \mp \psi_0)^2 - \psi^2}{(\alpha - \alpha_0 \mp \psi_0)^2 + \psi^2} \right\} \quad (1)$$

em que,

T – período do ciclo entre dois pulso de calor consecutivos, s;

M - soma das distâncias dos termistores em relação a fonte, $x + y$, m;

ψ - soma das defasagens de fase, subtraídas da defasagem fase original, rad;

ψ_0 - valor de ψ para a condição de fluxo zero; rad;

α - logaritmo neperiano do produto das amplitudes, adimensional;

α_0 - valor de α para a condição de fluxo zero, adimensional.

Sendo,

$$\alpha = \ln(Ax.Ay) \quad (2)$$

e

$$\psi = F_x + F_y - 2\epsilon \quad (3)$$

O parâmetro ϵ é a defasagem na origem do pulso de calor. Se o pulso for aplicado simetricamente em relação à metade do período do ciclo de aquecimento, o valor de $\epsilon = \pi$ (pi).

2.2 Experimento em casa de vegetação

A aplicação dos sensores para a medição do fluxo de seiva nas plantas cultivadas em casa de vegetação foi realizada entre janeiro e fevereiro de 2025. O experimento utilizou mudas do clone A1 de café Conilon (*Coffea canephora*), cultivadas individualmente em sacos plásticos com dimensões de 11 cm de diâmetro × 18 cm de comprimento (11 × 18 cm). Esses sacos foram preenchidos com Latossolo vermelho-amarelo previamente preparado para garantir condições adequadas de crescimento e desenvolvimento das plantas.

Para o monitoramento do fluxo de seiva, as mudas foram alocadas em um sistema de inundação desenvolvido em laboratório. Foram construídos dois sistemas compostos por uma caixa plástica com capacidade de 30 L, que servia como reservatório de água, e uma bandeja de 10 L posicionada sobre a caixa maior, onde as mudas foram dispostas (Figura 2). Em cada bandeja de 10 L foram acomodadas 10 mudas, sendo que no centro da bandeja foi feito um orifício para permitir a passagem da água do reservatório inferior, e manter uma lâmina de água de 2 cm. Essas

estruturas foram projetadas para, utilizando-se do fenômeno da capilaridade, garantir um fluxo contínuo de água e manter uma lâmina adequada e constante de irrigação ao redor das raízes das plantas.

A manutenção do nível hídrico na bandeja superior foi realizada por meio de um tubo de Mariotte, instalado em uma peça de isopor posicionada entre as extremidades das duas caixas. Esse mecanismo assegurava que o suprimento de água fosse mantido de forma estável, evitando variações abruptas que pudesse interferir nas medições. Para minimizar a evaporação da água, uma camada de papel laminado foi colocada sobre a superfície da água e entre os sacos plásticos contendo as mudas. Adicionalmente, a parte superior dos sacos foi vedada, reduzindo ainda mais a perda de umidade para o ambiente buscando garantir condições mais controladas para o experimento.

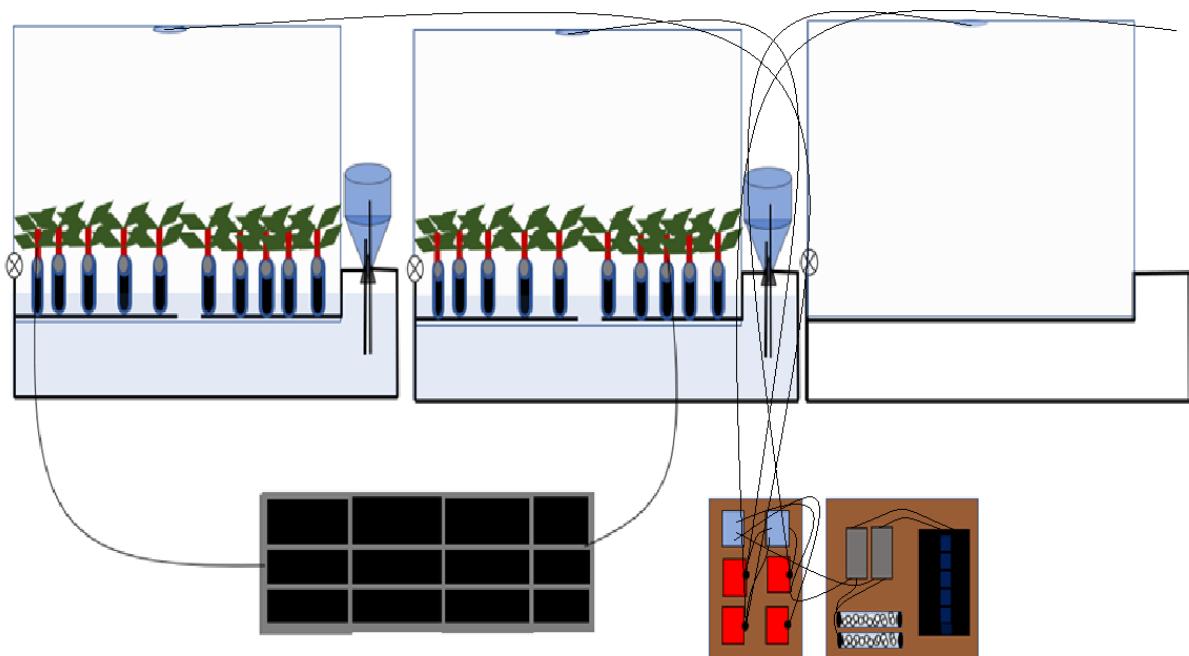


Figura 2. Esquema do fluxímetro desenvolvido em laboratório, composto por uma caixa organizadora de 30 L (reservatório de água) e uma bandeja de 10 L posicionada acima, onde as mudas de café Conilon foram acomodadas. O sistema incluía um orifício central para passagem de água, um tubo de Mariotte para manutenção do nível hídrico e uma camada de papel laminado sobre a superfície da água para minimizar a evaporação.

Os sensores de fluxo de seiva foram testados em duas mudas (uma em cada bandeja), selecionadas aleatoriamente dentro das respectivas bandejas. A instalação foi realizada no ramo principal de cada planta, assegurando o contato adequado para a medição do fluxo de seiva. Para minimizar interferências da radiação solar direta, os

sensores foram protegidos com papel alumínio. Quatorze dias após o início do experimento, em uma das bandejas foi aplicado déficit hídrico com o objetivo de avaliar a sensibilidade do sensor na detecção e no acompanhamento das variações do fluxo de seiva durante períodos de restrição hídrica.

Os dados coletados foram registrados por um coletor automático programado para realizar leituras a cada 6 segundos, armazenando médias a cada 4 minutos, permitindo assim um monitoramento preciso e contínuo do fluxo de seiva ao longo do experimento.

Ao final do período de avaliação, foi medido o comprimento da nervura central de cada folha presente na planta onde os sensores estavam instalados, bem como das demais plantas e a área foliar foi determinada utilizando a equação proposta por Partelli et al. (2006). Com esses dados, os valores do fluxo de seiva xilemática foram expressos em $\text{g H}_2\text{O m}^{-2} \text{ h}^{-1}$, permitindo sua conversão em transpiração das plantas.

