

DESENVOLVIMENTO DE SOLUÇÃO INTEGRADA PARA AUXÍLIO  
NO USO DA CÂMARA DE PRESSÃO DE SCHOLANDER EM  
MEDIDAS DE POTENCIAL HÍDRICO FOLIAR

**SILVIO JOSÉ TRINDADE ALVIM**

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO NORTE FLUMINENSE  
DARCY RIBEIRO

CAMPOS DOS GOYTACAZES - RJ  
JUNHO – 2021



DESENVOLVIMENTO DE SOLUÇÃO INTEGRADA PARA AUXÍLIO  
NO USO DA CÂMARA DE PRESSÃO DE SCHOLANDER EM  
MEDIDAS DE POTENCIAL HÍDRICO FOLIAR

**SILVIO JOSÉ TRINDADE ALVIM**

“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  
JUNHO – 2021

**FICHA CATALOGRÁFICA**

UENF - Bibliotecas

Elaborada com os dados fornecidos pelo autor.

A475 Alvim, Silvio José Trindade.

DESENVOLVIMENTO DE SOLUÇÃO INTEGRADA PARA AUXÍLIO NO USO DA CÂMARA DE PRESSÃO DE SCHOLANDER EM MEDIDAS DE POTENCIAL HÍDRICO FOLIAR / Silvio José Trindade Alvim. - Campos dos Goytacazes, RJ, 2021.

162 f. : il.  
Inclui bibliografia.

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

1. Câmara de Pressão de Scholander. 2. Potencial Hídrico Foliar. 3. Irrigação. 4. Desenvolvimento de Software. 5. Inteligência Artificial. I. Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro. II. Título.

CDD - 630

DESENVOLVIMENTO DE SOLUÇÃO INTEGRADA PARA AUXÍLIO  
NO USO DA CÂMARA DE PRESSÃO DE SCHOLANDER EM  
MEDIDAS DE POTENCIAL HÍDRICO FOLIAR

**SILVIO JOSÉ TRINDADE ALVIM**

“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 25 de junho de 2021

Comissão Examinadora:

---

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

---

Prof. Ricardo Enrique Bressan-Smith (D.Sc., Produção Vegetal) – UENF

---

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

---

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

A todos que tiveram suas vidas  
e sonhos interrompidos pela pandemia  
da Covid-19 no Brasil.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço a todos que contribuíram para este momento, de forma direta ou indireta. Embora seja difícil nominar todos, há uma obrigação clara de citar os mais próximos.

Agradeço a minha esposa Liliane e aos meus filhos Beatriz e Bernardo, pelo apoio incondicional a todo instante. Amor total.

Agradeço aos colegas de doutorado, principalmente aos companheiros Flávio Pavesi e Deusélio, as frutas feias.

Agradeço a todos os professores do programa, que nos engrandeceram com seus conhecimentos e experiências, em especial nas figuras do prof. Almy Junior e da profa. Daniela Barros, nossos coordenadores, e dos professores Eliemar Campostrini, Ricardo E. Bressan-Smith, Claudinei Guimarães, Ricardo Garcia, Cláudio Marciano e Henrique Duarte, que estiveram presentes em momentos importantes dessa jornada.

Agradeço ao Ifes Campus Piúma, pela liberação para a conclusão dessa importante etapa da minha formação.

Agradeço aos colegas do LEAG pelo apoio nos experimentos: Jéssica, Jean, Baroni e Guilherme.

Agradeço ao prof. Kenneth A. Shackel, da UC Davis, pelos valiosos conselhos e direcionamentos.

Agradeço especialmente ao prof. Elias Fernandes, meu orientador, que com paciência, humanidade e brilhantismo, soube me dar os elementos

necessários para a conclusão desse trabalho. Mais que um orientador, um grande amigo!

Agradeço à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) – Brasil – código de financiamento 001 pela concessão de bolsa de estudos, necessária à conclusão deste curso.

## SUMÁRIO

RESUMO.....	viii
ABSTRACT .....	x
1. INTRODUÇÃO .....	1
2. REVISÃO DE LITERATURA.....	3
2.1. Potencial hídrico.....	3
2.2. Câmara de Pressão de Scholander.....	7
2.2.1. Identificação do <i>endpoint</i> .....	13
2.2.2. O efeito “operador” .....	15
2.2.3. Impacto do corte do pecíolo .....	17
2.2.4. Impacto do tempo de amostragem .....	18
2.2.5. Impacto das condições de amostragem .....	20
2.2.6. Impacto da taxa de aumento da pressão.....	21
2.2.7. Impacto do tipo de planta .....	22
2.2.8. Problemas de segurança.....	23
2.3. Fluxo de Seiva.....	25
2.3.1. Pulso de calor .....	27
2.3.2. Dissipação de calor .....	30
2.3.3. Balanço de calor .....	32
2.3.4. Deformação no campo de calor .....	35

2.3.5.	Método dos elementos finitos (MEF) .....	36
2.4.	Desenvolvimento de Software .....	38
2.4.1.	Desenvolvimento de Aplicações Móveis.....	38
2.4.2.	Avaliação de Software.....	41
2.4.3.	SUS – System Usability Scale .....	42
2.4.4.	NPS – Net Promoter Score .....	44
3.	TRABALHOS.....	45
3.1	DESENVOLVIMENTO DE SOLUÇÃO INTEGRADA PARA AUXÍLIO NO USO DA CÂMARA DE PRESSÃO DE SCHOLANDER EM MEDIDAS DE POTENCIAL HÍDRICO FOLIAR.....	45
	RESUMO .....	45
	ABSTRACT .....	46
	INTRODUÇÃO.....	47
	MATERIAL E MÉTODOS .....	49
	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	58
	RESUMOS E CONCLUSÕES.....	61
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	63
3.2	APLICAÇÃO DE ESTRATÉGIAS DE INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL EM ESTUDOS DE MANEJO DA IRRIGAÇÃO: UMA REVISÃO SISTEMÁTICA .....	65
	RESUMO .....	65
	ABSTRACT .....	66
	INTRODUÇÃO.....	66
	REVISÃO SISTEMÁTICA DE LITERATURA .....	71
	METODOLOGIA E PROTOCOLO DE REVISÃO .....	72
	RESULTADOS DA RSL E CONSIDERAÇÕES SOBRE OS ESTUDOS PRIMÁRIOS .....	75
	CONCLUSÃO .....	88
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	90
3.3	MOVIMENTO DO FLUXO XILEMÁTICO DURANTE PRESSURIZAÇÃO NA CÂMARA DE SCHOLANDER: MODELAGEM COMPUTACIONAL E ABORDAGEM EXPERIMENTAL .....	97

RESUMO .....	97
ABSTRACT .....	98
INTRODUÇÃO.....	99
MATERIAL E MÉTODOS .....	103
RESULTADOS.....	109
DISCUSSÃO.....	118
RESUMO E CONCLUSÕES .....	122
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	123
4. RESUMOS E CONCLUSÕES .....	126
4.1. DESENVOLVIMENTO DE SOLUÇÃO INTEGRADA PARA AUXÍLIO NO USO DA CÂMARA DE PRESSÃO DE SCHOLANDER EM MEDIDAS DE POTENCIAL HÍDRICO FOLIAR.....	126
4.2. APLICAÇÃO DE ESTRATÉGIAS DE INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL EM ESTUDOS DE MANEJO DA IRRIGAÇÃO: UMA REVISÃO SISTEMÁTICA ...	128
4.3. MOVIMENTO DO FLUXO XILEMÁTICO DURANTE PRESSURIZAÇÃO NA CÂMARA DE SCHOLANDER: MODELAGEM COMPUTACIONAL E ABORDAGEM EXPERIMENTAL .....	129
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	131
APÊNDICES.....	139

## RESUMO

ALVIM, Silvio José Trindade, D.Sc., Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, junho de 2021. Desenvolvimento de Solução Integrada para Auxílio no Uso da Câmara de Pressão de Scholander em Medidas de Potencial Hídrico Foliar. Orientador: Prof. Dr. Elias Fernandes de Sousa.

Para prover um manejo efetivo da irrigação, torna-se importante avaliar o potencial hídrico da planta e ajustar o regime de uso da água. Uma das formas de avaliar é com a câmara de pressão de Scholander, comprimindo o tecido foliar para verificar a pressão necessária para circular a água no xilema. Nessa tese apresentar-se-á três trabalhos, baseados nas pesquisas com a câmara de pressão e potencial hídrico foliar. O primeiro trabalho consistiu no desenvolvimento de uma solução integrada para minimizar os erros associados ao procedimento de identificação do *endpoint* com a câmara. Foi desenvolvido uma solução integrada para adaptar a câmaras de pressão, para registrar o processo por meio de gravação de vídeo, com o registro da pressão e outros sensores. Foi adaptado um transdutor de pressão, desenvolvido um suporte para câmera, um coletor de dados e um software para dispositivo móvel. O hardware comunica-se com o aplicativo móvel desenvolvido, que recebe as informações do coletor de dados por *bluetooth* e as imagens da câmera por USB. O conjunto se mostrou adequado e confiável. O custo de montagem demonstra também sua viabilidade econômica. O aplicativo foi avaliado quanto à usabilidade e eficiência, atingindo 90,31 pontos na métrica SUS (*System Usability Scale*) e 86 na NPS (*Net Promoter Score*). O segundo trabalho deriva de uma sugestão de continuidade do primeiro, para uso de Inteligência Artificial (IA).

Trata-se de uma revisão para analisar o cenário da adoção de estratégias de IA no gerenciamento de irrigação e no uso de dados de sensores, usando a técnica de Revisão Sistemática da Literatura (RSL), com critérios explícitos de busca. Mais de 45 mil títulos em 130 bases de referência foram consultados de uma só vez e foram selecionados 38 estudos primários. Nota-se a predominância de estratégias baseadas em aprendizado de máquina, principalmente em redes neurais artificiais (RNA). Entre os dados mais utilizados para treinamento estão os climáticos e de solo. Abordagens usando lógica *fuzzy* são populares em sistemas de suporte à decisão (SSD). Nota-se o crescimento do uso de aprendizado de máquina com RNA, máquina vetor de suporte (SVM) e florestas aleatórias. Embora haja predominância no uso de redes de sensores sem fio, nota-se uma tendência na adoção de visão computacional baseadas em imagens de sensoriamento remoto. Por fim, o terceiro trabalho trata de uma pesquisa sobre o uso de sensores de fluxo de seiva dentro da câmara de pressão para identificação do movimento de líquido no xilema, na sinalização da pressão de equilíbrio ( $P_B$ ). Foi desenvolvido um modelo de simulação computacional baseado no método dos elementos finitos (MEF) e uma montagem com sensores para validação do modelo e melhor compreensão do fenômeno. Os resultados mostraram que não há defasagem de tempo entre a pressurização e o movimento do fluxo no pecíolo, concluindo que, embora os valores de  $P_B$  obtidos na câmara possam auxiliar no manejo da irrigação, não apresentam uma relação direta com alguma possível tensão negativa do xilema e sim uma correlação com a quantidade de água livre disponível na amostra.

## ABSTRACT

ALVIM, Silvio José Trindade, D.Sc., Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, jun 2021. Development of an Integrated Solution for Aid in the Use of Scholander Pressure Chamber in Foliar Water Potential Measures. Advisor: Prof. Dr. Elias Fernandes de Sousa.

To provide an effective irrigation management, it is important to assess the plant's water potential and adjust the water use regime. One way to assess this is with the Scholander pressure chamber, compressing the leaf tissue to check the pressure needed to circulate the water in the xylem. In this thesis, three works will be presented, based on research with the pressure chamber and leaf water potential. The first work consisted of developing an integrated solution to minimize the errors associated with the endpoint identification procedure with the chamber. An integrated solution was developed to adapt to pressure chambers, to record the process by means of video recording, with pressure recording and other sensors. A pressure transducer was adapted, a camera support, a data logger and a mobile application were developed. The hardware communicates with the developed mobile application, which receives information from the data logger via bluetooth and camera images via USB. The set proved to be adequate and reliable. The assembly cost also demonstrates its economic feasibility. The application was evaluated for usability and efficiency, reaching 90.31 points in the SUS metric (System Usability Scale) and 86 in the NPS (Net Promoter Score). The second work derives from a suggestion of continuity of the first, for the use of Artificial Intelligence (AI). This is a review to analyze the scenario of the adoption of AI strategies in

irrigation management and in the use of sensor data, using the Systematic Literature Review (SLR) technique, with explicit search criteria. More than 45,000 titles in 130 databases were consulted at once and 38 primary studies were selected. There is a predominance of strategies based on machine learning, especially on artificial neural networks (ANN). Among the most used data for training are climate and soil data. Approaches using fuzzy logic are popular in decision support systems (DSS). Note the growth in the use of machine learning with ANN, support vector machine (SVM) and random forests. Although there is a predominance in the use of wireless sensor networks, there is a trend in the adoption of computer vision based on remote sensing images. Finally, the third work deals with a research on the use of sap flow sensors inside the pressure chamber to identify the movement of liquid in the xylem, in signaling balance pressure ( $P_B$ ). A computational simulation model based on the finite element method (FEM) and a sensor assembly were developed to validate the model and better understand the phenomenon. The results showed that there is no time lag between pressurization and petiole flow movement, concluding that, although the  $P_B$  values obtained in the chamber can help in irrigation management, they do not show a direct relationship with any possible negative xylem tension, but a correlation with the amount of free water available in the sample.

## 1. INTRODUÇÃO

O intenso crescimento populacional impõe à humanidade a necessidade de se recorrer a uma grande quantidade de área territorial para utilização na agricultura. Como isso nem sempre é possível, torna-se imperioso que utilizemos as áreas disponíveis com a maior eficiência possível. Essa realidade tem impulsionado o uso da irrigação, tanto para complemento das necessidades hídricas das regiões úmidas quanto no seu uso para tornar as regiões áridas e semiáridas aptas à produção agrícola. A escassez de água para as plantas de interesse agrônômico é uma das maiores limitações para a expansão do cultivo nas áreas agricultáveis no mundo (Reis et al., 2009).

Em algumas culturas a importância da água relaciona-se tanto à falta quanto ao excesso. Como exemplo, no caso específico do mamoeiro a restrição hídrica, além de reduzir o crescimento da planta, favorece a produção de flores masculinas e estéreis reduzindo a produção de frutos. Por outro lado, o excesso de água na região em torno da raiz da planta diminui a aeração e afeta a absorção de nutrientes, aumenta o aparecimento de doenças, além de possibilitar a lixiviação dos nutrientes (Martins e Costa, 2003).

O gerenciamento, ou manejo da irrigação se tornou fundamental nas últimas décadas. Por gerenciar, entende-se determinar quando irrigar, a quantidade de água a ser utilizada em cada estágio de crescimento da planta. O objetivo primário do gerenciamento é o aumento da produtividade sem comprometer o meio ambiente (Cao, 1992).

Em termos práticos, quase toda a água de que as plantas necessitam, é extraída pelo sistema radicular e perdida para a atmosfera por meio do processo de transpiração, sendo necessário que a mesma seja devolvida à planta posteriormente, na forma de precipitação ou irrigação, sob pena de comprometer o desenvolvimento e a produção do cultivo. Portanto, o estudo da evapotranspiração e a estimativa dos coeficientes de cultura são de fundamental importância para o manejo adequado de projetos de irrigação, contribuindo para o aumento da produtividade e otimização do uso da energia elétrica e dos recursos hídricos, cada vez mais valiosos (Montenegro et al., 2004).

Em algumas regiões do Brasil, os recursos hídricos são escassos, requerendo estudos criteriosos para a orientação com relação ao uso mais eficiente da água. A irrigação é a melhor alternativa para contornar o problema da disponibilidade hídrica, visando assegurar o aumento da produtividade, tanto em quantidade como em qualidade dos produtos. Conseguir identificar o estresse hídrico tem-se tornado um fator determinante no manejo de irrigação (Gomide et al., 2002).

Medidas diretas de parâmetros de plantas, como os obtidos através do sensor de fluxo de seiva, com o propósito de caracterizar as suas necessidades hídricas, associadas com algumas medidas agroclimáticas, podem ser a alternativa para um melhor conhecimento da deficiência hídrica das culturas, auxiliando a seleção de genótipos melhor adaptados às condições limitantes de água e o controle de reposição parcial da necessidade hídrica das culturas, onde seria previsto o manejo das irrigações com estresse hídrico (Gomide et al., 2002). O correto manejo da quantidade de água aplicada com a irrigação resulta, além de benefícios para o cultivo em produção, em óbvia economia, uma vez que não serão utilizadas quantidades de água além da necessidade para repor a condição ótima do solo.

O objetivo deste trabalho gira em torno das mensurações do potencial hídrico foliar utilizando-se a câmara de pressão de Scholander, propondo instrumentações, análises e novas abordagens sobre este método, como forma de auxiliar o seu uso em campo e laboratório, aumentando assim a eficiência e acurácia de tais medidas e, conseqüentemente, contribuindo para um melhor manejo de irrigação.

## 2. REVISÃO DE LITERATURA

### 2.1. Potencial hídrico

A água, no sistema solo-planta-atmosfera, busca o tempo todo alcançar o equilíbrio termodinâmico, obedecendo à tendência universal de se mover de locais onde apresenta maior energia para aqueles onde os níveis energéticos são menores (Lacerda et al., 2007). Esse movimento traduz, em parte, o conceito de fluxo de massa (Sakuratani, 1981). Por analogia, imagine a água no alto de uma montanha (maior potencial) que tende, pela ação da gravidade, correr morro abaixo (menor potencial). Considerando a pressão como uma outra grande fonte de energia potencial, é possível, com o aumento da mesma, fazer com que a água se mova para cima, desde que o potencial de energia da água, devido à essa pressão, consiga vencer o potencial dado pela ação da gravidade.

O termo potencial químico é uma expressão quantitativa da energia livre associada a uma solução. Dessa maneira, o potencial químico da água representa a energia livre associada à mesma, já que ela flui espontaneamente, sem a necessidade de se acrescentar energia, de regiões de maior potencial químico para as de menor potencial químico (Zimmermann et al., 2004). O valor absoluto do potencial químico está entre aquelas quantidades que não são de fácil mensuração, sendo mais prático a medida da diferença do potencial químico ( $\Delta\mu_w$ ), usando como referência o potencial da água pura ( $\mu_w^o$ ). Uma vez definida a diferença do potencial químico, é dividida por seu volume molal parcial, ou seja, quantidade de energia por mol (erg/mol), conforme a Equação 1.

$$\Delta\mu_w = \frac{\mu_w - \mu_w^o}{V_w} = \frac{\text{erg}^* \text{ mol}^{-1}}{\text{cm}^3 \text{ mol}^{-1}} = \frac{\text{erg}}{\text{cm}^3} = \frac{\text{dina}^* \text{cm}}{\text{cm}^3} = \text{dina}^* \text{cm}^{-2} \quad (1)$$

Trata-se de uma medida da energia livre da água por unidade de volume. Essas medidas são equivalentes a unidades de pressão, o que permitiu transformar a unidade para pascal, a qual é mais facilmente mensurável. Assim, de acordo com a Equação 2:

$$10^6 \text{ dina}^* \text{ cm}^{-2} = 1 \text{ bar} = 0,987 \text{ atm} = 0,1 \text{ MPa} \quad (2)$$

Ao longo das últimas décadas, os cientistas têm utilizado o parâmetro chamado potencial hídrico, denotado pela letra grega  $\Psi$  (psi), definido abaixo na Equação 3:

$$\Psi_w = \frac{\mu_w - \mu_w^o}{V_w} \quad (3)$$

O potencial hídrico ( $\Psi_w$ ) é expresso em unidades de pressão. Em geral, pode ser influenciado por quatro fatores, composto por alguns componentes específicos, como visto abaixo na Equação 4:

$$\Psi_w = \Psi_p + \Psi_s + \Psi_m + \Psi_g \quad (4)$$

Os termos  $\Psi_p$  (potencial de pressão),  $\Psi_s$  (potencial osmótico),  $\Psi_m$  (potencial mátrico ou matricial) e  $\Psi_g$  (potencial gravitacional) denotam os efeitos de cada uma dessas forças sobre a energia livre da água. O estado de referência ou potencial hídrico padrão foi estabelecido como zero. Dessa maneira, cada um dos componentes podem aumentar ou diminuir o potencial hídrico total, sempre em relação ao estado da água pura, à pressão atmosférica e à mesma temperatura da solução (Boyer, 1995).

O componente mátrico ( $\Psi_m$ ), significativo quando se trata de considerar o potencial hídrico do solo, não interfere significativamente no movimento de água

nos tecidos vegetais, sendo assim minimizado ou desprezado na equação (Amorim, 2013). O mesmo se aplica ao potencial gravitacional ( $\Psi_g$ ), por representar apenas 0,1 MPa a cada 10 metros de altura, o que o torna desprezível para efeitos de cálculo em alturas inferiores a 5 metros. Ainda segundo Amorim (2013), o potencial osmótico, também conhecido como potencial dos solutos ( $\Psi_s$ ), representa os efeitos dos solutos dissolvidos. As moléculas de água são atraídas pelos íons dos solutos, diminuindo o potencial hídrico. Assim, o potencial osmótico tem quase sempre valor negativo, sendo zero quando a água é pura (Lacerda et al., 2007).

Plantas terrestres geralmente tem  $\Psi_w$  negativo, porque  $\Psi_s$  e  $\Psi_m$  são negativos, e  $\Psi_p$  não os compensa totalmente. A água se moverá em direção a um  $\Psi_w$  mais negativo, ou partes mais negativas de  $\Psi_w$ , sendo esse princípio utilizado por elas para retirar água do solo (Boyer, 1995).

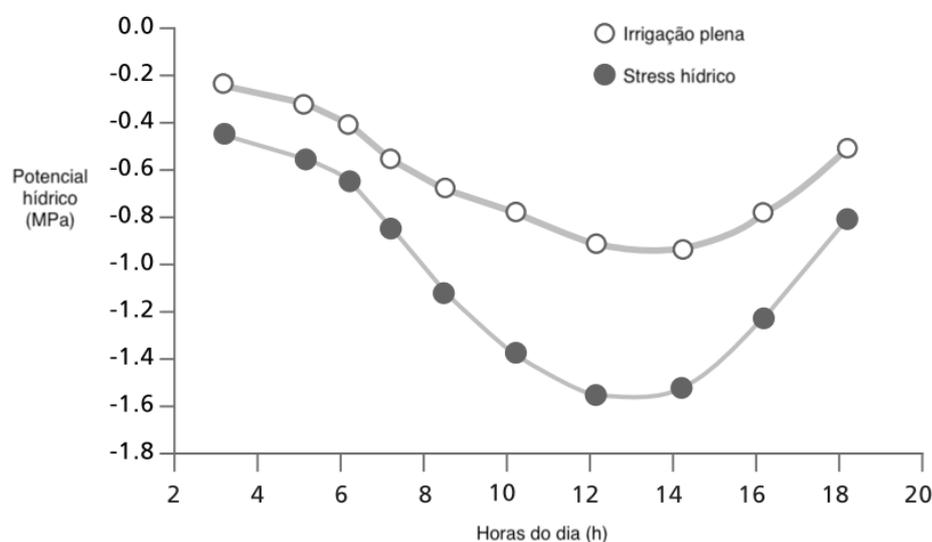
Considerando os componentes do potencial hídrico total em plantas ( $\Psi_w$ ), e desconsiderando os fatores que tem influência desprezível no seu cálculo ( $\Psi_m$  e  $\Psi_g$ ), resta-nos apenas os componentes de pressão e osmótico como relevantes para o cálculo do potencial hídrico, como na Equação 5 a seguir:

$$\Psi_w = \Psi_p + \Psi_s \quad (5)$$

O crescimento das células vegetais, a fotossíntese e a produtividade das culturas são fortemente afetadas pelo potencial hídrico, de modo que os cientistas têm trabalhado fortemente ao longo das últimas décadas no intuito de desenvolver métodos confiáveis para a avaliação do status hídrico das plantas. Embora os instrumentos baseados no solo forneçam informações sobre os níveis de umidade do solo próximos à zona da raiz da planta, as medidas aferidas na própria planta tendem a ser os melhores indicadores de seu estado de água. Apesar da grande quantidade de pesquisas desenvolvidas na área de medidas de potencial hídrico nas plantas e seu impacto nos processos fisiológicos, menor avanço se conseguiu no desenvolvimento de protocolos específicos para o uso dessas medições nas atividades de manejo de irrigação (Steduto et al., 2012) ou mesmo na adoção de estratégias de irrigação com déficit hídrico controlado (Berilli, 2017). A principal dificuldade está relacionada à natureza dinâmica da água nas plantas, que é afetada tanto pelo estado da água do solo quanto pelo ambiente atmosférico. O potencial hídrico nas plantas muda muito ao longo de um dia, gerando grandes

dificuldades para uso prático. Ainda segundo Steduto et al. (2012), as medidas tomadas de potencial hídrico das plantas precisam ser comparadas com medidas equivalentes representativas de plantas totalmente irrigadas no mesmo ambiente. Isso pode ser realizado através do desenvolvimento de valores de referência, representando o comportamento das plantas sob condições não limitantes da água do solo, que podem ser usadas para normalizar as medições de potencial hídrico da planta.

O potencial hídrico da planta varia muito em resposta à demanda atmosférica e aos níveis de água no solo, mas mesmo com o solo mantendo um nível alto de água, o potencial medido na planta varia bastante, diminuindo desde o amanhecer até o meio-dia, nos dias mais claros. Conforme mostrado na figura 1, O período entre o meio-dia até 14 horas geralmente representa o mínimo do dia, em termos de potencial, e o valor máximo é aquele medido antes do amanhecer, onde estima-se que os teores de água da planta e do solo estejam próximo ao equilíbrio, uma vez que nenhuma transpiração através dos estômatos deve ocorrer a noite (Steduto et al., 2012).



**Figura 1:** Evolução diurna do potencial hídrico em pessegueiros. Fonte: Steduto et al. (2012), adaptado pelo autor.

## 2.2. Câmara de Pressão de Scholander

A técnica da utilização da câmara de pressão para medidas de potencial hídrico, largamente utilizada nos dias de hoje para avaliação de culturas vegetais de grande interesse comercial, remonta ao ano de 1914, no trabalho de Henry Dixon (Turner, 1988). Talvez devido à natureza insegura dos recipientes de pressão de vidro utilizados naquele tempo, seu método inovador para medir o estado da água na planta permaneceu sem uso por meio século até ser popularizado, quando um grupo de cientistas liderados por Per Fredrik Scholander, um sueco que se naturalizou americano, retomaram as pesquisas demonstrando que a pressão hidrostática negativa poderia ser medida em plantas (Scholander et al., 1965).

A câmara de pressão de Scholander (também conhecida como bomba de Scholander, ou câmara de Scholander-Hammel) é um dos dispositivos mais utilizados para mensuração da condição hídrica de plantas (Yang et al., 2016). Ela vem sendo utilizada amplamente em milhares de artigos por cientistas que atuam na área de plantas, desde fisiologistas a ecologistas, embora não tenha sido aceita, de início, como um método de alta acurácia, principalmente por conta da boa aceitação dos métodos que utilizavam psicrômetros de termopar, introduzidos anteriormente, que se tornaram o padrão utilizado naquele período e por vários anos vindouros (Ding et al., 2014).

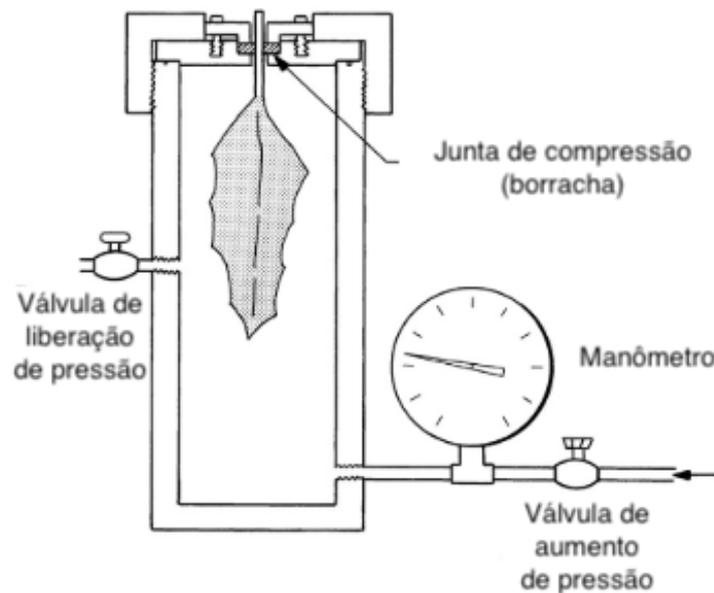
O método consiste em utilizar um segmento de folha e pecíolo (ou caule) sendo colocado dentro de uma câmara selada, onde esse pecíolo se estende para fora da câmara e é exposta à pressão atmosférica (figura 2). Gás pressurizado (em geral, nitrogênio comprimido) é adicionado lentamente à câmara. À medida que a pressão aumenta em algum momento, o conteúdo líquido da amostra será forçado a sair do xilema e ficará visível do lado de fora da câmara, na extremidade cortada da haste ou pecíolo, dependendo do órgão testado. A pressão necessária para isso é aproximadamente igual e oposta ao potencial hídrico da amostra (folha ou total). Deduz-se que a quantidade de pressão necessária para forçar a saída de água das células da folha para o xilema é uma função do potencial de água das células da folha de uma determinada cultura (Kirkham, 2014).

Quando a metodologia de uso da câmara de pressão foi introduzida por Scholander et al. (1964), ela foi descrita como um método de medição do potencial de pressão do xilema ( $P_x$ ) e argumentado que a pressão de equilíbrio ( $P_B$ ) é a pressão do gás na câmara de pressão necessária para elevar  $P_x$  à pressão

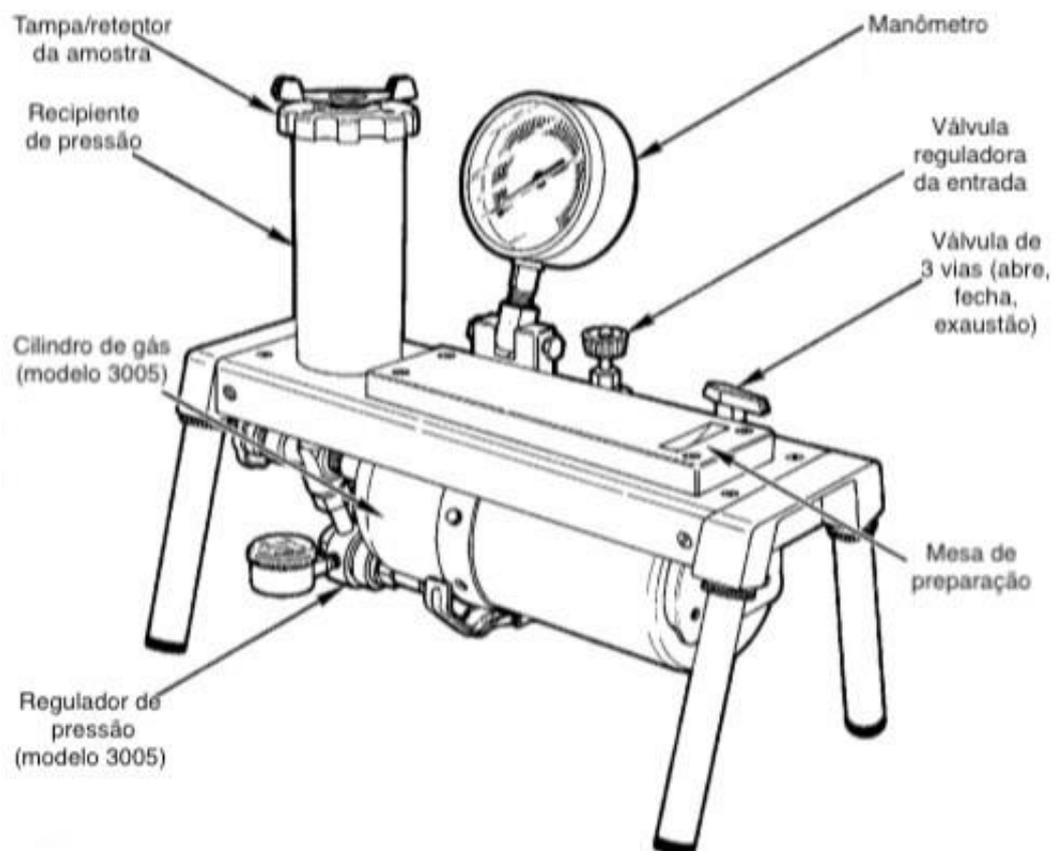
atmosférica. A diferença entre o potencial hídrico da planta ( $\Psi$ ) e  $P_x$  poderia ser explicada apelando para a noção de equilíbrio entre o potencial hídrico das células vivas ( $\Psi_c$ ) e o potencial hídrico da água apoplástica adjacente às células ( $\Psi_A$ ). A água apoplástica no xilema tem um potencial hídrico dado pela diferença entre  $P_x$  e a pressão osmótica do fluido do xilema ( $\pi_x$ ), enquanto o potencial de água das células vivas é a diferença entre a pressão de turgor celular ( $P_t$ ) e a pressão osmótica da célula ( $\pi_c$ ) (Ding et al., 2014); portanto, ao igualar  $\Psi_c$  a  $\Psi_x$  resulta como visto na Equação 6:

$$P_B = -P_x = -(\Psi_c + \pi_x) \quad (6)$$

Observe que a pressão osmótica ( $\pi$ ) citada anteriormente é muitas vezes referida como o potencial dos solutos ( $\Psi_s$ ), onde  $\Psi_s = -\pi$  (Yang et al., 2016).