Trocas gasosas de todo o dossel foram avaliadas nas mesmas plantas onde os sensores estavam instalados, utilizando um sistema aberto de múltiplas câmaras (Figura 2), adaptado do modelo descrito por Rodrigues et al. (2016). As câmaras, com volume de $0,25 \text{ m}^3$ ($1 \times 0,5 \times 0,5 \text{ m}$), foram confeccionadas com plástico Mylar® e equipadas com ventiladores e válvulas solenóides, permitindo a circulação controlada do ar e a amostragem dos fluxos gasosos.

O ar ambiente foi continuamente direcionado para as câmaras, onde amostras do ar de entrada e saída eram coletadas e analisadas por um analisador de gases por infravermelho (CIRAS DC, PPSystems, USA). Esse sistema quantificou as variações nas concentrações de CO_2 e vapor d'água entre o ar que entrava e o que saía de cada câmara, possibilitando o cálculo preciso da taxa de transpiração das plantas de café.

Através da análise de regressão, da raiz quadrada do erro médio (RSME), do erro médio absoluto (EMA) e da resposta diária da transpiração da planta inteira, foi possível comparar os valores de transpiração da planta obtidos pelo sensor com os valores da transpiração da planta inteira (dossel), medidos por meio de um sistema aberto de múltiplas câmaras. Essa comparação permitiu uma avaliação mais precisa da eficiência do sensor em estimar a transpiração total da planta, levando em consideração as variáveis ambientais e as características específicas do sistema de medição.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

As variações diárias da transpiração durante o período experimental medida pelo sistema aberto de múltiplas câmaras (Balão) e pelo sensor de fluxo de seiva estão apresentadas na Figura 3. Observou-se que, na maior parte das leituras noturnas, as taxas de transpiração permaneceram próximas de zero, como esperado devido à redução da atividade estomática nesse período. Os picos diurnos de transpiração atingiram valores máximos de 71,27 e 13,89 g h⁻¹ m⁻² para o Balão 1, e de 28,20 e 13,58 g h⁻¹ m⁻² para o Balão 2. As médias diárias de transpiração foram de 11,01 e 2,18 g h⁻¹ m⁻² para o Balão 1, e de 6,75 e 3,99 g h⁻¹ m⁻² para o Balão 2, respectivamente.

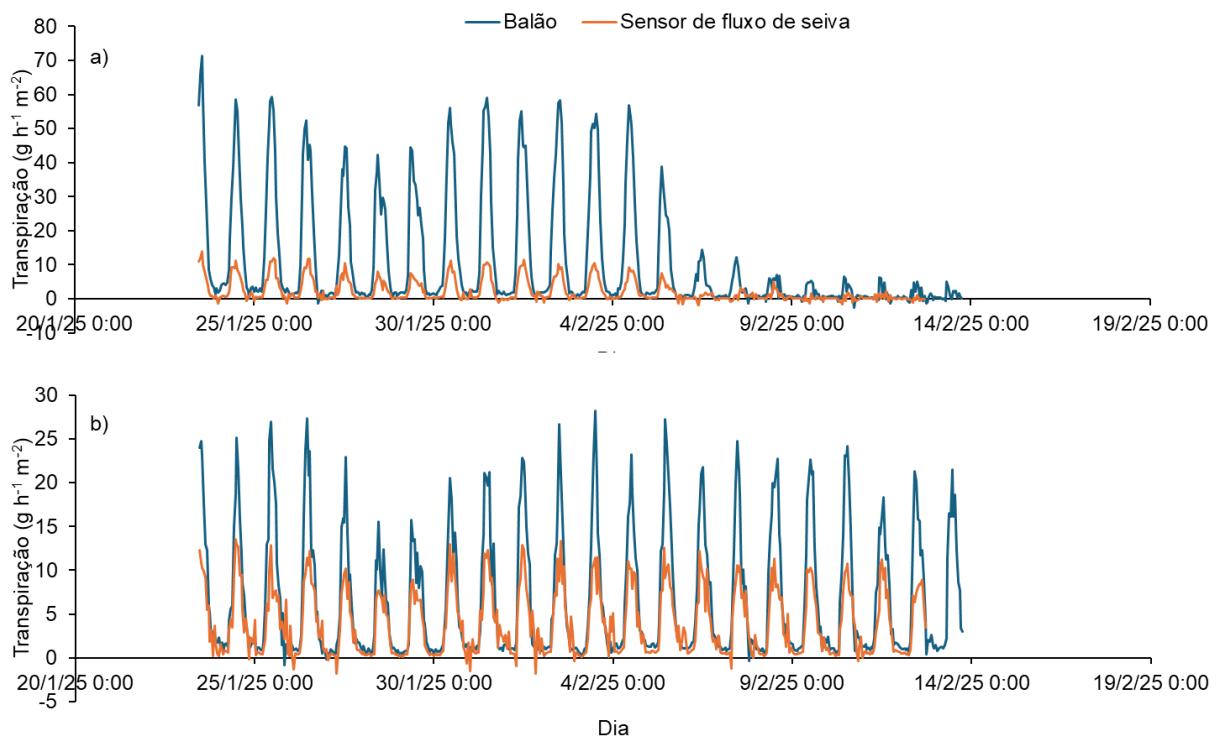


Figura 3. Padrão diurno da transpiração de mudas do clone A1 de café conilon, obtido por um sistema aberto de múltiplas câmaras (Balão), e do fluxo de seiva monitorado pelo sensor térmico desenvolvido. a) Balão 1: a planta foi mantida inicialmente sob irrigação plena e, em seguida, submetida a um regime de déficit hídrico progressivo até alcançar condição de estresse hídrico severo. b) Balão 2: a planta foi mantida continuamente sob condições de irrigação plena.

Os padrões de variação da utilização diário de água foram semelhantes entre

as plantas alocadas em ambos os balões, evidenciando a influência predominante de fatores ambientais, como a radiação solar e o déficit de pressão de vapor (DVP), nos processos de transpiração. Conforme ilustrado na Figura 3, a partir do dia 05/02/2025, observa-se no balão 1, uma redução nos valores de transpiração medidos tanto pelo sensor de fluxo de seiva quanto pelo sistema aberto de múltiplas câmaras. Essa redução é atribuída ao início dos efeitos do déficit hídrico imposto, refletindo a resposta fisiológica das plantas à restrição de água.

A comparação entre as estimativas de transpiração obtidas pelo sistema aberto de múltiplas câmaras e pelo sensor de fluxo de seiva desenvolvido para as mudas do clone A1 de café conilon revelou uma forte correlação linear (Figura 4). Os coeficientes de determinação (R^2) foram de 0,91 para a planta submetida ao déficit hídrico progressivo e de 0,84 para a planta mantida sob irrigação plena, demonstrando a capacidade do sensor em acompanhar com precisão as variações na transpiração em escala horária. Esses resultados evidenciam a confiabilidade do sensor desenvolvido e sua aderência aos fundamentos teóricos da fisiologia da transpiração vegetal.