**Figura 2:** Diagrama esquemático representando componentes funcionais de uma câmara de pressão. Fonte: Kirkham (2014), adaptado pelo autor.



**Figura 3:** Uma câmara de pressão disponível comercialmente, o Plant Water Status Console, da Soilmoisture Equipment Corp. Um cilindro de gás é fixado na parte inferior da base de madeira, tornando a unidade independente. Fonte: ScienceDirect (2020), adaptado pelo autor.

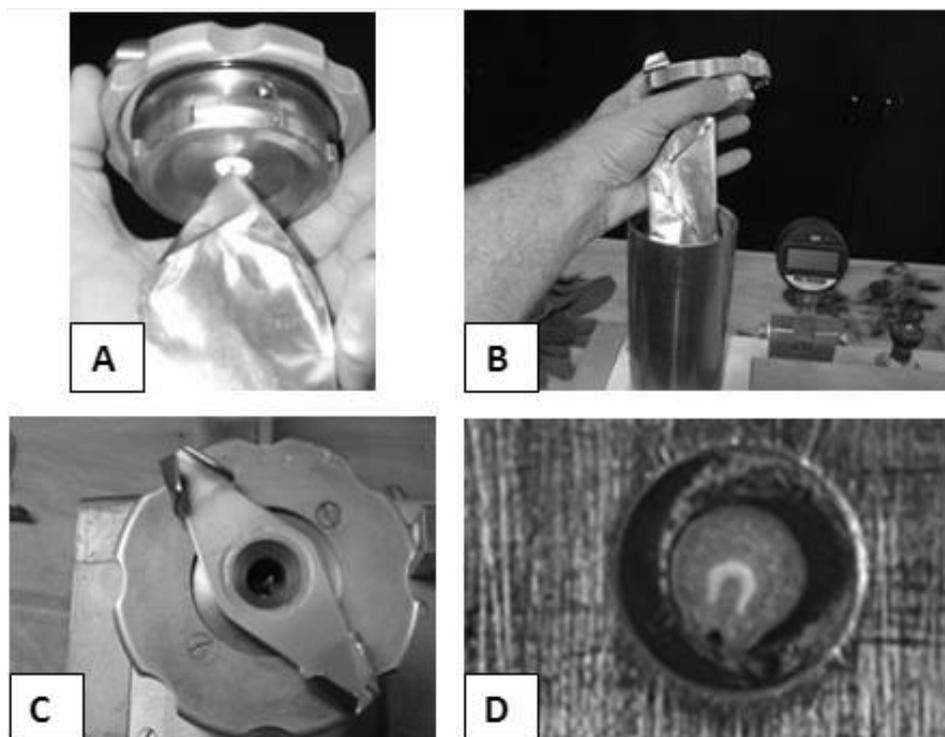
Nesta técnica, o órgão a ser avaliado tem que ser destacado da planta, utilizando uma lâmina limpa e bem afiada (figura 4), e colocado na câmara, como pode ser visto na figura 5. Antes do corte, o conteúdo de água no xilema está sob tensão hidrostática. Quando a coluna de água é cortada, a água é puxada para dentro dos capilares do xilema. Há protocolos específicos para algumas espécies e para alguns tipos de medidas, normalmente utilizando-se sacos plásticos ou aluminizados opacos. As medidas que utilizam sacos plásticos têm a função de evitar que a folha perca água para o ambiente, sobretudo em medidas realizadas no meio-dia solar. Essas são chamadas de medidas de pressão foliar. Outros protocolos, como as medidas de SWP (*stem water potential*), ou potencial hídrico da haste, fazem utilização de sacos aluminizados, que são colocados com antecedência de cerca de 10 minutos antes da excisão da amostra (Levin, 2019), para que a folha possa cessar sua transpiração e, com isso, entrar em equilíbrio de água com o pecíolo e outras partes adjacentes da planta. De acordo com Steduto

et al. (2012), em algumas espécies, as medidas realizadas com amostras de folhas que estavam sombreadas, mesmo descobertas de qualquer proteção, normalmente são bem próximas às medidas tomadas utilizando os sacos opacos, consistindo em uma alternativa mais rápida nas medidas diárias em campo.

Para fazer a medição, a câmara é pressurizada com gás nitrogênio comprimido até que a água saia pela superfície do corte do pecíolo. O observador, quando notar o umedecimento da superfície do corte, deve parar a pressurização e anotar a pressão marcada no dispositivo medidor, geralmente um manômetro analógico ou transdutor com visor digital. Este valor de pressão corresponde ao módulo do  $\Psi_w$  do órgão (Berilli, 2017).



**Figura 4:** Corte do pecíolo e retirada da amostra de uma videira para uso na câmara de pressão. Fonte: Levin (2018).



**Figura 5:** Etapas de preparação para uso da câmara de pressão; A) inserindo o pecíolo no selo de borracha da tampa; B) inserindo a amostra na câmara; C) fechando a tampa; D) visualização da extremidade do pecíolo. Fonte: Fulton (2018).

Uma forma avançada do uso das medidas utilizando-se a câmara de pressão é seu uso para análise de curvas de pressão-volume. Esse método é utilizado para medir alterações no potencial hídrico das folhas ou caule e no teor relativo de água, para isolar alguns componentes subjacentes do potencial total. O protocolo envolve medidas repetidas de potencial e massa de água sucessivamente. Como a água é forçada a sair da amostra a cada sessão de pressurização com a câmara, a massa vai se reduzindo a cada sessão de medida. A ideia é rastrear essas alterações em diversas medições, gerando gráficos para análise detalhada do comportamento da amostra (Oliveira, 2015).

As medidas tomadas com a câmara de pressão são assumidas como consistentes em estimar aproximadamente o potencial hídrico total de uma planta partindo apenas da medida do potencial de pressão ( $\Psi_p$ ), mesmo considerando que a câmara de pressão não tenha mecanismos para mensurar um dos componentes, que é o potencial osmótico ( $\Psi_s$ ) da planta. É assumido que o potencial de pressão hidrostática negativa existente no xilema é igual ao  $\Psi_p$  médio de todo o órgão verificado. Deduz-se a validade da informação anterior mediante a constatação de

que, em muitos casos o potencial osmótico do xilema é desprezível ( $> -0,1$  MPa) na maioria das plantas (exceto nas que acumulam compostos orgânicos solúveis e em halófitas) (Amorim, 2013), ficando a pressão hidrostática negativa como principal componente do potencial hídrico do xilema. Ademais, o xilema está em contato íntimo com a maioria das células do órgão e até mesmo de toda a planta (Lacerda et al., 2007), levando a sustentar que  $\Psi_w = \Psi_p$ , sem a presença do componente do potencial dos solutos, é uma equação válida na maioria das situações práticas. Pavez et al. (2011) preconiza que, dentre todos os parâmetros fisiológicos comumente mensuráveis em plantas, aquele com maior sensibilidade ao estresse hídrico é o potencial do xilema. Por este motivo, recomenda-se a sua estimativa para ser utilizada como ferramenta no manejo e gerenciamento de irrigação.

As primeiras publicações reportando o uso da câmara de Scholander em culturas de uva (*Vitis* spp.) vieram apenas uma década depois (Levin, 2019). Após isso, o uso da câmara foi amplamente difundido para uso comercial na produção de uva. O potencial hídrico indicado nas medidas se mostrou intimamente relacionado ao crescimento vegetativo da videira, ao crescimento reprodutivo, no amadurecimento da fruta e, inclusive, impactou diretamente algumas características sensoriais resultantes no vinho, conforme os relatos de Levin (2019) ao analisar os trabalhos desenvolvidos nessa cultura.

Para além do aspecto da cultura, outros estudos corroboraram que as medidas obtidas no uso da câmara de pressão na medida do status hídrico da uva estão intimamente relacionados ao conteúdo de água no solo (Williams e Araujo, 2002). Por essas razões, o uso dessa técnica continua extremamente difundido como ferramenta auxiliar no manejo da irrigação em vinhedos comerciais ao redor do mundo e também para validar outras tecnologias utilizadas no manejo de irrigação, como o uso de dendrômetros e mesmo novas técnicas ainda em desenvolvimento, como o uso de termômetros infravermelho (King e Shellie, 2016).

No intuito de facilitar o seu uso em campo, surgiram ao longo do tempo algumas variações das câmaras de pressão. Uma delas é a câmara de pressão portátil modelo *Pump-up*, sem a necessidade de utilização de cilindros de gás nitrogênio comprimido. Esse modelo específico foi desenvolvido pelo prof. Dr. Ken Shackel, da Universidade da Califórnia-Davis, com o objetivo de monitorar e programar a irrigação de algumas espécies frutíferas (Pavez et al., 2011). O modelo

é montado tendo como base uma bomba manual, similar às utilizadas para encher pneus de bicicleta, para gerar a pressão necessária na pequena câmara instalada junto ao corpo do aparelho. É uma solução portátil e de custo mais acessível que as câmaras tradicionais. A principal diferença está na pressão máxima atingida, que fica limitada a 2 MPa (20 bar), no entanto essa pressão é mais que suficiente para medidas em boa parte das espécies vegetais.

O modelo *Pump-up* já se mostrou confiável e de boa acurácia. Após a pesquisa realizada por Pavez et al. (2011), foi verificada que ela não apresenta diferenças significativas para o modelo tradicional comumente utilizado, com um coeficiente de determinação  $R^2=0,999$  quando comparado aos valores obtidos em leituras convencionais, utilizando o cilindro de gás comprimido.



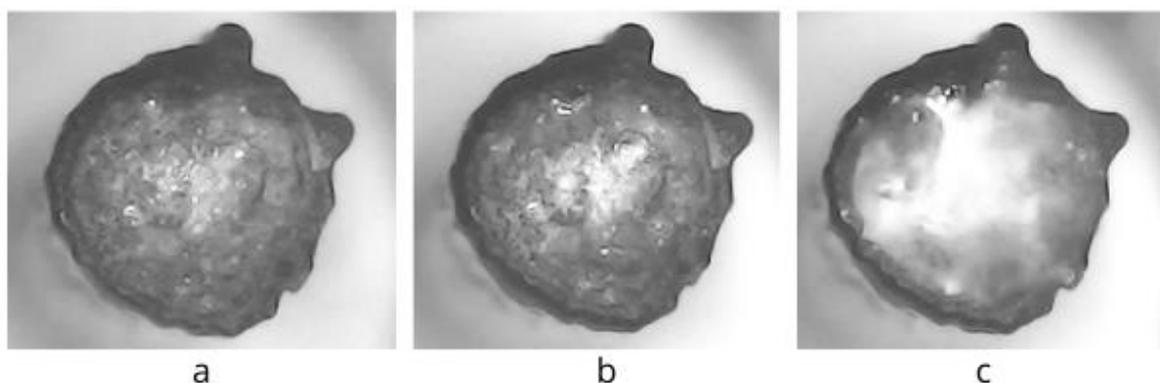
**Figura 6:** Câmara de pressão modelo Pump-up, da PMS Instrument Company. Fonte: PMS Instrument (2021).

### 2.2.1. Identificação do *endpoint*

Um dos problemas mais comumente associados ao uso da câmara de pressão para medir o potencial hídrico em folhas é a dificuldade para detectar o ponto final (*endpoint*), ou seja, o momento onde deve-se registrar a pressão que fez a água subir pelo xilema e aparecer na seção de corte transversal, também conhecida como pressão de equilíbrio ( $P_B$ ). Há variações que podem ocorrer entre os diferentes tipos e diâmetros de pecíolos, que mudam muito entre as espécies.

De acordo com Fulton et al. (2014), percebe-se o ponto final no momento em que a superfície cortada começa a brilhar, salientando também que borbulhas e efervescência indicam que o ponto final foi ultrapassado. Quando isso ocorre, o autor acima citado indica liberar um pouco de pressão da câmara para que a água recue para dentro do pecíolo novamente e, quando isso ocorrer e toda a água que estava na superfície do corte desaparecer, providencia-se uma forma de secar o corte, com algum tipo de papel absorvente e aumenta-se novamente a pressão de forma lenta, para conseguir identificar melhor o ponto final. Cabe ressaltar que nem todas as câmaras de pressão dispõem de mecanismo de exatidão parcial da pressão de forma regulada. Dessa forma, esse tipo de procedimento pode exigir maior experiência por parte do operador, criando uma maior dificuldade para seu manejo.

A visualização do ponto final não é tarefa trivial. Depende de uma boa experiência no uso da câmara e até algum conhecimento, mesmo que empírico, da fisiologia do tecido vegetal utilizado como amostra. Isso ajuda o operador para que consiga identificar os vasos do xilema da planta, observando a superfície de corte. Ajuda também a identificar possíveis pontos de falsos-positivos, que ocorrem em algumas espécies que expõem algumas resinas e outros líquidos que não provêm do xilema na superfície do corte transversal durante o processo de pressurização e às vezes até no momento de vedar o pecíolo com o selo de borracha da tampa da câmara; se forçar além do necessário durante o aperto, pode fazer com que algum tipo de líquido seja expelido na superfície do corte.



**Figura 7:** a) corte transversal do pecíolo no início da pressurização; b) pecíolo no momento do *endpoint*, que será registrado; c) *endpoint* ultrapassado, formando bolhas. Fonte: o autor (2021).

### 2.2.2. O efeito “operador”

Apesar de todo aparato técnico associado às medições de potencial hídrico das plantas usando câmara de pressão, um dos fatores que mais influenciam em distorções observadas nas medições é o operador, ou seja, a pessoa que utiliza o equipamento e faz as medições em campo ou laboratório.

Até mesmo a posição corporal do operador é capaz de influenciar nas leituras para determinação do momento de ponto final de observação. Em sua pesquisa, Levin (2019) ressalta que mesmo com uso de uma lente de aumento apropriada para observação, o próprio observador pode obstruir, sem perceber, a entrada de luminosidade apropriada para que possa ser realizada uma boa visualização.

Considerando que a água apresenta um leve brilho ao ser exposta à incidência da luz solar, esse pode ser um fator importante para determinar o momento do ponto final. Outra possibilidade limitante é a qualidade das lentes (ou lupas) utilizadas: como normalmente são utilizadas em campo e compartilhada entre operadores, não é incomum se observar lentes ou lupas bastante sujas e arranhadas, completamente inadequadas ao uso, o que pode impor um grau de dificuldade a mais para a observação da água na extremidade do corte do pecíolo.

De acordo com Shackel (2020), entre os problemas que podem dificultar a detecção do ponto final, dois se destacam entre os mais comuns: bolhas e o surgimento de água não-xilema. As bolhas podem surgir quando, por exemplo, houver alguma ruptura do tecido foliar dentro da câmara, dessa forma o ar pode ser forçado a sair pelo xilema, através dessa ruptura. Esse ar pode empurrar uma pequena quantidade de água para fora e isso pode ocasionar pequenas bolhas. Caso também haja um pouco de água ou algum outro resquício de fluido celular na superfície de corte, ele pode borbulhar com a saída desse ar e parecer que há água saindo quando, de fato, é a água que já existia naquela superfície que está a borbulhar, não caracterizando, portanto, o ponto final. A indicação, caso ocorra o descrito acima, é interromper temporariamente a pressurização e secar a superfície de corte com um pano ou um papel absorvente, ou mesmo com um pouco de algodão, similar ao encontrado em hastas flexíveis de higiene pessoal. A parada da pressão e a retirada do fluido da superfície vão cessar as bolhas e permitir que a

verificação continue, aumentando novamente a pressão. Se a superfície de corte umedecer novamente e começar a borbulhar imediatamente após ser seca, então se está (ou pode ter passado) do ponto final. O outro problema comum refere-se à água não-xilema, que pode ocorrer quando se espreme o pecíolo na vedação do selo de borracha da tampa da câmara e a água é fisicamente espremida para fora da extremidade do corte. Dependendo do tipo de câmara que se está utilizando, pode ser necessário reapertar a vedação durante um procedimento de medida, caso ocorra pequenos vazamentos, e isso pode acarretar esse fenômeno. Nesse caso, a orientação dada por Shackel (2020) é que, se você acredita que é o ponto final, anote a pressão, seque a extremidade cortada e aumente um pouco a pressão. Se mais água sair da superfície de corte, provavelmente foi o ponto final, mas se permanecer seca, provavelmente era água que não veio do xilema. Algumas espécies de plantas têm resinas ou outros materiais que podem sair do pecíolo quando a folha é pressurizada, mas normalmente vêm de outro tecido que não o xilema, portanto, conforme dito anteriormente, um bom conhecimento da anatomia da folha da espécie que está sendo testada pode ajudar o operador a discernir a diferença entre o ponto final correto (água do xilema) e a aparência desses outros fluidos.