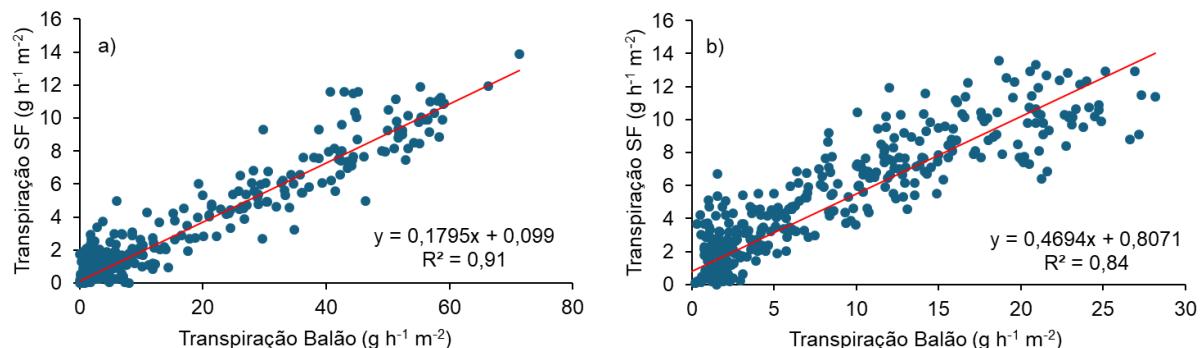


Figura 4. Comparação entre a transpiração horária estimada com os sensores de fluxo de seiva desenvolvido e a transpiração medida pelo sistema aberto de múltiplas camaras. a) Balão 1, b) Balão 2.

A soma total da transpiração ao longo dos 22 dias de monitoramento foi de 5682,33 e 3454,22 $\text{g h}^{-1} \text{m}^{-2}$ para as medições realizadas pelos balões 1 e 2, respectivamente, e de 1064,31 e 1941,49 $\text{g h}^{-1} \text{m}^{-2}$ para os sensores de fluxo de seiva instalados nas mesmas plantas. Quando comparadas às medições obtidas pelo sistema de múltiplas câmaras, as estimativas dos sensores de fluxo de seiva foram 80,31% e 40,91% inferiores nos balões 1 e 2, respectivamente. Os valores de erro médio absoluto (MAE) e raiz do erro quadrático médio (RMSE) foram de 9,15 mm e

16,39 mm para o balão 1, e de 3,34 mm e 5,29 mm para o balão 2. Esses resultados indicam que o sensor de fluxo de seiva desenvolvido apresentou desempenho satisfatório para a estimativa diária da transpiração das mudas do clone A1 de café conilon, especialmente sob condições de irrigação plena.

Estudos que compararam diretamente as estimativas de transpiração obtidas por sensores de fluxo de seiva e por sistemas abertos de múltiplas câmaras na cultura do café ainda são escassos, o que limita a possibilidade de uma comparação direta dos resultados obtidos neste trabalho com os de outros autores. No entanto, Dragoni et al. (2005), ao avaliarem a transpiração em quatro plantas de macieira sob clima úmido, utilizando sensores de fluxo de seiva pelo método do pulso de calor calibrados com câmaras de troca gasosa de dossel inteiro, observaram que três dos quatro sensores superestimaram os valores de transpiração em relação à troca gasosa, com erros medianos variando entre 45% e 225% ao longo do período avaliado. Apenas um sensor apresentou leve subestimação, com erro mediano de 20%. Esses resultados reforçam a necessidade de calibração e validação dos sensores de fluxo de seiva, especialmente ao serem aplicados em diferentes espécies e condições ambientais.

Vários outros trabalhos disponíveis na literatura destacam uma ligeira tendência dos métodos de fluxo de seiva em superestimar ou subestimar os valores de transpiração medidos por outros métodos. Capurro et al. (2024) ao desenvolver um novo sistema de fluxo de seiva para medir a transpiração do milho usando o método do pulso de calor no norte do Colorado, EUA, observaram que os seus sensores superestimaram em 8% a transpiração medida por sensores comerciais.

Grace et al. (2017), ao utilizarem o método do pulso de calor para medir o fluxo de seiva em milho e girassol, empregando sensores com corpos impressos em 3D e eletrônicos de baixo custo no Colorado, EUA, observaram que os sensores desenvolvidos apresentaram tendência à subestimação dos valores reais de transpiração quando as taxas ultrapassaram 300 g h^{-1} . De forma semelhante, Almeida (2012), em estudo conduzido em Pernambuco, Brasil, avaliando a transpiração do café conilon por meio de lisimetria, fluxo de seiva e balanço hídrico, constatou que o método do fluxo de seiva subestimou em aproximadamente 10% os valores obtidos pelo lisímetro.

A diferença observada entre os valores de transpiração estimados pelos sensores de fluxo de seiva e aqueles obtidos pelo sistema aberto de múltiplas câmaras (balões) pode, em parte, ser atribuída à interferência da evaporação residual nas

medições dos balões. Apesar do cuidado em isolar a lâmina de água com papel alumínio para minimizar perdas por evaporação, é possível que, ao longo do experimento, o desgaste do material ou falhas na vedação tenham permitido alguma troca gasosa indesejada. Essa evaporação adicional pode ter superestimado os valores registrados pelos balões, resultando na discrepância em relação às medições diretas da transpiração obtidas pelos sensores de fluxo de seiva. Dragoni et al. (2005) relatam que as medições da técnica de troca de gás podem ser fortemente afetadas pelas condições ambientais (chuva, vento forte, condensação dentro dos balões) e o monitoramento constante das câmaras é necessário para obter medições confiáveis.

Por outro lado, as diferenças observadas entre os valores de transpiração medidos pelos próprios sensores de fluxo de seiva podem estar associadas a variações intrínsecas entre as plantas avaliadas. Embora ambas tenham sido cultivadas sob as mesmas condições ambientais e de manejo, diferenças morfológicas, especialmente na área foliar total, influenciaram diretamente a demanda transpiratória. As plantas do balão 2 apresentaram uma área foliar total de 4.425,31 cm², superior à das plantas do balão 1, que foi de 3.688,53 cm² — uma diferença de 736,78 cm². Esse maior desenvolvimento foliar no balão 2 potencialmente resultou em maiores taxas de transpiração registradas pelo sensor instalado nessa unidade.

Esse padrão de variação também foi observado no estudo de Grace et al. (2017), que reportaram diferenças nas estimativas de transpiração obtidas pelos mesmos sensores entre plantas de milho e girassol. Os autores atribuíram essas variações às diferenças anatômicas na organização dos feixes vasculares entre as espécies. O milho, por ser uma monocotiledônea, apresenta feixes vasculares distribuídos de forma dispersa por todo o tecido do caule, enquanto o girassol, uma dicotiledônea, possui um anel contínuo de feixes vasculares localizado próximo à periferia do caule. Essa diferença estrutural não apenas influencia a uniformidade da condução da seiva, como também pode afetar a velocidade real do fluxo dentro dos vasos do xilema — sendo potencialmente maior no girassol em comparação ao milho. Esses resultados reforçam a relevância das características morfoanatômicas das plantas na interpretação dos dados obtidos por sensores de fluxo de seiva, o que pode ter contribuído para as diferenças observadas no presente estudo.