De acordo com Levin (2019), permanece o fato de que a observação do ponto final é o aspecto mais crítico de uma determinação precisa. Isso coloca o operador no cerne da questão. O “efeito operador” destacou-se como um dos fatores mais importantes que afetam as leituras do potencial hídrico com a câmara. Portanto, é imperativo que os produtores ou gerentes das fazendas treinem adequadamente todos os técnicos para usar a câmara de pressão se dados precisos forem desejados. Isso envolve técnica de amostragem adequada, preparação de amostra, taxa de aumento de pressão apropriada e, o mais importante, identificação adequada do ponto final. Além disso, pode ser aconselhável ter um operador dedicado monitorando blocos ou fazendas específicas para fornecer informações consistentes sobre as quais basear as decisões de planejamento de irrigação. A mudança constante de operadores também pode causar distorções em medidas, que podem atingir uma diferença média de 0,17 MPa (Levin, 2019). Outra constatação a que o autor anterior chegou ao analisar os dados do experimento ao longo de dois anos, foi a diminuição do impacto do “efeito operador” ao longo tempo, mesmo trocando as pessoas

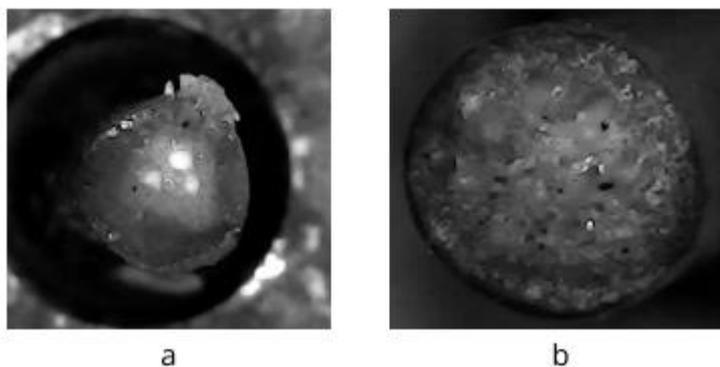
envolvidas, o que pode significar a necessidade de se melhorar o treinamento ministrado aos operadores. Sugere-se que o treinamento deve enfatizar a etapa de identificação do *endpoint*, crucial no processo.

### 2.2.3. Impacto do corte do pecíolo

Uma das etapas para preparação das amostras a serem verificadas na câmara de pressão é o corte, ou excisão, do pecíolo. Aconselha-se o uso de uma lâmina limpa e bem afiada, de modo que o corte se apresente limpo e suficientemente regular para que seja possível uma perfeita visualização, o que irá auxiliar na identificação do momento do *endpoint*.

É possível que, durante a excisão, a lâmina não esteja tão afiada quanto o que seria necessário, ou mesmo que a posição de corte não tenha sido a ideal, ocasionando superfícies de cortes irregulares, com rebarbas de tecido vegetal que podem prejudicar sua visualização. Nesses casos, alguns operadores preferem dispensar a amostra e colher outra, enquanto alguns simplesmente fazem um novo corte no pecíolo, para acertar seu posicionamento e sua superfície. Alguns autores desencorajam um novo corte. Turner (1988) afirma que recortar novamente o pecíolo deve ser evitado, reforçando o dito por Scholander et al. (1965), que afirma que essa ação pode induzir ao erro, porém admite que os motivos que levariam a esse erro não são conhecidos. Scholander et al. (1965) sugeriu apenas que, como o corte quebra a tensão da coluna de água, essa água poderia preencher o restante da folha, aumentando seu turgor. De maneira similar, Turner (1988) aconselha também minimizar ao máximo o tamanho da porção externa ao selo da câmara, para reduzir possibilidades de erros. Salaria que alguns tipos de câmaras, por seu formato de construção, exigem que a porção externa de pecíolo fora do selo seja demasiado grande, o que ele trata como uma desvantagem desses modelos.

Levin (2019) testou experimentalmente estratégias de corte e recorte do pecíolo e comparou suas medidas. O primeiro grupo utilizou apenas um corte e a medida na câmara logo em seguida, considerado o controle; o segundo grupo com um corte e um recorte antes da pressurização; o terceiro e último grupo com um recorte após destacar a folha puxando-a da planta, sem um primeiro corte. Não foram constatadas diferenças estatisticamente significantes entre os 3 grupos e, com isso, o recorte da folha parece não impactar as medidas tomadas.



**Figura 8:** a) corte inadequado, com rebarbas; b) corte adequado, limpo e plano.  
Fonte: o autor (2021).



**Figura 9:** Aperto da tampa e do selo de borracha, exibindo a extremidade do pecíolo de uma amostra na câmara de pressão. Fonte: Edaphic (2021).

#### 2.2.4. Impacto do tempo de amostragem

Considera-se, para efeitos de impacto nas medidas com a câmara de pressão, dois fatores associados ao tempo de amostragem, a saber:

- O tempo entre a excisão da amostra da planta e a pressurização;
- O tempo necessário ao equilíbrio do potencial da amostra com a planta.

O tempo entre a excisão da amostra da planta e sua efetiva pressurização é tido como um ponto comum de discórdia entre os autores. Os experimentos de Turner e Long (1980) mostraram que a perda rápida de água ocorreu em amostras de folhas dentro de 20 a 30 segundos após a excisão no caso de folhas

descobertas, ou seja, folhas que não estavam cobertas com nenhum tipo de proteção, saco ou pano de algodão antes da excisão. A perda de água e consequente diminuição do potencial hídrico medido já havia sido reportado em trabalhos anteriores, que estimavam diminuições do potencial entre 0,1 e 0,2 MPa, mas com intervalos entre a excisão e a pressurização superiores a 30 segundos. De acordo com Turner e Long (1980), a perda máxima reportada até então era de  $0,1 \text{ MPa}/\text{min}^{-1}$ , em folhas de algodão em um intervalo de 5 minutos, e que ao reduzir o intervalo entre a excisão e a pressurização na câmara para menos de 30 segundos as perdas eram mínimas.

No entanto, o experimento de Turner e Long (1980) demonstrou que o potencial hídrico das folhas descobertas medido pela técnica da câmara de pressão pode ser até 0,7 MPa menor do que folhas semelhantes cobertas imediatamente antes da amostragem. As evidências indicavam que este erro resultara do corpo extirpado dentro de 20 a 30 segundos de exposição a uma atmosfera seca. O grau em que a perda de água leva a uma redução do potencial hídrico mostrou depender de uma série de fatores, ou seja, espécies, hora do dia, seja no campo ou estufa, e o grau de estresse hídrico. O autor cita também o “efeito Iwanoff”, fenômeno onde a planta abre amplamente os estômatos por um breve período após a excisão, como um dos responsáveis pela grande perda de água em um espaço curto de tempo. Segundo Kirkham (2014), em grandes áreas de amostragem é comum colocarem as folhas retiradas para amostra envolvidas em panos de algodão umidificados, na tentativa de conter a perda de água das folhas no intervalo entre a excisão e a pressurização. No entanto esse procedimento pode acabar provendo água para a amostra, resultando em leituras erradas de potencial hídrico.

A pesquisa de Melo et al. (2007) já indica que o armazenamento das folhas de citros até 6 horas após a excisão não interfere na medida do potencial da água da planta com a câmara de pressão. Com o aumento do estresse hídrico da planta, existe menor interferência do tempo de armazenamento na leitura do potencial de água da folha.

Não há um consenso indicando por quanto tempo um operador pode reter uma amostra coberta antes da pressurização antes que ocorram erros significativos (Levin, 2019). A maioria dos usuários vêm seguindo o método proposto por Williams e Araujo (2002), que afirma que as amostras devem ser pressurizadas em até 15 segundos após a excisão. Porém este intervalo de tempo pode ser inconveniente

em condições de campo, principalmente se o instrumento estiver localizado longe do local de coleta das amostras.

O segundo fator temporal que afeta a amostragem refere-se ao tempo de equilíbrio necessário para as medidas conhecidas como potencial da haste. Para isso, o operador “isola” a amostra antes da excisão, geralmente colocando a folha dentro de um saco aluminizado opaco. O princípio por trás dessa estratégia é que a proteção force a folha a fechar os estômatos e parar de transpirar, para que dessa forma entre em equilíbrio com a haste e o tronco da planta, representando melhor o potencial hídrico da mesma. Mais uma vez, há uma grande discrepância entre os tempos de equilíbrio citados pelos estudiosos do tema, variando desde 10 minutos até 24 horas entre a proteção e a excisão para amostragem. Do ponto de vista gerencial dos negócios, quando se precisa medir potencial hídrico no meio-dia solar isso pode causar problemas, porque os operadores têm que preparar (ensacar) as folhas com grande antecedência, dependendo do protocolo de tempo adotado, e dessa forma não terão muito tempo para fazer muitas medições nesse período do dia, que geralmente vai de 12:00 a 14:00 horas (Levin, 2019). O autor supracitado conduziu um experimento em videiras, demonstrando que 10 minutos eram suficientes para o tempo de equilíbrio das amostras.

#### 2.2.5. Impacto das condições de amostragem

Conforme relatado no tópico anterior, o uso de um ambiente umedecido, seja com panos de algodão ou qualquer outra estratégia não é aconselhado, visto que pode fornecer água para a folha e, com isso, induzir erros na medida, aumentando o potencial hídrico (Turner, N. e Long, 1980).

Para medidas em campo, sugere-se levar a câmara de pressão o mais próximo possível do local de amostragem, de forma a diminuir ao máximo o tempo entre a excisão e a pressurização. Nesse caso, fala-se em lapsos de segundos, dependendo da estratégia adotada (Levin, 2019).

Outro ponto importante é a disponibilidade e integridade das ferramentas comumente utilizadas, incluindo lâminas afiadas e adequadas para excisão, sacos e filmes plásticos, sacos aluminizados, lentes de aumento e material de segurança, como óculos protetores e luvas.

A padronização da amostragem da planta deve ser ponderada e planejada com antecedência, como a parte estrutural, ramo ou folha; posição na copa, terminal ou interno, e a altura da copa (geralmente utilizado o 2/3). Estruturas menos tenras que as folhas, como os ramos, tendem a apresentar maior tensão hídrica que as folhas, possivelmente por terem estruturas mais lignificadas e vasos xilemáticos de menor diâmetro (Amorim, 2013).

Uma situação comum que ocorre é o tamanho da folha que será testada ser, por vezes, muito grande para ser inserida no recipiente da câmara de pressão. Como a folha é geralmente um material relativamente macio, é feito algum tipo de ajuste para que caiba integralmente. Em algumas situações, é possível que a folha seja enrolada, ou até dobrada para que caiba na câmara. Esse tipo de ajuste pode ocasionar erros na leitura dos resultados. Como relatado anteriormente por (Shackel, K., 2020), rupturas no tecido foliar podem permitir que o ar entre e empurre uma pequena quantidade de água para fora, ocasionando pequenas bolhas que podem confundir o operador na tentativa de registrar o *endpoint*.

Os aspectos climáticos no momento da amostragem também interferem diretamente nas medições. Quando o solo está na condição de alto estresse hídrico, plantas com tamanhos ou mesmo idades diferentes possuem raízes com alcance e tamanhos distintos e conseqüentemente apresentarão tensões hídricas internas diferentes (Berilli, 2017). Ainda segundo o autor supracitado, as plantas expostas a pleno sol possuem tensões hídricas maiores do que as de plantas sombreadas de mesmo tamanho. Quando as condições do microclima são favoráveis a um alto estresse hídrico e as do solo são de baixo estresse, prevalece a influência das condições do microclima e independente das suas alturas, as plantas de tamanhos diferentes apresentam pouca diferença entre as suas tensões hídricas internas.

#### 2.2.6. Impacto da taxa de aumento da pressão

Logo após o “efeito operador”, outro fator de grande impacto nas medições com a câmara de pressão referem-se à taxa de incremento de pressão utilizada nas leituras. Trata-se de uma difícil decisão gerencial, uma vez que em cenários de produção tem-se a necessidade de se efetuar várias medições durante um curto período de tempo, somando a isso ainda o tempo de equilíbrio da amostra, e essa

tarefa pode ser dificultada ainda mais quando se pressuriza lentamente cada amostra.

Turner (1988) afirma que a pressurização da câmara deve ser lenta ( $0,025 \text{ MPa/s}^{-1}$ ) para que se obtenha medições precisas do potencial hídrico médio e para evitar grandes mudanças de temperatura dentro da câmara. Também demonstrou que a rápida pressurização de galhos de pinheiro levou a medidas de potencial mais baixas do que aqueles com taxa lenta de pressurização. Sugeriu ainda que taxas rápidas de pressurização podem subestimar ou superestimar o potencial hídrico, dependendo dos gradientes do potencial de água na folha medida. Há ainda estudos que sugerem o uso de taxas de incremento variáveis ao longo de uma medida, utilizando taxas mais altas no início da pressurização e menores quando se presume estar chegando próximo ao *endpoint*, ao invés de taxas contínuas. (Naor e Peres, 2001) compararam as duas estratégias em várias frutíferas, com diversas variações. Concluiu-se que uma taxa de incremento de  $0,03 \text{ MPa/s}^{-1}$  é aceitável para o planejamento prático das estratégias de irrigação para árvores decíduas, mas não deve exceder esse valor. Já as taxas de incremento variáveis (rápido no início e lento ao fim) deveriam ser evitadas nessas espécies.

De acordo com Levin (2019) a taxa de incremento de pressão na câmara deve-se manter constante, em valores próximos a  $0,05 \text{ MPa/s}^{-1}$ , para minimizar os erros de leitura e, para isso, os controles de fluxo e vazão devem estar atuando de modo eficiente. Kirkham (2014) sugere taxas de incremento de pressão ainda bem mais baixas, na faixa de  $0,006 \text{ MPa/s}^{-1}$ , como forma de evitar falsos *endpoints* durante as medições.

#### 2.2.7. Impacto do tipo de planta

A câmara de pressão é tradicionalmente utilizada com as folhas das culturas e, em alguns casos com hastes completas como amostras. Essa é uma das limitações do seu uso, pois necessita de tecidos relativamente grandes, compatíveis com suas dimensões. Normalmente apenas alguns tipos de folhas ou brotos e mostram adequados a essas medidas. Folhas muito pequenas e com pecíolos muito delicados, tais como algumas gramíneas, sementes, entre outros tecidos vegetais, simplesmente não são possíveis de terem seus potenciais hídricos medidos com a câmara de pressão.

A câmara de pressão também não é adequada para a medida do potencial hídrico total ( $\Psi_w$ ) em plantas com grande quantidade de compostos orgânicos solúveis em sua seiva, tais como as halófitas. Isso porque, nessas plantas, o potencial osmótico ( $\Psi_s$ ) é muito alto, e dessa forma ele deixa de ser desprezível para compor o potencial hídrico total. Diante disso, a única medida possível de se obter nesse caso seria o potencial de pressão ( $\Psi_p$ ), restando ainda que seja apurado o valor do potencial osmótico com os instrumentos adequados.

#### 2.2.8. Problemas de segurança

As câmaras de pressão também são chamadas de “bombas” por algumas empresas e mesmo em alguma literatura especializada. De fato, por terem a capacidade de trabalhar com pressões de ar muito altas, até mesmo uma comparação com uma bomba, o artefato bélico de verdade, não é de todo estapafúrdia. Algumas medidas de potencial hídrico tomadas em folhas de amendoeiras, por exemplo, chegam a atingir -2,0 MPa, o que equivale a 20,3 kgf/cm<sup>2</sup>. Em algumas amendoeiras e ameixeiras sob alto estresse hídrico, é comum encontrarmos medidas acima de -3,0 MPa (Fulton et al., 2014). Na prática, significa dizer que alguma falha na câmara ou em algum dispositivo de vedação de pressão associado ao processo de medição pode ser fatal, dependendo da distância do operador, lembrando que durante a maior parte do processo o operador tem que estar literalmente com o olho nela, para observar o ponto final. Segundo o autor citado anteriormente, essa já seria uma boa razão para não se tentar construir e utilizar uma câmara de pressão construída de forma artesanal, fora dos padrões industriais e das normas técnicas vigentes. No mesmo sentido, a câmara não deve ser utilizada caso sua estrutura tenha sofrido alguma injúria ou dano proveniente de uma queda, por exemplo. Uma câmara com amassados ou algum tipo de injúria em seu corpo pode não ter a segurança necessária devido à deformação do material e, conseqüentemente, alteração de suas características originalmente projetadas.