4 CONCLUSÃO

Os resultados obtidos neste estudo demonstraram que o sensor de fluxo de seiva desenvolvido apresentou desempenho satisfatório na estimativa da transpiração diária de mudas do clone A1 de café conilon, especialmente sob condições de irrigação plena. A forte correlação linear entre os dados obtidos pelos sensores e pelo sistema aberto de múltiplas câmaras confirma a capacidade do sensor em captar as variações na transpiração em escala horária, mesmo sob condições de estresse hídrico progressivo.

As diferenças observadas entre os métodos podem ser atribuídas tanto a limitações de cada técnica como a possível evaporação residual nas câmaras, quanto às características morfofisiológicas das plantas avaliadas, em especial a variação na área foliar. Esses fatores reforçam a importância da calibração e validação dos sensores de fluxo de seiva para cada espécie e condição experimental, bem como a necessidade de considerar as particularidades anatômicas e estruturais das plantas na interpretação dos dados.

Por fim, os resultados corroboram a viabilidade do sensor térmico desenvolvido como uma alternativa de baixo custo e eficiente para o monitoramento da transpiração em café conilon, contribuindo para avanços na instrumentação de campo e no entendimento dos processos fisiológicos da cultura.

REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, Carlos Alexandre Barros de. (2012) Transpiração em *Coffea canephora*: lisimetria, fluxo de seiva e balanço hídrico.
- Arunrat, N., Pumijumnong, N., Sereenonchai, S., Chareonwong, U., & Wang, C. (2020) Assessment of climate change impact on rice yield and water footprint of large-scale and individual farming in Thailand. *Science of the Total Environment*, v. 726, p. 137864, 2020.
- Capurro, M. C., Ham, J. M., Kluitenberg, G. J., Comas, L., & Andales, A. A. (2024) A novel sap flow system to measure maize transpiration using a heat pulse method. *Agricultural Water Management*, v. 301, p. 108963.

Dragoni, D., Lakso, A. N., & Piccioni, R. M. (2005) Transpiration of apple trees in a humid climate using heat pulse sap flow gauges calibrated with whole-canopy gas exchange chambers. Agricultural and Forest Meteorology, v. 130, n. 1-2, p. 85-94.

Cui, Y., Jia, L., & Fan, W. (2021) Estimation of actual evapotranspiration and its components in an irrigated area by integrating the Shuttleworth-Wallace and surface temperature-vegetation index schemes using the particle swarm optimization algorithm. Agricultural and Forest Meteorology, v. 307, p. 108488.

FAO, (2021) O estado dos recursos terrestres e hídricos do mundo para alimentação e agricultura – sistemas em ponto de ruptura.

Miner, G. L., Ham, J. M., & Kluitenberg, G. J. (2017) A heat-pulse method for measuring sap flow in corn and sunflower using 3D-printed sensor bodies and low-cost electronics. Agricultural and Forest Meteorology, v. 246, p. 86-97.

He, L., & Rosa, L. (2023) Solutions to agricultural green water scarcity under climate change. PNAS nexus, v. 2, n. 4, p. pgad117.

Kool, D., Agam, N., Lazarovitch, N., Heitman, J. L., Sauer, T. J., & Ben-Gal, A. (2014) A review of approaches for evapotranspiration partitioning. Agricultural and forest meteorology, v. 184, p. 56-70.

Kumar, R., Hosseinzadehtaher, M., Hein, N., Shadmand, M., Jagadish, S. K., & Ghanbarian, B. (2022) Challenges and advances in measuring sap flow in agriculture and agroforestry: A review with focus on nuclear magnetic resonance. Frontiers in plant science, v. 13, p. 1036078.

Li, Y., Chen, Q., He, K., & Wang, Z. (2022) The accuracy improvement of sap flow prediction in *Picea crassifolia* Kom. based on the back-propagation neural network model. *Hydrological Processes*, 36(2), e14490

Li, Y., Chen, Q., He, K., & Wang, Z. Liu, X., Liu, W., Tang, Q., Liu, B., Wada, Y., & Yang, H. (2022) Global agricultural water scarcity assessment incorporating blue and

green water availability under future climate change. *Earth's Future*, v. 10, n. 4, p. e2021EF002567.

Ma, L., Li, Y., Wu, P., Zhao, X., Chen, X., & Gao, X. (2020) Coupling evapotranspiration partitioning with water migration to identify the water consumption characteristics of wheat and maize in an intercropping system. *Agricultural and Forest Meteorology*, v. 290, p. 108034.

Mekonnen, M. M., & Hoekstra, A. Y. (2020) Sustainability of the blue water footprint of crops. *Advances in water resources*, v. 143, p. 103679.

Momii, K., Hiyama, H., & Takeuchi, S. (2021) Field sugarcane transpiration based on sap flow measurements and root water uptake simulations: Case study on Tanegashima Island, Japan. *Agricultural Water Management*, v. 250, p. 106836.

Özçelik, M. S., Tomášková, I., Surový, P., & Modlinger, R. (2022) Effect of Forest Edge Cutting on Transpiration Rate in *Picea abies* (L.) H. Karst. *Forests*, v. 13, n. 8, p. 1238.

Padrón, R. S., Gudmundsson, L., Decharme, B., Ducharne, A., Lawrence, D. M., Mao, J., ... & Seneviratne, S. I. (2020) Observed changes in dry-season water availability attributed to human-induced climate change. *Nature Geoscience*, v. 13, n. 7, p. 477-481.

Steppe, K., De Pauw, D. J., Doody, T. M., & Teskey, R. O. (2010) A comparison of sap flux density using thermal dissipation, heat pulse velocity and heat field deformation methods. *Agricultural and Forest Meteorology*, v. 150, n. 7-8, p. 1046-1056.

Vandegehuchte, M. W., & Steppe, K. (2013) Corrigendum to: Sap-flux density measurement methods: working principles and applicability. *Functional Plant Biology*, v. 40, n. 10, p. 1088-1088.

Wang, Y., Horton, R., Xue, X., & Ren, T. (2021) Partitioning evapotranspiration by measuring soil water evaporation with heat-pulse sensors and plant transpiration with sap flow gauges. *Agricultural Water Management*, v. 252, p. 106883.

Wang, P., Yamanaka, T., Li, X. Y., & Wei, Z. (2015) Partitioning evapotranspiration in a temperate grassland ecosystem: Numerical modeling with isotopic tracers. Agricultural and Forest Meteorology, v. 208, p. 16-31.

West, R. R., Lada, R. R., & MacDonald, M. T. (2023) Nutrition and related factors affecting maple tree health and sap yield. American Journal of Plant Sciences, v. 14, n. 2, p. 125-149.

Williams, D. G., Cable, W., Hultine, K., Hoedjes, J. C. B., Yepez, E. A., Simonneaux, V., ... & Timouk, F. (2004) Evapotranspiration components determined by stable isotope, sap flow and eddy covariance techniques. Agricultural and forest meteorology, v. 125, n. 3-4, p. 241-258.

Zeng, X., Xu, X., Zhong, F., Xu, T., Luo, W., Yi, R., & Li, X. (2022) Use of gravimetric measurements to calibrate thermal dissipation probes with stem segments. Hydrological Processes, v. 36, n. 1, p. e14478.

4 CONCLUSÕES

A viabilidade do sensor de fluxo de seiva xilemática foi comprovada por meio de calibração experimental em laboratório e teste em casa de vegetação. Inicialmente, a sensibilidade analítica foi determinada correlacionando o fluxo de água, medido gravimetricamente, ao sinal gerado pelo sensor em um tubo de papel e em ramos de videira, manga e café. A configuração detalhada da calibração encontra-se ilustrada na Figura 2 do Artigo 1. Durante os ensaios, a água percorreu o tubo e os diferentes materiais vegetais, com o fluxo de massa controlado por uma câmara de pressão. A calibração foi conduzida em uma faixa de fluxo de massa variando de 0 a $200 \mu\text{m s}^{-1}$. Segundo Jones et al. (2020), os estudos de calibração em laboratório representam o melhor teste da precisão dos sensores; no entanto, esses experimentos são realizados em segmentos de plantas cortadas, o que pode gerar efeitos no fluxo distintos daqueles observados em condições de campo.

O resultados obtidos demonstraram que calibrações específicas por espécie são necessárias para garantir a precisão das medições do fluxo de seiva. De forma semelhante, Fuchs et al. (2017) também relataram grande variabilidade nos parâmetros de calibração entre diferentes espécies, indicando uma forte dependência das medições de fluxo de seiva em variáveis específicas das espécies e dos caules, como diferenças na morfologia e na anatomia do alburno. Por outro lado, Na Ayuttahaya et al. (2010), avaliando um sensor de fluxo de seiva em três espécies diferentes de plantas: *Hevea brasiliensis* Müll. Arg., *Mangifera indica* L. e *Citrus maxima* Merr. concluíram que uma única calibração era suficiente independente da espécie lenhosa.

As variações observadas na calibração do sensor para as diferentes espécies em parte, foi devido as propriedades anatômicas das plantas, que influenciam diretamente a condução térmica e a convecção. Características como a densidade da madeira, o teor de água, o tamanho e a distribuição dos vasos condutores de seiva, as irregularidades do tecido e a frequência de nós que variam significativamente entre os segmentos do caule e entre espécies. Essa diversidade anatômica representa uma fonte importante de incerteza ao tentar extrapolar os dados para amostras maiores do caule ou aumentar a escala para o nível do povoamento. Além disso, as inconsistências na instalação do sensor, como a precisão no contato entre os resistores e o caule das plantas, o isolamento térmico ou as propriedades da casca, também contribuíram para a variabilidade observada na calibração entre espécies.

Apesar de necessitar de calibração para cada nova espécie que venha a ser utilizado, o novo método de construção e instalação do sensor de fluxo de seiva xilemática apresentado neste estudo supera os principais desafios dos modelos tradicionais e oferece vantagens em relação à maioria dos sensores desenvolvidos anteriormente e disponíveis no mercado. Seu principal diferencial é ser de baixo custo, ser um método não invasivo, isto é, que não provoca danos à planta, e além disso demanda apenas quatro parâmetros medidos ciclo após ciclo para a determinação do fluxo de seiva xilemático.

Tais características tornam o sensor aqui apresentado especialmente relevante diante dos desafios impostos pelas mudanças climáticas, que exigem maior eficiência no uso da água nas áreas agrícolas e praticidade na medida do consumo pelas plantas. Pois, nos sensores que requerem perfuração para instalação, mesmo com o uso de guias personalizados, é praticamente impossível eliminar os erros de desalinhamento, conforme destacado por Ren et al. (2017). Esses erros se agravam com o aumento da profundidade de instalação e podem ser extremamente difíceis de quantificar em condições de campo, comprometendo a precisão na estimativa da transpiração das plantas levando a subestimações da velocidade da seiva entre 20 a 50% (Swanson e Whitfield, 1981; Green et al., 2003; Fuchs et al., 2017; Flo et al., 2019).

O sistema aberto de múltiplas câmaras foi adotado como referência nesse estudo por ser potencialmente mais preciso do que os sensores de fluxo de seiva. Isso se deve ao fato de exigir menos suposições difíceis de validar e permitir a medição direta do vapor de água liberado na transpiração. Por essa razão, os resultados dos sensores foram comparados aos valores obtidos nesse sistema. Neste estudo, as estimativas de transpiração apresentaram grande similaridade com as reportadas em outros trabalhos que utilizaram a mesma metodologia. No entanto, vale destacar que o sistema aberto de múltiplas câmaras pode ser significativamente influenciado por condições ambientais adversas, como chuva, vento forte e condensação dentro dos balões, tornando essencial o monitoramento contínuo das câmaras para garantir medições confiáveis.

A comparação entre os medidores de fluxo de seiva por pulso de calor e o sistema aberto de múltiplas câmaras indicam que a calibração dos sensores de fluxo de seiva é fundamental para obter estimativas mais confiáveis das taxas de transpiração em mudas do clone A1 de café conilon. Esse resultado ficou ainda mais

evidente no segundo estudo, que teve como foco o aprimoramento dos dois sensores testados, onde um deles apresentou estimativas mais consistentes e compatíveis com os valores obtidos pelo sistema de referência.

O sensor de fluxo de seiva desenvolvido mostrou-se sensível na detecção das variações no fluxo e eficiente para a caracterização do estresse hídrico em plantas de café, evidenciando sua robustez como ferramenta de monitoramento do status hídrico da cultura. Este estudo apresenta uma tecnologia emergente e inovadora, trazendo duas linhas de evidências que comprovam o potencial do sensor como uma alternativa promissora para a quantificação do fluxo de seiva em plantios de café. Os resultados abrem caminho para o uso de sensores mais acessíveis e eficazes no manejo hídrico da cafeicultura, contribuindo para a sustentabilidade e o aumento da eficiência produtiva no setor.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abic. (2009) Café uma bebida natural e saudável. Disponível em: <<http://www.abic.com.br/publique/cgi/cgilua.exe/sys/start.htm?sid=279>>. Acesso em: 18 jan. 2022.
- Almeida, C.A.B. (2012) Transpiração em Coffea canephora: lisimetria, fluxo de seiva e balanço hídrico.
- Ayalew, B., Hylander, K., Zewdie, B., Shimales, T., Adugna, G., Mendesil, E., ... & Tack, A. J. (2022) The impact of shade tree species identity on coffee pests and diseases. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, v. 340, p. 108152.
- Balaram, S. S., & Srinivasan, V. (2024) Noise-induced errors in heat pulse-based sap flow measurement methods. *Agricultural and Forest Meteorology*, v. 350, p. 109988.
- Baldocchi, D. (2014) Measuring fluxes of trace gases and energy between ecosystems and the atmosphere—the state and future of the eddy covariance method. *Global change biology*, v. 20, n. 12, p. 3600-3609.
- Bracken, P., Burgess, P. J., & Girkin, N. T. (2023) Opportunities for enhancing the climate resilience of coffee production through improved crop, soil and water management. *Agroecology and Sustainable Food Systems*, v. 47, n. 8, p. 1125-1157.
- Beslity, J., Shaw, S. B., Drake, J. E., Fridley, J., Stella, J. C., Stark, J., & Singh, K. (2022) A low cost, low power sap flux device for distributed and intensive monitoring of tree transpiration. *HardwareX*, v. 12, p. e00351.
- Bongase, E. D. (2017) Impacts of climate change on global coffee production industry. *African Journal of Agricultural Research*, v. 12, n. 19, p. 1607-1611.
- Burgess, S. S., Adams, M. A., Turner, N. C., Beverly, C. R., Ong, C. K., Khan, A. A., & Bleby, T. M. (2001) An improved heat pulse method to measure low and reverse rates of sap flow in woody plants. *Tree physiology*, v. 21, n. 9, p. 589-598.