Um dos procedimentos fundamentais antes de se utilizar uma câmara de pressão consiste em verificar se há possíveis vazamentos na própria câmara e também em mangueiras, medidores e demais junções e conexões. Para tal, deve-se utilizar alguma peça cilíndrica, de diâmetro similar a uma haste vegetal, para

auxiliar a vedar a entrada onde ficaria o pecíolo ou haste em uma medição real. O selo de borracha que é utilizado para vedar o orifício onde passa o pecíolo da folha pode estar danificado ou ressecado pelo uso contínuo, e deverá ser substituída sempre que se notar seu envelhecimento ou que a mesma não esteja vedando o ar pressurizado de forma adequada. A integridade desse selo é importante. Deve ser feito de uma borracha suficientemente elástica para preencher as reentrâncias dos pecíolos de formato irregular, mas não tão mole que se desintegre sob efeito da pressão. Para pecíolos muito irregulares, algum composto de silicone de secagem rápida pode ser usado, mas isso diminui o número de folhas que podem ser medidas. Graxa de alta pressão no selo pode ser usada para prevenir ou reduzir o vazamento e para prevenir danos à folha. Papel manteiga colocado entre a folha e o selo de borracha também pode ser usado para evitar danos à folha. Com pecíolos redondos, regulares, um projeto no qual a vedação de borracha pode ser apertada para eliminar vazamentos durante a pressurização da câmara funciona bem na grande maioria dos casos (Turner, 1988).

Deve-se verificar também se os controles de regulação de abertura de ar do cilindro e do fluxo de vazão de entrada na câmara estão atuando de forma adequada. As mangueiras de gás comprimido utilizadas na conexão entre a câmara e o cilindro devem sempre ser novas, sem ressecamento ou sinais de avaria e estarem superdimensionadas, de modo a suportarem pelo menos o 1,5 vezes a pressão de trabalho máxima da câmara. Acidentes com mangueiras mal dimensionadas ou defeituosas não são incomuns ao se trabalhar com artefatos de pressão.

Embora não se conheça na literatura algum caso de injúria ou lesão decorrente da operação de uma câmara de pressão fabricada profissionalmente, há uma possibilidade real de que o estrangulamento da haste no momento de vedar a câmara possa quebrá-la, e que a pressão interna possa fazê-la ser ejetada da entrada da câmara a uma alta velocidade, podendo causar dano ocular. O uso de óculos de segurança é extremamente recomendado para o momento da operação. Uma lupa com lente grande também pode ajudar a proteger, além de tornar o objeto mais visível (Fulton et al., 2014).



**Figura 10:** Operador utilizando uma lente de aumento para identificar o *endpoint* de uma amostra na câmara de pressão. Note-se a falta de dispositivo de proteção individual (óculos de segurança). Fonte: Edaphic (2021).

### 2.3. Fluxo de Seiva

O fluxo de seiva do xilema ocorre com mais intensidade sempre que a planta transpira, fluindo normalmente das raízes para as folhas e saindo, por evaporação, principalmente pelas aberturas dos estômatos. Convém salientar que há também fluxo ocasionado por pressão radicular, que ocorre em condições particulares, não sendo então o principal mecanismo de ascensão de água no caule. A regulação da transpiração pelas plantas é um processo-chave, que está por trás das respostas da vegetação à seca e dos fluxos evaporativos da terra, influenciando o clima regional e global, controlando o balanço de energia na superfície terrestre (Poyatos et al., 2016). De acordo com Schlesinger e Jasechko (2014), valores situados na faixa que compreende entre 60-80% de toda água que retorna para a atmosfera vem da transpiração das plantas, transformando a vegetação na força dominante no ciclo global da água. Conseguir medir com acurácia esse fluxo de transpiração das plantas têm sido um desafio desde o início do século XX.

Desde os trabalhos de Huber em 1932, várias técnicas têm sido desenvolvidas para as medidas do fluxo de seiva, com diferentes princípios, desde métodos termodinâmicos, elétricos, magnéticos-hidrodinâmicos até ressonância magnética nuclear (Čermák et al., 2004).

A determinação estimada dessa evapotranspiração pode ser mensurada por meio de técnicas termométricas, entre as outras tecnologias citadas anteriormente. Os métodos termodinâmicos (térmicos, ou termométricos) de medição do fluxo de seiva têm sido amplamente usados para quantificar a transpiração das plantas (Flo et al., 2019). Há uma grande variedade de sensores comercialmente disponíveis para medições desse tipo. Vários trabalhos relatam o uso dessas técnicas (Swanson, 1994; Smith e Allen, 1996; Čermák et al., 2004) que apresentam uma série de vantagens sobre outros métodos, como os baseados em rastreamento de isótopos, ou trocas gasosas na folha (Flo et al., 2019).

De acordo com o autor supracitado, os métodos termodinâmicos para quantificar o fluxo de seiva podem ser agrupados em quatro grandes famílias, a saber:

1. Pulso de calor: família de métodos onde se aplica calor em pulsos e se rastreiam as mudanças de temperatura causadas por convecção e condução térmica. Entre alguns trabalhos, pode-se citar as pesquisas de Marshall (1958), Swanson, R. H. e Whitfield (1981), Green et al. (2003) e Vandegheuchte e Steppe (2012), com abordagens distintas, baseadas na técnica do pulso de calor. Também nesta categoria entram os métodos de razão de calor (Burgess et al., 2001).
2. Dissipação de calor: esse grupo inclui os trabalhos de dissipação térmica, que medem a dissipação de calor de uma sonda aquecida inserida no alburno com referência a uma sonda não aquecida. Nessa categoria destacam-se os trabalhos de Granier (1985) e Do e Rocheteau (2002).
3. Balanço de calor: métodos que medem o balanço de calor ao longo de uma seção aquecida da planta. É o único grupo de métodos que medem diretamente a taxa de fluxo de seiva, diferente dos outros grupos acima citados que medem a densidade do fluxo. Nesse grupo, destacam-se os trabalhos de Sakuratani (1981) e Trcala e Čermák (2016).
4. Deformação no campo de calor: grupo de pesquisa que mede as mudanças no formato de um campo de calor contínuo com sondas posicionadas de forma axial e tangencial. É representada pela pesquisa de Nadezhdina (2018).

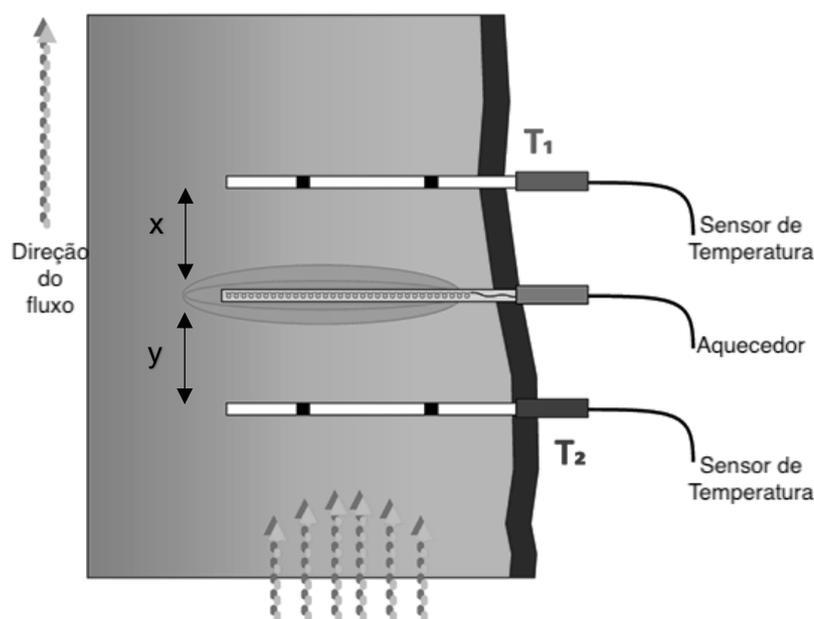
O manejo da irrigação tem sido tradicionalmente baseado em duas principais medidas. A primeira delas são as medidas de umidade do solo, onde o

status hídrico do solo é medido diretamente para determinar a necessidade de se prover irrigação. A segunda é o cálculo do balanço hídrico do solo, onde o status hídrico do solo é estimado por meio de cálculos, utilizando o balanço de água, em que a variação da umidade do solo em um período é dada pela diferença entre o que entrou por irrigação, acrescido das chuvas, e o que saiu, considerando a evapotranspiração, a drenagem e o escoamento superficial (Gabetto e Silva, 2008).

Para melhorar a precisão das medições do consumo de água por parte das plantas, os métodos de medição de fluxo de seiva têm sido utilizados para prover informações úteis para a tomada de decisões quanto ao manejo da irrigação. Dessa forma, com estimações diretas da transpiração, sensores de fluxos de seiva podem proporcionar informações que, se interpretadas de forma adequada, podem vir a ser úteis para tomadas de decisões na aplicação da irrigação, podendo mesmo compor sistemas de automação de irrigação fornecendo dados de fluxo de seiva em tempo real, em sistemas computadorizados de controle.

### 2.3.1. Pulso de calor

O princípio de funcionamento dessa família de métodos é promover um aquecimento da seiva em um determinado ponto e acompanhar o comportamento desse calor ao longo do percurso da seiva por meio de sensores de temperatura no caule. Dessa forma, o fluxo de seiva é medido pela determinação da velocidade de um pequeno pulso de calor (Gabetto e Silva, 2008). Sondas de aquecimento e sensores de temperatura são inseridas no caule, sendo que o arranjo desses sensores de temperatura pode ser diferente. Existem basicamente três tipos de arranjos: o que possui apenas um sensor acima da sonda de aquecimento, que captura apenas o fluxo ascendente; aquele que possui dois sensores equidistantes ( $x = y$ ), conforme visto na figura 11, sendo um acima e outro abaixo, da sonda de aquecimento; e aquele em que as duas sondas são inseridas a distâncias desiguais à sonda de aquecimento ( $x \neq y$ ), onde geralmente a sonda abaixo do aquecedor é colocada mais próxima à sonda de aquecimento (Swanson, 1994).



**Figura 11:** Esquema de sensor de fluxo de seiva utilizando método de pulso de calor, em visão longitudinal, mostrando a inserção dos sensores de temperatura acima e abaixo do aquecedor, com sensores posicionados de forma equidistante. Fonte: ICT (2021), adaptado pelo autor.

Os primeiros registros científicos do uso de métodos termométricos para medição da velocidade do fluxo de seiva que se têm notícia datam da década de 1930, com os trabalhos de Huber (Swanson, 1994). Ele utilizou o método de pulso de calor em 1932 para verificar a condução da seiva em um caule aquecido. A distância entre o aquecedor e o termopar foi dividida pelo tempo medido, obtendo assim a velocidade do fluxo de seiva.

Em 1958 foram alcançados grandes avanços sobre o estudo da difusão de calor no movimento da seiva com o trabalho analítico de Marshall (1958), realizado a partir dos experimentos e medidas conduzidas por Huber. Importante frisar a diferença entre a velocidade do pulso de calor observado e o fluxo de seiva. Alguns autores como Zimmermann e Brown (1980) são citados como referência de comparação para velocidades de seiva, no entanto os valores relatados por eles são as velocidades do pulso de calor (Edwards et al., 1997). Há uma correlação entre elas, porém não são idênticas. De acordo com Smith e Allen (1996), Marshall em sua análise da difusão do calor na madeira contendo seiva em movimento mostrou que o calor sobe pelo caule mais lentamente do que a seiva por causa da

transferência de calor entre a seiva em movimento e o tecido intersticial estacionário entre os vasos do xilema. Para madeira termicamente homogênea, onde os elementos condutores são uniformemente espaçados e as espessuras intersticiais são suficientemente pequenas para que o tempo necessário para o equilíbrio da seiva e da matriz lenhosa seja desprezível, Marshall descobriu que a velocidade da seiva ( $v_s$ ) está relacionada à velocidade do pulso ( $v_h$ ) e analisando a difusão do calor por meio do movimento da seiva, propôs a seguinte Equação 7 (Gabetto e Silva, 2008):

$$\text{Sap flux} = au = \frac{\rho c}{\rho_s c_s} V = \rho_b (m_c + 0,33)V \quad (7)$$

em que:

Sap flux = fluxo de seiva ( $\text{cm h}^{-1} \text{cm}^{-2}$ );

a = área do xilema ( $\text{cm}^{-2}$ );

u = velocidade da seiva ( $\text{cm h}^{-1}$ );

$\rho$  = densidade da madeira ( $\text{g mL}^{-1}$ );

c = calor específico da madeira ( $\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$ );

$\rho_s$  = densidade da seiva ( $\text{g mL}^{-1}$ );

$c_s$  = calor específico da seiva ( $\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$ );

$\rho_b$  = densidade básica da madeira ( $\text{g mL}^{-1}$ );

$m_c$  = umidade da madeira (decimal);

V = velocidade do pulso de calor ( $\text{cm h}^{-1}$ ).

Fernández et al. (2001) apresentaram resultados que demonstram que a técnica do pulso de calor para mensurar o fluxo de seiva pode ser usada como um esquema para prover informações para tomadas de decisão a respeito da necessidade e o momento de irrigação em oliveiras. Green et al. (2003) criaram um modelo computacional de simulação para a metodologia de pulso de calor que pode determinar fatores de correção para as medidas tomadas.

Ainda dentro dos métodos de pulso de calor, destaca-se o método da razão de calor (*heat ratio*). Este método se mostrou adequado para leitura de fluxo pequeno e com baixa velocidade, calculando a razão do aumento da temperatura após a liberação de um pulso de calor, em pontos equidistantes a jusante e a montante da sonda de aquecimento (Burgess et al., 2001).

### 2.3.2. Dissipação de calor

O método da dissipação de calor foi desenvolvido por Granier (1985), o qual consiste em duas sondas cilíndricas de 2 mm de diâmetro e 20 mm de comprimento, inseridas radialmente no alburno do tronco, separados por uma distância de cerca de 5 cm. O esquema pode ser visto na figura 12. A sonda superior contém um elemento aquecedor e uma junção de termopar, e a inferior possui apenas uma junção de termopar, usada como sonda de referência. Uma corrente constante é aplicada no aquecedor e a diferença de temperatura entre as duas sondas ( $\Delta T$ ) é dependente da quantidade do fluxo de seiva, que sobe pelo xilema. Com o aumento de fluxo, o calor é dissipado mais rapidamente e, portanto,  $\Delta T$  diminui. Quando não há fluxo de seiva a diferença de temperatura entre as sondas atinge seu valor máximo. Através dessa relação estima-se a transpiração da planta, como nas Equações 8, 9 e 10 abaixo, citadas por Gabetto e Silva (2008):

$$\hat{u} = a \cdot K^b \quad (8)$$

Na qual:

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

a, b = constantes relativas à calibração do método;

K = coeficiente, onde:

$$K = \frac{\Delta T_{\text{máx}}}{\Delta T} - 1 \quad (9)$$

O total de fluxo de seiva, equivalente a transpiração, é determinado pela próxima equação, a saber:

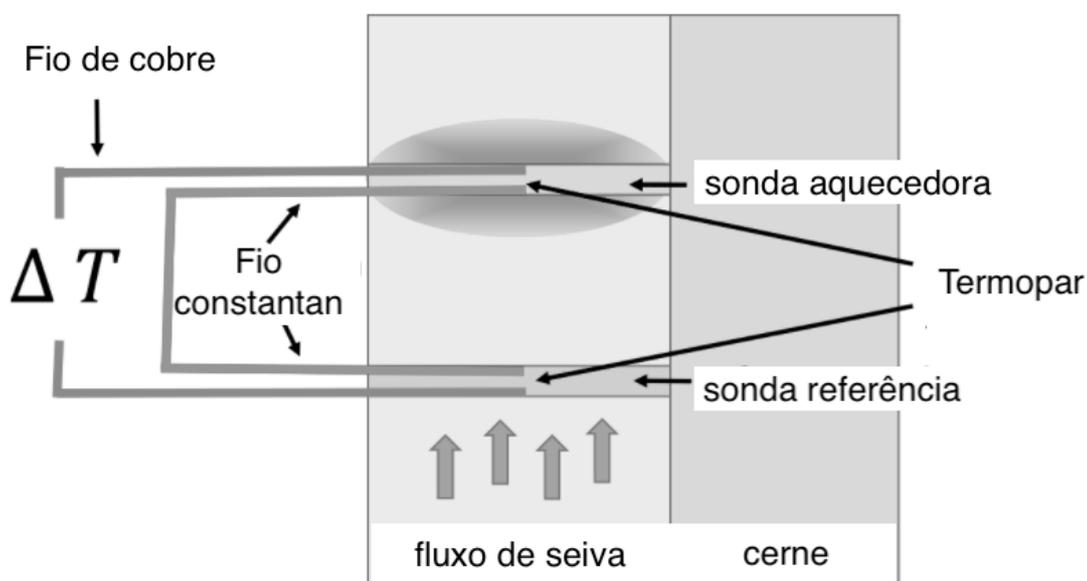
$$F = u \cdot S_a \quad (10)$$

Na qual:

F = total de fluxo de seiva ( $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$ );

$S_a$  = área da seção transversal do caule abrangida pelo xilema ( $\text{m}^2$ ).

A dissipação do calor é uma das metodologias mais citadas na literatura, porém possui a desvantagem de necessitar de calibrações específicas para correções e melhor determinação da densidade do fluxo (Amaral, 2019).



**Figura 12:** Esquema de sensor de fluxo de seiva utilizando método de dissipação de calor, em visão longitudinal, mostrando a inserção das duas sondas e suas respectivas funções. Fonte: CamdenL's (2014), adaptado pelo autor.

De acordo com Poyatos et al. (2016), o método de dissipação de calor é, de longe, o mais popular método termométrico utilizado em pesquisas de medição de fluxo de seiva. Isso pode ocorrer em virtude deste utilizar princípios físicos relativamente simples e poder ser aplicado diretamente no campo sem alterar as condições fisiológicas e micrometeorológicas da planta. Seus sensores/sondas são de fácil confecção e instalação, comparando aos demais métodos térmicos (Araújo et al., 2012). No entanto, de acordo com Delgado-Rojas et al. (2007), há necessidade de estudá-lo mais profundamente, principalmente no que diz respeito a sua calibração para cada espécie de planta a ser medida, assim como uma forma de minimizar os potenciais erros mencionados na literatura, já que não há garantia que a equação original proposta por Granier possa se aplicar a plantas tropicais, por exemplo. Há estudos como o de Araújo et al. (2012), calibrando o sensor de

dissipação para o coco anão verde e o trabalho de Reis et al. (2006), onde o sensor foi utilizado em plantas de mamão.

De acordo com Delgado-Rojas et al. (2007), a definição da área condutora da seiva, ou seja, a área transversal ocupada pelo xilema, no ponto onde está inserido o sensor, que é efetiva em transportar a água, constitui-se em uma grande fonte de erro do método de dissipação de calor. Esta área depende principalmente da espécie vegetal, da idade da árvore e do diâmetro do caule. Esses erros derivam do fato de que, dependendo do tamanho das sondas inseridas, os sensores podem entrar em contato com áreas que não conduzem seiva, como o cerne, caso as agulhas dos sensores sejam demasiado longas para o caule testado, ou a casca, onde uma agulha curta pode nem chegar a atingir o xilema, podendo com isso gerar subestimativas da velocidade do fluxo. Há como realizar uma correção ou ajuste, se a porção inativa da planta em contato com a sonda puder ser medida (Clearwater et al., 1999).

Há pesquisas que estudaram a influência do gradiente de temperatura do ambiente nas medições de fluxo de seiva pelo método da dissipação de calor proposto por Granier (1985). Sobre este assunto, Do e Rocheteau (2002) concluíram que é importante considerar os efeitos do gradiente de temperatura ambiente quando se trabalha com as sondas de dissipação térmica com aquecimento contínuo. Os erros associados ao gradiente de temperatura ambiente aumentavam quando existiam maiores diferenças entre as temperaturas do dia e da noite, baixas razões de fluxo de seiva em plantios espaçados ou com alta radiação solar. Como solução, os autores propuseram um método de aquecimento não-contínuo, conservando assim a simplicidade do esquema proposto por Granier e minimizando os erros associados às mudanças da temperatura ambiente. Após testarem diversas combinações de ciclos de aquecimento e resfriamento, os autores supracitados recomendaram uma combinação de tempos de 15 em 15 minutos, ou seja, 15 minutos de aquecimento e depois 15 minutos sem aquecimento, conseguindo realizar duas medidas de fluxo de seiva por hora.

### 2.3.3. Balanço de calor

Essa técnica consiste em aplicar uma quantidade conhecida e uniforme de aquecimento em torno da circunferência do caule, ou em um pequeno segmento

do caule, utilizando uma fonte de calor, e o fluxo de massa da seiva é obtido por meio do balanço dos fluxos de calor para dentro e fora da seção aquecida do caule. Se uma quantidade constante de água fluir pelo caule, a temperatura do alborno atingirá um valor estável, cuja magnitude é inversamente proporcional ao fluxo de água. Em condições ideais sem perda de calor, o calor transportado da seção pelo fluxo de massa de água é igual à quantidade de calor fornecida à seção mas na prática, as condições ideais não são atendidas e deve-se contabilizar ou controlar as perdas de calor que não estão relacionadas ao fluxo de seiva (Swanson, 1994).

As pesquisas com balanço de calor vêm sendo desenvolvidas desde 1967, nos trabalhos de C. R. Daum, conforme relatos de Swanson (1994) e Edwards et al. (1997), que utilizava como entrada de calor o aquecimento natural da radiação solar. Uma grande melhoria a este método foi introduzida posteriormente nos trabalhos de Čermák et al. (1976), com o uso de eletrodos utilizando aquecimento artificial no lugar da radiação solar. A técnica de sensor com aquecimento artificial era muito mais utilizável no campo do que a anterior. Com aquecimento artificial, os gradientes de temperatura podiam ser controlados e tornados bastante grandes e facilmente detectáveis em condições de temperatura ambiente instáveis. Uma modificação adicional ao método foi proposta por Sakuratani (1981), para uso em caules de pequenas plantas herbáceas. Tanto o aquecedor quanto os sensores de temperatura eram externos ao xilema. Esta técnica de sensor não invasiva para pequenos caules foi ainda aperfeiçoada por Baker e Van Bavel (1987). Um grande avanço conquistado pelos autores citados anteriormente diz respeito ao uso de coletores de dados computadorizados, permitindo que os dados coletados e armazenados pelo sistema fossem processados em tempo real. Os dados analisados permitiram aos autores concluir que o sistema é perfeitamente adequado, validando a pesquisa anterior de Sakuratani (1984), estabelecendo uma acurácia relativa do método em aproximadamente 10%.

A Equação 11 expressa o balanço de energia em um segmento de caule, explanada em Gabetto e Silva (2008), conforme preconizado pelo método:

$$P_{in} = Q_r + Q_v + Q_s + Q_{flow} \quad (11)$$

em que:

$P_{in}$  = potência aplicada no aquecedor (W);

$Q_r$  = perda de calor por condução na direção radial (W);

$Q_v$  = perda de calor por condução vertical (W);

$Q_s$  = energia armazenada pelo caule (W);

$Q_{\text{flow}}$  = energia perdida por convecção no fluxo da seiva (W).

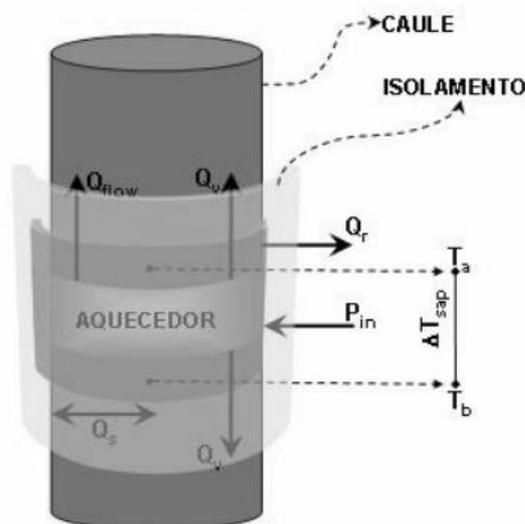
Desse modo, o fluxo de seiva ( $F$ , em  $\text{g s}^{-1}$ ), considerando a capacidade térmica da água ( $c$ , em  $\text{J g}^{-1} \text{K}^{-1}$ ) e a diferença de temperatura da seiva acima ( $T_a$ , em K) e abaixo ( $T_b$ , em K) do aquecedor, é calculado de acordo com a Equação 12:

$$F = \frac{(P_{\text{in}} - Q_r - Q_v - Q_s)}{c (T_a - T_b)} \quad (12)$$

Sendo que esta equação pode ser simplificada (Equação 13):

$$F = \frac{Q_{\text{flow}}}{c \cdot \Delta T_{\text{sap}}} \quad (13)$$

Uma pesquisa conduzida por Shackel et al. (2019) indicou que a precisão do método de balanço de calor, para medição do fluxo de seiva usando alguns dos dispositivos disponíveis comercialmente, pode depender fortemente das condições ambientais sob as quais estes aparelhos são operados. Os resultados sugeriram que o efeito das condições ambientais nos sinais do medidor, especialmente nos diferenciais de temperatura do caule, deve ser avaliado antes de aceitar as estimativas de balanço de calor do fluxo de seiva como confiável sob quaisquer condições ambientais. Abaixo, na figura 13, um esquema diagramático de um sensor que utiliza a técnica de balanço de calor:

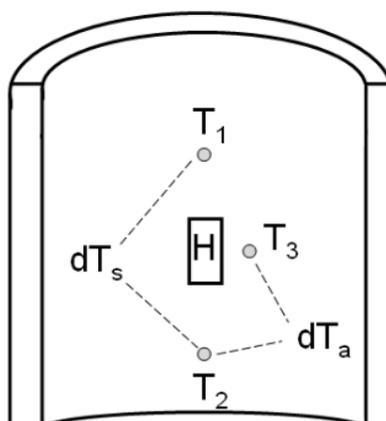


**Figura 13:** Sensor de balanço de calor. Fonte: Gabetto e Silva (2008).

#### 2.3.4. Deformação no campo de calor

O método, conhecido pela sigla HFD (heat field deformation) é uma das técnicas termométricas de medir fluxo de seiva. Ele usa um sistema de aquecimento linear contínuo, permitindo medições de alta resolução de tempo, que são importantes para estudos sobre respostas de plantas a mudanças ambientais abruptas (Nadezhdina, 2018). A técnica HFD combina as características mais vantajosas dos métodos termométricos desenvolvidos anteriormente, medindo gradientes de temperatura assimétricos e simétricos em torno de uma fonte de calor, e evita as limitações associadas ao arranjo do termômetro previamente aplicado separadamente. Além disso, a configuração do sensor usando o método HFD envolve colocar o termômetro superior do termopar assimétrico próximo a um aquecedor, o que torna possível seguir a dissipação de calor e a deformação do campo de calor nas direções axial e tangencial ao redor um aquecedor linear.

Abaixo um esquema do sensor de deformação no campo de calor, demonstrando suas partes (figura 14):



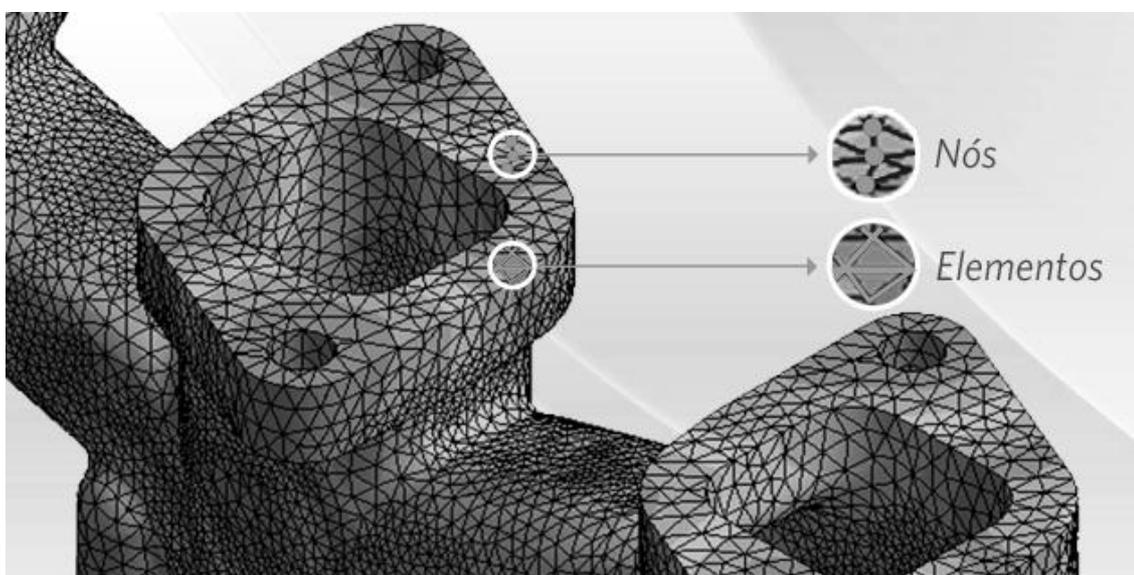
**Figura 14:** Esquema do sensor de deformação do campo de calor não invasivo, que consiste em um elemento aquecedor e três termopares ( $T_{1-3}$ ), fixados em material isolante. O elemento aquecedor (H) provê um fornecimento contínuo de calor e os termopares medem duas diferenças de temperatura: a diferença de temperatura simétrica ( $T_s$ ) e a diferença de temperatura assimétrica ( $dT_a$ ). Fonte: Hanssens et al. (2013).

A configuração dos termopares na figura 14 permite a medição de duas diferenças de temperatura: a diferença simétrica de temperatura ( $dT_s$ ), medida pelos termopares axiais  $T_1$  e  $T_2$  e a diferença assimétrica de temperatura ( $dT_a$ ), medida pelos termopares  $T_2$  e  $T_3$ . Os termopares axiais foram posicionados a 10 mm do centro do elemento do aquecedor, enquanto o termopar tangencial  $T_3$  foi localizado a 3 mm do centro do aquecedor. Uma tensão contínua de 3 V foi aplicada ao aquecedor. A dinâmica do sensor, aplicado ao tomateiro, correspondeu bem com o fluxo de seiva calculado com base em dados de crescimento de frutas e transpiração estimada (Hanssens et al., 2013).

### 2.3.5. Método dos elementos finitos (MEF)

Estudos utilizando simulação computacional são amplamente utilizados nas empresas e em centros de pesquisa para realizar análises e melhorar a qualidade dos produtos e projetos. Muitas dessas análises ocorrem com a utilização de programas de computador utilizando o Método dos Elementos Finitos, os quais possibilitam a obtenção de respostas para inúmeros problemas, em diversas áreas do conhecimento.

O MEF é uma técnica numérica que fornece soluções aproximadas para equações diferenciais que modelam problemas que surgem na física e na engenharia. Tal como acontece com os esquemas de diferenças finitas mais comumente usados, o método dos elementos finitos reduz os problemas definidos no espaço geométrico (ou domínio), para encontrar uma solução em um número finito de pontos subdividindo o domínio em regiões menores (uma malha) (Pepper e Heinrich, 2017). De uma forma resumida, pode-se definir o MEF como um método matemático, no qual um meio contínuo é discretizado, ou subdividido, em pequenos subdomínios – elementos que mantêm as propriedades do elemento maior que os originou. Estes pequenos elementos podem possuir diferentes formatos como, por exemplo, triângulos ou quadrados para o caso bidimensional, e prismas ou quadriláteros para o caso tridimensional, sendo que a escolha depende do tipo de estrutura a ser analisada. Para os problemas bidimensionais, o elemento triangular é mais utilizado devido a sua capacidade de aproximar o contorno de estruturas com geometrias mais complexas. Os vértices desses elementos são chamados de nós ou pontos nodais (figura 15).



**Figura 15:** Malha gerada pelo processo de discretização utilizado no MEF, mostrando os nós e os elementos. Fonte: Mirlisenna (2016).

Esses elementos são descritos por equações diferenciais e resolvidos por modelos matemáticos para que sejam obtidos os resultados desejados (Lotti et al., 2006).

O método dos elementos finitos tornou-se o padrão para a aproximação numérica das equações diferenciais parciais utilizadas na engenharia estrutural e agora é amplamente aceito para diversas áreas do conhecimento e outros tipos de problemas científicos. A maioria dos programas de computador para simulações em engenharia utilizados hoje são baseados em elementos finitos - até mesmo os programas de dinâmica de fluidos computacionais de volume finito vendidos comercialmente empregam geradores de malha baseados na geração de malha não estruturada de elemento finito (Pepper e Heinrich, 2017).

Boa parte dos problemas de campo da engenharia são governados pelos mesmos tipos de equação diferencial. Problemas de condução de calor, por exemplo, fazem uso de alguns tipos específicos de equação *quasi*-harmônica. Entre estes, destacamos a equação de Poisson e a equação de Laplace (Souza, 2003).

## 2.4. Desenvolvimento de Software

### 2.4.1. Desenvolvimento de Aplicações Móveis

Com o crescimento exponencial do mercado global de dispositivos móveis, dada a concorrência cada vez maior entre os fabricantes, é crescente a necessidade de aplicações para suporte a esses aparelhos. A indústria de software de aplicativos móveis também cresceu de forma rápida e desordenada. Muitas das metodologias utilizadas para desenvolvimento de software tradicional, voltado aos computadores pessoais, teve que ser utilizada e adaptada para a nova realidade dos dispositivos móveis, mas buscando sempre agilizar ao máximo o desenvolvimento, estratégia fundamental em um mercado tão competitivo e dinâmico.

Para efeitos de classificação, as metodologias para desenvolvimento de software são tradicionalmente divididas em dois grandes grupos: as tradicionais e as ágeis. As metodologias tradicionais de desenvolvimento de software são centradas no processo, sendo o seu objetivo o aumento da previsibilidade e

eficiência no desenvolvimento de software. Nas metodologias tradicionais, a documentação e definição de requisitos é requerida no início do projeto de forma a evitar alterações e o feedback dos clientes e os testes são os últimos passos. Por outro lado, as metodologias ágeis, são essencialmente diferenciadas pela possibilidade de mudança a qualquer ponto do projeto, sendo encorajada a interação entre membros da equipe e o cliente, além de propor entregas parciais mais rápidas (Karmali, 2019).