Bhusal, N., Han, S. G., & Yoon, T. M. (2019) Impact of drought stress on photosynthetic response, leaf water potential, and stem sap flow in two cultivars of bi-leader apple trees (*Malus× domestica* Borkh.). *Scientia Horticulturae*, v. 246, p. 535-543.

Camargo, M. B. P. D. (2010) The impact of climatic variability and climate change on arabic coffee crop in Brazil. *Bragantia*, v. 69, p. 239-247.

Cecafé. (2020) Conselho dos exportadores de café do brasil. Produção. Disponível em:<<https://www.cecafe.com.br/sobre-o-afe/producao>>; Acesso em: 13 jan. 2022.

Conab (2022) Acompanhamento da safra brasileira. Disponível em: <<https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/cafe>>. Acesso em: 20 jan. 2022.

Davis, A. P., Gole, T. W., Baena, S., & Moat, J. (2012) The impact of climate change on indigenous arabica coffee (*Coffea arabica*): predicting future trends and identifying priorities. *PloS one*, v. 7, n. 11, p. e47981.

DaMatta, Fábio M. (2018) Coffee tree growth and environmental acclimation. In: Achieving sustainable cultivation of coffee. Burleigh Dodds Science, p. 39-66.

DaMatta, F. M., Avila, R. T., Cardoso, A. A., Martins, S. C., & Ramalho, J. C. (2018) Physiological and agronomic performance of the coffee crop in the context of climate change and global warming: A review. *Journal of agricultural and food chemistry*, v. 66, n. 21, p. 5264-5274.

DaMatta, F. M., Avila, R. T., Cardoso, A. A., Martins, S. C., & Ramalho, J. C. de Sousa, J. W., Ribeiro, M. J., & de Souza, M. L. A. (2022) Balanço hídrico para o cultivo do café (*coffea canephora*) nos municípios de rio branco, tarauacá e cruzeiro do sul, acre. *irriga*, v. 27, n. 1, p. 92-110.

DaMatta, F. M., & Ramalho, J. D. C. (2006) Impacts of drought and temperature stress on coffee physiology and production: a review. *Brazilian journal of plant physiology*, v. 18, p. 55-81.

Da Mota, R. P. D., Ferraz-Almeida, R., Camargo, R. D., Franco, M. H. R., Delvaux, J. C., & Lana, R. M. Q. (2023) Organomineral fertilizer in coffee plant (*Coffea arabica* L.): Fertilizer levels and application times.

De Abreu, D.P.; Roda, N.M.; De Abreu, G.P.; Benardo, W.P.; Rodrigues, W.P.; Campostrini, E.; Rakocevic, M. (2022) Kaolin Film Increases Gas Exchange Parameters of Coffee Seedlings During Transference From Nursery to Full Sunlight. *Frontiers in Plant Science*, v.12.

Delgado Rojas, Juan Sinforiano. (2003) Avaliação do uso do fluxo de seiva e da variação do diâmetro do caule e de ramos na determinação das condições hídricas de citros, como base para o manejo de irrigação. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

Dias, C. G., Martins, F. B., & Martins, M. A. (2024) Climate risks and vulnerabilities of the Arabica coffee in Brazil under current and future climates considering new CMIP6 models. *Science of The Total Environment*, v. 907, p. 167753.

DIX, Mackenzie J.; AUBREY, Doug P. (2021) Calibration approach and range of observed sap flow influences transpiration estimates from thermal dissipation sensors. *Agricultural and Forest Meteorology*, v. 307, p. 108534.

Fontes, D. R., de Paula Ribeiro, A., dos Reis, M. R., Inoue, M. H., & Mendes, K. F. (2022) Integrated weed management in coffee for sustainable agriculture—A practical brazilian approach. In: *New insights in herbicide science*. IntechOpen.

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*, v. 244, p. 151-161.

Gabuya, A. Q., Mangubat, F. N., Patindol, V. H., Paglinawan, J. M., & Catubis, K. M. L. (2024) Improved growth of coffee seedlings (*Coffea canephora*) under SMART irrigation system. *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences*, v. 23, n. 2, p. 103-111.

GALOTE, J.K.B. (2021) Sistema de aquisição de dados e medição de fluxo de seiva para estimativa de transpiração em plantas. Tese de Doutorado.

González, B. C.; Díaz, P. A.; Espinosa, R. R.; Alonso, M. G. M.; Nuñez, V. R. (2015) Influence of rainfall on the yield of *Coffea canephora* Pierre ex Froehner cultivated in cambisol soils of the eastern region of Cuba. *Cultivos Tropicales*, v.36, p.21-27.

Granier, A. (1987) Evaluation of transpiration in a Douglas-fir stand by means of sap flow measurements. *Tree physiology*, v. 3, n. 4, p. 309-320.

Haggar, J., & Schepp, K. (2012) Coffee and climate change. Impacts and options for adaption in Brazil, Guatemala, Tanzania and Vietnam. *Climate Change, Agriculture and Natural Resource*, v. 4.

Hatton, T. J., Moore, S. J., & Reece, P. H. (1995) Estimating stand transpiration in a *Eucalyptus populnea* woodland with the heat pulse method: measurement errors and sampling strategies. *Tree physiology*, v. 15, n. 4, p. 219-227.

Hernandez-Aguilera, J. N., Conrad, J. M., Gómez, M. I., & Rodewald, A. D. (2019) The economics and ecology of shade-grown coffee: A model to incentivize shade and bird conservation. *Ecological Economics*, v. 159, p. 110-121.

Huber, B. (1932) Beobachtung und Messung pflanzlicher Saftstrome. *Ber. deutsch. Bot. Ges.*, v. 50, p. 89-109.

Humphries, U. W., Waqas, M., Hlaing, P. T., Wangwongchai, A., & Dechpichai, P. (2024) Determination of crop water requirements and potential evapotranspiration for sustainable coffee farming in response to future climate change scenarios. *Smart Agricultural Technology*, v. 8, p. 100435.

IBGE. (2018) Censo Agropecuário 2017. Disponível em: <<https://sidra.ibge.gov.br/home/lspa/brasil>>. Acessado em: 25 de jan. 2022.

International Coffee Organization. Historical Data on the Global Coffee Trade. (2016) Available online: Disponivel em: <http://www.ico.org/new_historical.asp>. Acesso em 20 jan, 2022.

International Coffee Organization (ICO), Coffee Market Report - May (2021) Disponivel em:< <http://www.ico.org/documents/cy2020-21/cmr-0521-e.pdf>>. Acesso em: 25 de mar de 2025.

José, J. V., Pereira, L. B., Souza, M. D., Leite, K. N., Santos, O. N., & Santos, L. C. (2024) Water requirement satisfaction index for coffee (*Coffea canephora*) crops in Western Amazon. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 29, n. 1, p. e281191.

Kath, J., Byrareddy, V. M., Reardon-Smith, K., & Mushtaq, S. (2023) Early flowering changes robusta coffee yield responses to climate stress and management. *Science of the Total Environment*, v. 856, p. 158836.

Kim, W., Izumi, T., & Nishimori, M. (2019) Global patterns of crop production losses associated with droughts from 1983 to 2009. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, v. 58, n. 6, p. 1233-1244.

Kool, D., Agam, N., Lazarovitch, N., Heitman, J. L., Sauer, T. J., & Ben-Gal, A. (2014) A review of approaches for evapotranspiration partitioning. *Agricultural and forest meteorology*, v. 184, p. 56-70.

Koutouleas, A., Sarzynski, T., Bordeaux, M., Bosselmann, A. S., Campa, C., Etienne, H., ... & Ræbild, A. (2022) Shaded-coffee: A nature-based strategy for coffee production under climate change? A review. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, v. 6, p. 877476.

Kruger, D.I. (2007) Coffee production effects on child labor and schooling in rural Brazil. J. Dev. Econ, v.82, p. 448-463.

Kusumah, J., Gonzalez de Mejia, E. (2022) Coffee constituents with antiadipogenic and antidiabetic potentials: A narrative review. Food and Chemical Toxicology.

Liebhard, G., Klik, A., Stumpp, C., & Nolz, R. (2022) Partitioning evapotranspiration using water stable isotopes and information from lysimeter experiments. Hydrological Sciences Journal, v. 67, n. 4, p. 646-661.

Liu, X., Liu, W., Tang, Q., Liu, B., Wada, Y., & Yang, H. (2022) Global agricultural water scarcity assessment incorporating blue and green water availability under future climate change. Earth's Future, v. 10, n. 4, p. e2021EF002567.

Magrach, A., & Ghazoul, J. (2015) Climate and pest-driven geographic shifts in global coffee production: Implications for forest cover, biodiversity and carbon storage. PloS one, v. 10, n. 7, p. e0133071.

Mancha, L. A., Uriarte, D., & Prieto, M. D. H. (2021) Characterization of the transpiration of a vineyard under different irrigation strategies using sap flow sensors. Water, v. 13, n. 20, p. 2867.

Maskell, G.; Chemura, A.; NGUEYN, H.; Gornott, G.; Mondal, P. (2021) Integration of Sentinel optical and radar data for mapping smallholder coffee production systems in Vietnam. Remote Sensing of Environment , 266.

Martinez, C.L.M.; Saari, J.; Melo, Y.; Cardoso, M.; Almeida, C.M.; Vakkilainen, E. (2021) Avaliação de rotas termoquímicas para valorização de resíduos sólidos de café para produção de biocombustíveis: um caso brasileiro. Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 137.

Marin, F. R., Ribeiro, R. V., Angelocci, L. R., & Righi, E. Z. (2008) Fluxo de seiva pelo método do balanço de calor: base teórica, qualidade das medidas e aspectos práticos. Bragantia, v. 67, p. 1-14, 2008.

Marraccini, P., Vinecky, F., Alves, G. S., Ramos, H. J., Elbelt, S., Vieira, N. G., ... & Andrade, A. C. (2012) Differentially expressed genes and proteins upon drought acclimation in tolerant and sensitive genotypes of Coffea canephora. *Journal of experimental botany*, v. 63, n. 11, p. 4191-4212.

MARSHALL, D. C. (1958) Measurement of sap flow in conifers by heat transport. *Plant physiology*, v. 33, n. 6, p. 385.

Miner, G. L., Ham, J. M., & Kluitenberg, G. J. (2017) A heat-pulse method for measuring sap flow in corn and sunflower using 3D-printed sensor bodies and low-cost electronics. *Agricultural and Forest Meteorology*, v. 246, p. 86-97.

Moat, J., Williams, J., Baena, S., Wilkinson, T., Gole, T. W., Challa, Z. K., ... & Davis, A. P. (2017) Resilience potential of the Ethiopian coffee sector under climate change. *Nature plants*, v. 3, n. 7, p. 1-14, 2017.

Murthy, P.S.; Naidu, M. (2012) Sustainable management of coffee industry by-products and value addition - a review. *Resour Conserv Recycl*, v.66, p.45–58.

Nakano, Y., & Iwasaki, N. (2019) Determination of phloem sap flow rate using a combination of the heat balance method and girdling in citrus. *Agricultural and Forest Meteorology*, v. 278, p. 107669.

Nunes, F. L., Camargo, M. B. P. D., Fazuoli, L. C., Rolim, G. D. S., & Pezzopane, J. R. M. (2010) Modelos agrometeorológicos de estimativa da duração do estádio floração-maturação para três cultivares de café arábica. *Bragantia*, v. 69, p. 1011-1018.

Oliveira, I.P.; Oliveira, L.C.; De Moura, C.S.F.T. (2012) Cultura de café: histórico, classificação botânica e fases de crescimento. *Revista Faculdade Montes Belos*, v. 5, n. 4.

O'Neill, B. C., Oppenheimer, M., Warren, R., Hallegatte, S., Kopp, R. E., Pörtner, H. O., ... & Yohe, G. (2017) IPCC reasons for concern regarding climate change risks. *Nature Climate Change*, v. 7, n. 1, p. 28-37.

Ovalle-Rivera, O., Läderach, P., Bunn, C., Obersteiner, M., & Schroth, G. (2015) Projected shifts in Coffea arabica suitability among major global producing regions due to climate change. *PloS one*, v. 10, n. 4, p. e0124155.

Petrík, P., Zavadilová, I., Šigut, L., Kowalska, N., Petek-Petrik, A., Szatniewska, J., ... & Pavelka, M. (2022) Impact of environmental conditions and seasonality on ecosystem transpiration and evapotranspiration partitioning (T/ET ratio) of pure European beech forest. *Water*, v. 14, n. 19, p. 3015.

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*, v. 36, n. 12, p. 1449-1455.

Peters, R. L., Fonti, P., Frank, D. C., Poyatos, R., Pappas, C., Kahmen, A., ... & Steppe, K. (2018) Quantification of uncertainties in conifer sap flow measured with the thermal dissipation method. *New Phytologist*, v. 219, n. 4, p. 1283-1299.