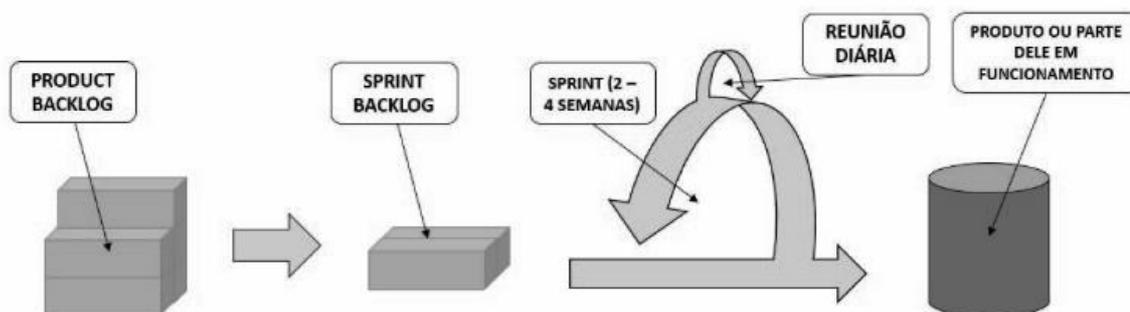
Há algumas etapas que são comuns a qualquer método de desenvolvimento de software que preze por um produto razoável, que não devem ser dispensadas em nenhum cenário. Podemos dividir, em linhas gerais, em ao menos quatro etapas básicas, que podem ser subdivididas e podem também serem iterativas, com retornos a etapas anteriores. A saber:

- Escopo e requisitos: nessa etapa é definido e limitado o escopo de atuação da solução a ser desenvolvida e os requisitos funcionais (as funções que o software deve executar) e não-funcionais, tais como ambiente de execução, hardware mínimo necessário, entre outros;
- Implementação: etapa onde o software é construído, utilizando-se ferramentas apropriadas, como editores, compiladores, etc.;
- Testes: é nessa etapa que o software deve ser avaliado para saber se cumpre os requisitos estabelecidos na primeira etapa. Caso identifique-se a necessidade, pode-se retornar a etapas anteriores para uma nova iteração;
- Entrega: momento onde o resultado do desenvolvimento é entregue para ser utilizado pelos interessados.

A tarefa de desenvolvimento de software por muito tempo foi tida como uma atividade lenta e burocrática, até o surgimento das metodologias ágeis de programação. Empresas de desenvolvimento de software tem adotado métodos ágeis como forma de maximizar a entrega de produtos de software, o que popularizou o uso de tais métodos. Dentre os métodos mais utilizados temos: Scrum, eXtreme Programming (XP), Lean Development. Devido sua característica, com ênfase no gerenciamento do desenvolvimento, o Scrum é atualmente o método mais utilizado nas empresas de desenvolvimento de software (Meireles e Bonifácio, 2015). Todos esses métodos ágeis se caracterizam por serem incrementais e iterativos, ou seja, faz-se diversas iterações ou ciclos, e a cada fim

de um ciclo se entrega parte dos requisitos funcionais acordados no início desse ciclo. No Scrum, cada ciclo é conhecido como *sprint*.

Scrum é um modelo ágil, voltado a equipes pequenas e pequenos ciclos. Em suma, essa metodologia para gerenciamento de projetos tem como característica entregar resultados de maneira incremental, efetiva e com menor custo, implementando requisitos realmente necessários. A flexibilidade e facilidade de adaptação do projeto diante das inevitáveis mudanças é um outro princípio dessa metodologia (Previato, 2018). Porém, todas as metodologias, incluindo Scrum, são voltadas ao trabalho em equipes, mesmo que pequenas. Nenhuma delas dá nenhum tipo de orientação para trabalho solo, ou seja, com desenvolvedor único, embora esta seja uma realidade crescente no mundo do trabalho (Pagotto et al., 2016). Abaixo na figura 16 o ciclo de trabalho do Scrum, mostrando as etapas de trabalho propostas (Pagotto et al., 2016; Previato, 2018).



**Figura 16:** Etapas do processo ágil Scrum. Fonte: Pagotto et al. (2016).

*Product Backlog:* é uma lista ordenada de funcionalidades do sistema, ou seja, todas as características, funcionalidades, requisitos, e regras de negócios devem estar nessa lista.

*Sprint Backlog:* contém apenas uma parte dessas funcionalidades que deverão ser entregues ao final de cada ciclo, ou *sprint*.

*Sprint:* um ciclo, geralmente de 2 a 4 semanas, onde ocorre o desenvolvimento das funcionalidades separadas na *sprint backlog*. Há também uma reunião diária (*daily scrum*), para definição das metas mais imediatas, a serem desenvolvidas no dia.

*Sprint Review*: uma revisão realizada ao final de cada *sprint*. Geralmente as partes interessadas se reúnem junto com o time de desenvolvimento para inspecionar e colaborar com o incremento/produto realizado. Se necessário, ocorrem ajustes no *Product Backlog*.

#### 2.4.2. Avaliação de Software

A usabilidade é considerada um conceito chave na interação homem-computador e reforça a preocupação em criar sistemas informatizados que apresentem facilidade de aprendizagem e de utilização (Boucinha e Tarouco, 2014). De acordo com Nielsen (2012), a usabilidade é um atributo de qualidade que avalia a facilidade de uso das interfaces de usuário. A palavra "usabilidade" também se refere a métodos para melhorar a facilidade de uso durante o processo de design, sendo definida por cinco componentes:

1. Capacidade de aprendizagem: quão fácil é para o usuário utilizar o sistema para tarefas básicas pela primeira vez?
2. Eficiência: Uma vez conhecido o sistema, quão rápido consegue executar as tarefas?
3. Memorização: o usuário consegue se lembrar como realizar as tarefas no sistema, após um tempo sem utilizar?
4. Erros: quantos erros os usuários cometem, quão graves são esses erros e com que facilidade eles podem se recuperar dos erros?
5. Satisfação: design agradável.

A usabilidade é um elemento-chave do design centrado no ser humano. Projetos baseados no ser humano (*human centered*) são uma filosofia de design, um processo que leva em conta as capacidades humanas em cada estágio do projeto (Boucinha e Tarouco, 2014). Ainda de acordo com os autores supracitados, o nível de usabilidade de um sistema pode ser obtido avaliando-se características como a facilidade de aprendizagem da operação e a facilidade e eficiência de uso da interface.

Os métodos para avaliação de software podem ser agrupados em duas categorias principais (Pereira et al., 2017):

1. Analíticos (métodos de inspeção ou heurísticas): aqueles nos quais a avaliação do software é baseada no julgamento de especialistas;
2. Empíricos: envolvem a participação dos usuários para a coleta dos dados, que posteriormente serão analisados.

Entre as técnicas utilizadas para avaliação com usuários, destaca-se a aplicação de questionários padronizados. As principais vantagens da utilização desses instrumentos para avaliação são a objetividade na coleta das informações, possibilidade de replicação do instrumento em outros estudos e quantificação dos resultados a partir das respostas dos usuários participantes, através de cálculos estatísticos (Sauro e Lewis, 2016).

#### 2.4.3. SUS – System Usability Scale

A escala SUS foi desenvolvida em 1986, por John Brooke, no laboratório da Digital Equipment Corporation, no Reino Unido. É um questionário composto por 10 perguntas (vide Anexo I). O usuário que responde assinala sua resposta em uma escala Likert que varia, em cinco posições, desde a *Discordo totalmente* a *Concordo totalmente* (Boucinha e Tarouco, 2014). Comparados a outros instrumentos de avaliação disponíveis, o SUS é considerado tecnologicamente “agnóstico”, podendo ser utilizado para avaliar diversos produtos e serviços, como websites, hardware, sistemas de comando de voz, aplicações móveis e sistemas médicos. É um instrumento robusto e versátil, tornando a pesquisa rápida e fácil. O instrumento gera um escore único em uma escala de fácil entendimento, de 0 a 100 (Padrini-Andrade et al., 2019). Também é fácil de administrar, possui boa confiabilidade e referências que auxiliam na interpretação de seu escore. Outra vantagem do SUS é que não há direitos autorais nem necessita de aparato especial, tornando o custo de utilização extremamente recomendável.

De acordo com Tenório et al. (2011) é possível reconhecer os componentes de qualidade indicados por Nielsen nas questões do SUS:

- Facilidade de aprendizagem: 3, 4, 7 e 10;
- Eficiência: 5, 6 e 8;
- Facilidade de memorização: 2;
- Minimização dos erros: 6;

- Satisfação: 1, 4, 9.

Para calcular o escore, primeiro é somado o escore de cada item que contribui em uma escala de 1 a 5. Para os itens 1, 3, 5, 7 e 9 (questões ímpares), o escore individual é a nota recebida menos 1. Para os itens 2, 4, 6, 8 e 10 (questões pares), a contribuição é 5 menos a nota recebida. Multiplica-se a soma de todos os escores por 2,5 e assim é obtido o valor total do SUS (Sauro e Lewis, 2016; Padrini-Andrade et al., 2019). Mediante o escore, a usabilidade é classificada de acordo com sua faixa numérica em uma escala adjetiva, conforme quadro abaixo:

**Quadro 1:** Escala de classificação para o SUS (System Usability Scale)

>80,3	A	Excelente
68 - 80,3	B	Bom
68	C	Ok
51-68	D	Pobre
<51	E	Horrível

Fonte: o autor (2021).

Abaixo, um exemplo do cálculo do valor SUS em uma resposta fictícia. Considerando os valores abaixo, para as 10 perguntas da metodologia SUS:

**Quadro 2:** Exemplo com notas fictícias atribuídas na metodologia SUS (System Usability Scale)

Q1	Q2	Q3	Q4	Q5	Q6	Q7	Q8	Q9	Q10
5	2	5	2	5	1	4	1	5	1

Fonte: o autor (2021).

Questões ímpares:  $(5-1)+(5-1)+(5-1)+(4-1)+(5-1)=4+4+4+3+4 = 19$

Questões pares:  $(5-2)+(5-2)+(5-1)+(5-1)+(5-1)=3+3+4+4+4 = 18$

Expressão: soma das questões x 2,5 =  $37 \times 2,5 = 92,5$

Classificação: **Excelente**

#### 2.4.4. NPS – Net Promoter Score

Métrica popular para aferir lealdade de um cliente a uma determinada indústria, o NPS foi introduzido em 2003 por Fred Reichheld. Utiliza uma única questão de possibilidade de recomendação, com uma escala de 11 etapas, que variam desde 0 (nada provável) a 10 (extremamente provável). Pela metodologia, os respondentes que escolhe 9 ou 10 são chamados “promotores”, aqueles que selecionam de 0 a 6 são “detratores”, enquanto todos os outros são considerados “passivos” ou “neutros”. O valor final é dado pela subtração da porcentagem de promotores pela porcentagem de detratores. Os valores dos respondentes neutros (7 e 8) não influem na métrica (Sauro e Lewis, 2016).

Desde sua adoção, o NPS tem gerado algum tipo de polêmica, porém tem sido observado alguma correlação entre o crescimento das empresas e a métrica, embora também não seja simples adotar um cálculo de intervalos de confiança para ela (Sauro e Lewis, 2016). Os valores aferidos de NPS podem ser classificados mediante a escala do Quadro 3:

**Quadro 3:** Escala de classificação para o NPS (Net Promoter Score)

Entre 75 e 100	Excelente
Entre 50 e 74	Muito bom
Entre 0 e 49	Razoável
Entre -100 e -1	Ruim

Fonte: o autor (2021).

### 3. TRABALHOS

#### 3.1 DESENVOLVIMENTO DE SOLUÇÃO INTEGRADA PARA AUXÍLIO NO USO DA CÂMARA DE PRESSÃO DE SCHOLANDER EM MEDIDAS DE POTENCIAL HÍDRICO FOLIAR<sup>1</sup>

##### RESUMO

No intuito de prover um manejo efetivo da irrigação, alguns parâmetros devem ser acompanhados de perto nos cultivos vegetais. Uma das formas de se verificar a necessidade de irrigação em um plantio consiste em avaliar o potencial hídrico das plantas, como forma de se mensurar o nível de estresse hídrico da mesma e ajustar o regime de irrigação para atender aos patamares ótimos de disponibilidade de água. Para se realizar essas medidas utiliza-se a câmara de pressão de Scholander, onde se pressuriza o tecido foliar para verificar a pressão hidrostática necessária para se conseguir circular a água pelo xilema. No entanto, o procedimento que se adota desde a década de 1960 tem algumas dificuldades associadas, sendo a principal delas a identificação do momento em que a água surge no corte transversal do pecíolo, do lado de fora da câmara, chamado

---

<sup>1</sup> Programa de Computador registrado no INPI sob o nº BR512021000967-3 em 18/05/2021.

endpoint. No intuito de minimizar os erros associados ao procedimento de identificação desse momento, foi desenvolvido uma solução integrada, composta de componentes de hardware e software para adaptação a câmaras de pressão convencionais, como forma de registrar por meio de uma gravação de vídeo, juntamente com o registro do sensor de pressão e outros sensores, o processo de pressurização. É possível acompanhar através do software desenvolvido para dispositivo móvel o processo, e ser consultado posteriormente em caso de dúvida. Para tal, foi adaptado um transdutor de pressão, associado a um coletor de dados microcontrolado com conexão *bluetooth*. Um aparato para suporte a uma câmera UVC, desenvolvido em impressão 3D, foi associado à solução, para registro das imagens. O conjunto de hardware comunica-se com um aplicativo móvel desenvolvido especialmente para essa finalidade, que recebe as informações do coletor de dados através de conexão sem fio e as imagens da câmera via cabo USB. O conjunto adaptado contendo o transdutor de pressão, o coletor de dados e o suporte com a câmera UVC se mostrou adequado e robusto, enviando informações para o aplicativo desenvolvido. O custo de montagem da solução integrada demonstra também a viabilidade econômica da mesma. O aplicativo foi avaliado quanto à sua usabilidade e eficiência, atingindo 90,31 pontos na métrica SUS (*System Usability Scale*) e 86 na NPS (*Net Promoter Score*), ambos considerados “excelente” nas suas respectivas escalas classificatórias. Os questionários aplicados aos usuários para avaliação da usabilidade foram testados utilizando o coeficiente alfa de Cronbach, atingindo o valor de 0,71, o que atesta também a confiabilidade do instrumento utilizado.

## ABSTRACT

In order to provide effective irrigation management, some parameters must be closely monitored in plant crops. One of the ways to verify the need of irrigation in a plantation is to assess the water potential of plants, as a way of measuring the water stress level and adjusting the irrigation regime to meet the optimal levels of water availability. To carry out these measurements, the Scholander pressure chamber is used, where the leaf tissue is pressurized to check the hydrostatic pressure

necessary to be able to circulate the water through the xylem. However, the procedure that has been adopted since the 1960s has some associated difficulties. The main one is the identification of the moment when the water appears in the cross section of the petiole, outside the chamber, called endpoint. In order to minimize the errors associated with the identification of that moment, an integrated solution was developed, composed of hardware and software, for adaptation to conventional pressure chambers, making a video record together with the registration of the pressure sensor and other sensors, during the pressurization process. It is possible to follow the process through the software developed for mobile devices, and to be consulted later in case of doubt. To this end, a pressure transducer was adapted, associated with a microcontrolled data collector with a bluetooth connection. An apparatus to support a UVC camera, developed in 3D printing, was associated with the solution, for recording images. The hardware set communicates with a mobile application developed especially for this purpose, which receives the information from the data collector through wireless connection and the images from the camera via USB cable. The adapted set containing the pressure transducer, the data collector and the support with the UVC camera proved to be adequate and robust, sending information to the developed application. The cost of assembling the integrated solution also demonstrates its economic viability. The application was assessed for usability and efficiency, reaching 90.31 points on the SUS (System Usability Scale) metric and 86 on the NPS (Net Promoter Score), both considered "excellent" in their respective rating scales. The questionnaires applied to users for usability evaluation were tested using Cronbach's alpha coefficient, reaching a value of 0.71, which also attests to the reliability of the instrument used.

## INTRODUÇÃO

Um manejo eficaz da irrigação visa a obtenção de alta eficiência de uso de água e energia nas culturas irrigadas através da aplicação da quantidade de água adequada, demandada pela cultura, e no tempo certo. Para tal, faz-se necessário monitorar o consumo hídrico da planta em todo seu ciclo vegetativo. Monitorar com

precisão esse consumo demanda tempo e esforços consideráveis por parte dos produtores. Medidas do potencial hídrico tomadas diretamente do solo têm sido usadas amplamente para estimar o consumo de água pela planta e programar sua reposição.