Pinto, F.A.P. (2017) Enraizamento de estacas de Coffea arabica L. em sistema hidropônico. Dissertação 2017. 48 p. Dissertação (Mestrado em Fitotecnia) – Universidade Federal de Lavras, Lavras.

Rana, G., De Lorenzi, F., Palatella, L., Martinelli, N., & Ferrara, R. M. (2019) Field scale recalibration of the sap flow thermal dissipation method in a Mediterranean vineyard. *Agricultural and Forest Meteorology*, v. 269, p. 169-179.

Raza, A., Razzaq, A., Mehmood, S. S., Zou, X., Zhang, X., Lv, Y., & Xu, J. (2019) Impact of climate change on crops adaptation and strategies to tackle its outcome: A review. *Plants*, v. 8, n. 2, p. 34.

Ren, R., Fu, H., Si, B., Kinar, N. J., & Steppe. (2022) An in situ real time probe

spacing correction method for multi-needle heat pulse sap flow sensors. Agricultural and Forest Meteorology, v. 314, p. 108776.

Ren, R., Liu, G., Wen, M., Horton, R., Li, B., & Si, B. (2017) The effects of probe misalignment on sap flux density measurements and in situ probe spacing correction methods. Agricultural and Forest Meteorology, v. 232, p. 176-185.

Rodrigues, W.P., Freitas, S.D.J., Vieira, H.D., Cavalcanti Filho, P.F.M., Almeida, M.L.L. (2012) Produtividade de Coffea canephora na região noroeste Fluminense do estado do Rio de Janeiro. Anais do 38º Congresso Brasileiro de Pesquisas Cafeeiras – CBPC, 38, Caxambu: SBPC, 1, p.1-2.

Rodrigues, H.I.; Dias, F.D.; Teixeira, N.C. (2015) A Origem do Café no Brasil: A Semente Que Veio Para Ficar. Revista Pensar Gastronomia, v.1, n.2.

Silva, P. C. D., Junior, W. Q. R., Ramos, M. L. G., Rocha, O. C., Veiga, A. D., Silva, N. H., ... & Vinson, C. C. (2022) Physiological changes of Arabica coffee under different intensities and durations of water stress in the Brazilian Cerrado. Plants, v. 11, n. 17, p. 2198.

Soares, L. D. S., Rezende, T. T., Beijo, L. A., & Franco Júnior, K. S. (2021) Interaction between climate, flowering and production of dry coffee (*Coffea arabica* L.) in Minas Gerais.

Souza, T. L., de Oliveira, D. P., Santos, C. F., Reis, T. H. P., Cabral, J. P. C., da Silva Resende, É. R., ... & Guelfi, D. (2023) Nitrogen fertilizer technologies: Opportunities to improve nutrient use efficiency towards sustainable coffee production systems. Agriculture, Ecosystems & Environment, v. 345, p. 108317.

Smith, D. M., & Allen, S. J. (1996) Measurement of sap flow in plant stems. Journal of experimental Botany, v. 47, n. 12, p. 1833-1844.

Steppe, K., De Pauw, D. J., Doody, T. M., & Teskey, R. O. (2010) A comparison of sap flux density using thermal dissipation, heat pulse velocity and heat field deformation methods. *Agricultural and Forest Meteorology*, v. 150, n. 7-8, p. 1046-1056.

Sun, X., Li, J., Cameron, D., & Moore, G. (2022) Sap flow monitoring of two Australian native tree species in a suburban setting: implications for tree selection and management. *Plant Science*, v. 317, p. 111194.

Swanson, R. H., & Whitfield, D. W. A. (1981) A numerical analysis of heat pulse velocity theory and practice. *Journal of experimental botany*, v. 32, n. 1, p. 221-239.

Tanaka, R., Chiu, C. W., Gomi, T., Matsuda, K., Izuta, T., & Watanabe, M. (2023) Stomatal ozone uptake of a *Quercus serrata* stand based on sap flow measurements with calibrated thermal dissipation sensors. *Science of The Total Environment*, v. 888, p. 164005.

Tran, L. Q. (2024) Impact of climate change on irrigation water requirements for coffee plants in the fruit development stage: a case study of Dak Lak and Gia Lai provinces in the Central Highlands of Vietnam. *Water Supply*, v. 24, n. 1, p. 290-311.

Usda. (2021) Coffee: World Markets and Trade. Disponível em: <<https://apps.fas.usda.gov/psdonline/circulars/coffee.pdf>>. Acesso em: 18 jan, 2022.

Vandegehuchte, M. W., & Steppe, K. (2013) Corrigendum to: Sap-flux density measurement methods: working principles and applicability. *Functional Plant Biology*, v. 40, n. 10, p. 1088-1088.

Vandegehuchte, M. W., & Steppe, K. (2012) Sapflow+: a four-needle heat-pulse sap flow sensor enabling nonempirical sap flux density and water content measurements. *New Phytologist*, v. 196, n. 1, p. 306-317.

Vegro, C.L.R.; Almeida, L.F. (2020) Global coffee market: Socio-economic and cultural dynamics. In Woodhead Publishing Series in Consumer Sci & Strat Market, *Coffee Consumption and Industry Strategies in Brazil*, Woodhead Publishing, p. 3 –

19.

Venancio, L. P., Filgueiras, R., Mantovani, E. C., do Amaral, C. H., da Cunha, F. F., dos Santos Silva, F. C., ... & Cavatte, P. C. (2020) Impact of drought associated with high temperatures on Coffea canephora plantations: a case study in Espírito Santo State, Brazil. *Scientific Reports*, v. 10, n. 1, p. 19719.

VENTURIN, Afonso Zucolotto et al. Using a crop water stress index based on a sap flow method to estimate water status in conilon coffee plants. **Agricultural water management**, v. 241, p. 106343, 2020.

Verdin Filho, A. C., Volpi, P. S., Ferrão, M. A. G., Ferrão, R. G., Mauri, A. L., Fonseca, A. F. A. D., ... & Andrade Júnior, S. D. (2016) New management technology for arabica coffee: the cyclic pruning program for arabica coffee.

Volsi, B.; Telles, T.S.; Caldarelli, C.E.; Camara, M.R.G. (2019) The dynamics of coffee production in Brazil. *PLoS ONE*, v14, n.7.

Xiao, W., Wei, Z., & Wen, X. (2018) Evapotranspiration partitioning at the ecosystem scale using the stable isotope method—A review. *Agricultural and Forest Meteorology*, v. 263, p. 346-361.

Yilmaz, B.; Acar-tek.; Sozlu, S. (2017) Turkish cultural heritage: a cup of coffee. *Journal of Ethnic Foods*, v.4, p. 213-220.

Zhang, Q., Cui, N., Feng, Y., Gong, D., & Hu, X. (2018) Improvement of Makkink model for reference evapotranspiration estimation using temperature data in Northwest China. *Journal of Hydrology*, v. 566, p. 264-273.