Embora os instrumentos baseados no solo forneçam informações sobre os níveis de umidade do solo próximos à zona da raiz da planta, as medidas aferidas na própria planta tendem a ser também bons indicadores de seu estado de água. Apesar da grande quantidade de pesquisas desenvolvidas na área de medidas de potencial hídrico nas plantas e seu impacto nos processos fisiológicos, menor avanço se conseguiu no desenvolvimento de protocolos específicos para o uso dessas medições nas atividades de manejo de irrigação (Steduto et al., 2012) ou mesmo na adoção de estratégias de irrigação com déficit hídrico controlado (Berilli, 2017).

A câmara de pressão de Scholander (também conhecida como bomba de Scholander, ou câmara de Scholander-Hammel) é um dos dispositivos mais utilizados para mensuração da condição hídrica diretamente nas plantas (Yang et al., 2016). Ela vem sendo utilizada amplamente em milhares de artigos por cientistas que atuam na área vegetal, desde fisiologistas a ecologistas (Ding et al., 2014).

Existem algumas dificuldades associadas ao uso da câmara de pressão, sobretudo em situações de campo e produção. Uma delas diz respeito ao próprio aparato, que necessita de um cilindro de nitrogênio em gás para pressurizar as amostras, trazendo um grande volume e peso ao conjunto, o que dificulta o uso em áreas de plantações com relevo irregular ou que tenha difícil acesso a pequenos veículos. No entanto, o maior entrave é a grande dificuldade dos operadores de identificar o momento correto onde é encontrada a pressão hidrostática necessária para que a água apareça na superfície de corte do pecíolo, o chamado "*endpoint*". Trata-se de trabalho de atenção e que demanda uma boa experiência, além de boa acuidade visual. Não é raro se observar na literatura os problemas associados à leitura visual do *endpoint* nas câmaras de pressão. Os problemas e dificuldades associados à identificação do *endpoint*, o que compromete as medições já foram abordados na literatura, nos trabalhos de Fulton et al. (2014), Levin (2019) e Shackel (2020).

A dificuldade para a identificação do *endpoint* no uso da câmara de pressão de Scholander para medidas de potencial hídrico em folhas é motivo de grande dificuldade e também causadora de erros (Levin, 2019). Adicionalmente, há o problema da segurança do operador observador, que precisa colocar o olho logo acima do selo de vedação da câmara, para observação do pecíolo. Mesmo que ele esteja utilizando material de proteção adequado, há sempre o risco de ser atingido no olho por partículas de tecido vegetal ou impurezas, que porventura possam ser expelidas durante a pressurização (Fulton et al., 2014).

O objetivo deste trabalho é desenvolver uma solução integrada (hardware e software) para auxiliar o trabalho em campo com a câmara de pressão de Scholander, no intuito de facilitar as medições, registrando-as em gravações de áudio e vídeo junto às informações de pressão, para que possam ser revisadas sempre que for necessário, situação que ganha ainda mais relevância, sobretudo quando as medidas são realizadas em condições de baixa visibilidade.

## MATERIAL E MÉTODOS

### Caracterização do problema

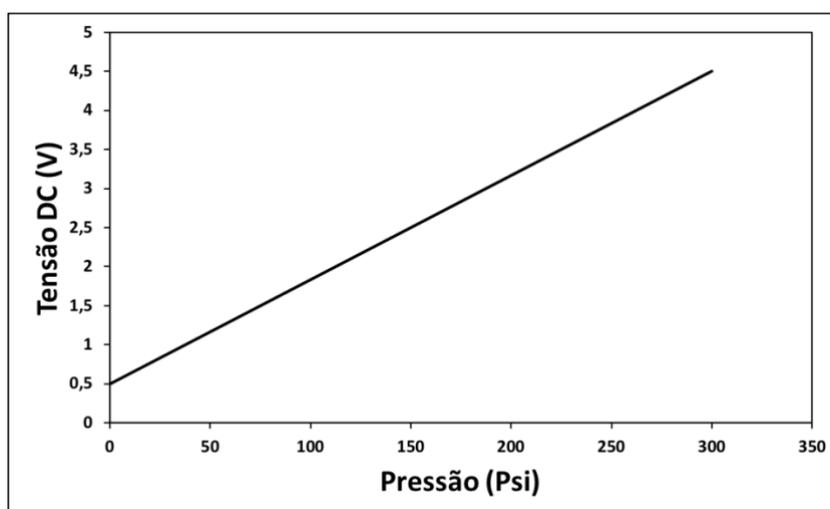
Constatados os problemas associados ao uso da câmara, buscou-se criar uma solução integrada, contendo dispositivos de hardware (sensores, coletores de dados, módulos de transmissão de dados) e software (programa computacional para o hardware adicional e módulo móvel para visualização dos resultados e registro das informações).

### Alterações na Câmara de Pressão

Para a solução do problema caracterizado anteriormente, faz-se necessário a adição de alguns componentes ao circuito da câmara de pressão, que normalmente vem equipada com manômetros analógicos para medidas de pressão. São componentes altamente confiáveis e robustos, mas que infelizmente não podem ser utilizados por não proporcionar uma interface apta, normalmente digital, para captura e utilização dos dados oriundos dele. Qualquer alteração nesse

dispositivo para tentar captar algum tipo de sinal poderia ser destrutiva, de forma que esse dispositivo fosse inutilizado isoladamente.

Dessa forma foi planejada a substituição do manômetro original, que embora apresentasse o resultado de forma digital, em um display de cristal líquido, não dispunha de uma interface para aquisição dos dados medidos. Para isso, foi acoplado um transdutor de pressão, com capacidade de medir pressões até 300 psi (2,068 MPa), com acurácia de 0,5% na leitura com a escala completa (FS), classe de proteção IP67 (poeira e imersão em água) e tempo de resposta <1 milissegundo, valores considerados suficientes para uso regular nas culturas normalmente trabalhadas no Leag-CCTA (Laboratório de Engenharia Agrícola) da Uenf. Esse transdutor é alimentado com uma tensão em corrente contínua de 5V e provê uma resposta linear ao aumento de pressão, oferecendo uma tensão mensurável de saída, que nos dá o valor da pressão relativa, conforme visto na figura 1.

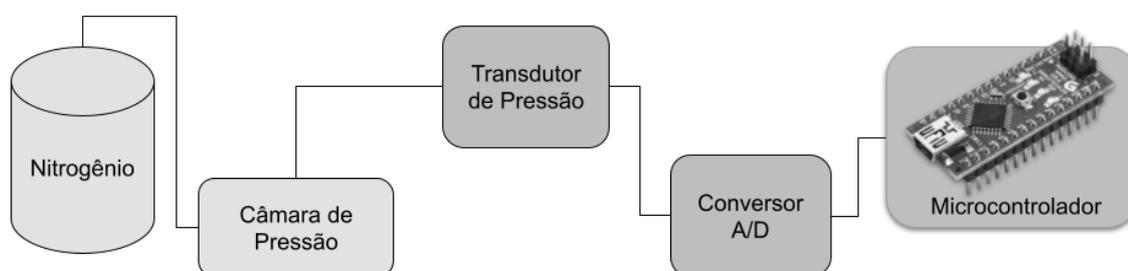


**Figura 1:** Gráfico de resposta do transdutor de pressão. Fonte: o autor (2021).

Para maior estabilidade da leitura, o transdutor de pressão foi acoplado a um circuito conversor analógico/digital (A/D) externo, o que permite uma estabilidade maior na leitura de valores, diminuindo a quantidade de ruídos na pressão medida. O conversor escolhido tem resolução/precisão de 16 bits, 4 canais independentes de leitura e é alimentado pela mesma tensão (5V) do transdutor de pressão, podendo compartilhar a mesma fonte de energia. Ele também apresenta

baixíssimo consumo de corrente, na ordem de  $150\mu\text{A}$ , e com desligamento automático quando em desuso. Outra característica interessante do conversor A/D escolhido é a disponibilidade de um amplificador de ganho programável (PGA), que permite amplificar, via programação, os baixos sinais analógicos recebidos e aumentar a faixa de trabalho do conversor.

Para tratar os dados recebidos, foi utilizado um microcontrolador da família Arduino, o Arduino Nano, dispositivo reconhecido por seu tamanho reduzido, baixo custo de aquisição, baixo consumo de energia e razoável poder de processamento. Ele conta com um processador ATmega328 com clock de 16Mhz, 32KB de memória Flash, 8 pinos de entrada analógica, 22 pinos digitais e consumo de apenas 19mA (Arduino, 2021). Este mesmo microcontrolador foi utilizado para o coletor de dados customizado que também foi desenvolvido neste trabalho. O diagrama da montagem da adaptação pode ser visto na figura 2.



**Figura 2:** Diagrama de funcionamento da alteração na câmara de pressão. Os dispositivos em azul claro são originais; os dispositivos em verde foram acrescentados à montagem da câmara. Fonte: o autor (2021).

A adição do transdutor de pressão com o conversor A/D e o controlador foram calibradas com um manômetro analógico existente em uma câmara de pressão modelo PWSC 3000 de fabricação da SoilMoisture, para verificar a precisão da alteração realizada. Não foram necessários ajustes de compensação via software.

## Coletor de dados

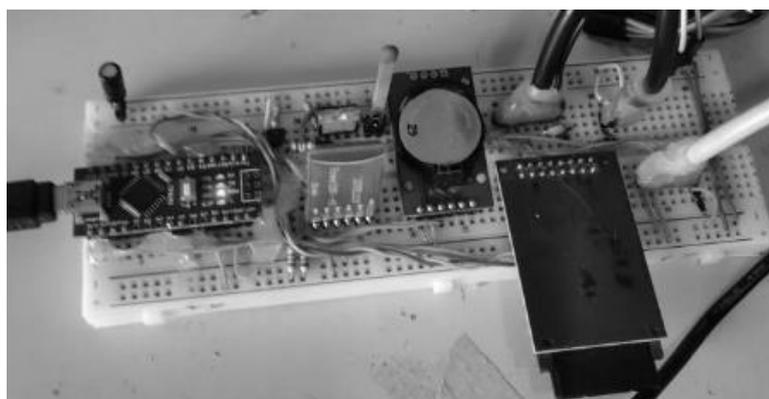
Para a coleta e tratamento dos dados recebidos da câmara de pressão, foi construído especificamente para este trabalho um coletor de dados (*datalogger*) customizado, em uma placa de prototipagem, utilizando o microcontrolador Arduino Nano citado anteriormente. Foi montada uma fonte de energia ajustável com tensões de saída de 5V e 3V e 700mA em corrente contínua, responsáveis por alimentar todo o circuito, incluindo o transdutor de pressão e o conversor A/D acoplado à câmara de pressão. A fonte interna do circuito permite que a alimentação externa varie de 6,5V a 12V, sem alterações significativas em suas tensões de saída, podendo ser utilizado inclusive com bateria de 9V, aumentando ainda mais a mobilidade do conjunto, eliminando a dependência de se utilizar tomadas.

Um módulo RTC (*real time clock*) foi incluído no conjunto. Esse módulo permite que o coletor mantenha suas configurações de data e hora atualizadas, mesmo que não esteja sendo utilizado. Eles são baseados no circuito integrado DS1307 e um cristal oscilador. Trata-se de uma forma confiável de manter data e hora atuais, mesmo durante longos períodos de interrupção de energia (Almeida, 2012). Ele mantém o oscilador ativo o tempo todo por meio do uso de uma bateria modelo CR2032 de 3V.

O coletor de dados foi equipado também com um módulo Bluetooth HC-06, para transmissão. Este módulo é operado em Classe 2 (alcance de até 10 metros), utilizando os protocolos USB v1.1/2.0 e transmissão serial via protocolo RS-232. O módulo é compatível com a maioria dos microcontroladores do mercado e possui facilidade de pareamento com uma ampla gama de smartphones. Este módulo garante a troca de dados entre o coletor e um smartphone, permitindo dessa maneira o fácil compartilhamento das informações registradas através de um aplicativo móvel próprio, desenvolvido para esta finalidade, o que será tratado nos próximos tópicos. De todo modo, para aumentar a segurança e a disponibilidade dos registros, um módulo para gravação de dados utilizando cartões de memória removível do tipo SD (*Secure Digital*) foi integrado ao coletor de dados, como forma de persistência dos dados coletados.

Há também no coletor de dados construído uma seção específica para aquisição de dados de sensores de fluxo de seiva e uma fonte de corrente constante para aquecimento de resistências, desenvolvidos em paralelo a esse

trabalho. Os dados do fluxo de seiva também são enviados ao aplicativo desenvolvido para dispositivos móveis via *bluetooth*, juntamente aos dados do transdutor de pressão. Na figura 3, observa-se o protótipo inicial do coletor de dados desenvolvido.

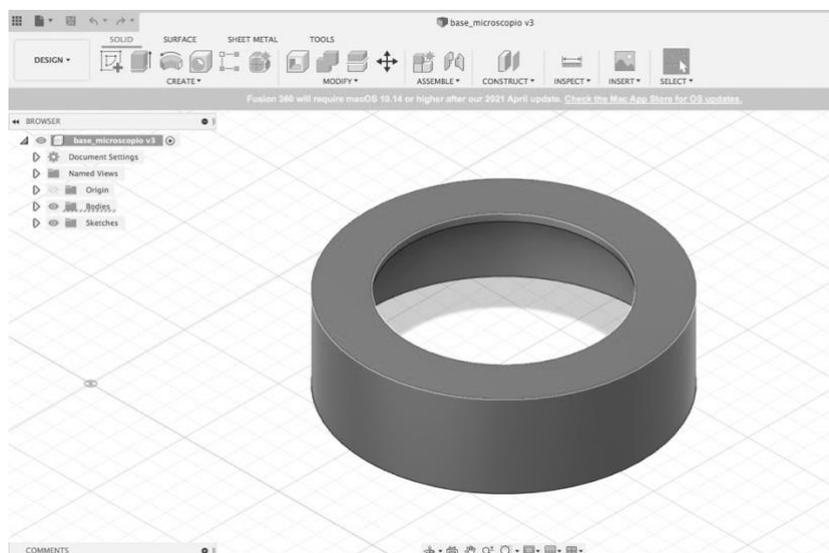


**Figura 3:** Protótipo inicial do coletor de dados desenvolvido. Fonte: o autor (2021).

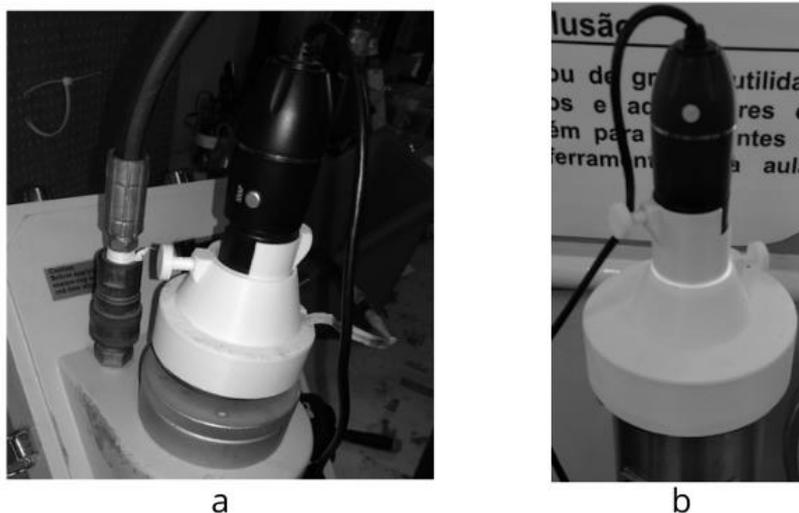
#### Adaptações para visualização do *endpoint*

Para melhor visualização dos pecíolos das amostras de folhas a serem testadas na câmara de pressão, foi desenvolvido um aparato para acoplar uma câmera UVC (*USB Video Camera*) na parte superior da tampa e do selo da câmara de pressão. A ideia era poder visualizar a superfície do corte transversal do pecíolo de forma clara, de modo a facilitar a identificação do *endpoint*. A câmera UVC utilizada possui iluminação com 8 LED. controle de intensidade luminosa através de um controle manual do tipo *dimmer* e possibilidade de ajuste de foco e ampliação.

Foi realizado o trabalho de modelagem em software Autodesk Fusion 3D para um modelo de suporte para a câmera UVC, que foi impresso em uma impressora 3D FDM DaVinci Pro, com filamento de ABS branco. Um dos requisitos projetados foi a possibilidade de ajuste de altura da câmera, para facilitar o ajuste de um melhor foco. A etapa de modelagem pode ser verificada na figura 4 e o artefato impresso e já em utilização na figura 5.



**Figura 4:** Etapa de modelagem 3D para construção do artefato de suporte à visualização com câmera UVC. Fonte: o autor (2021).



**Figura 5:** Artefato de apoio para câmera UVC já construído e em operação. a) Acoplado em uma câmara de pressão modelo ELE. b) Acoplado em uma câmara de pressão Soilmoisture. Fonte: o autor (2021).

#### Software Coletor de Dados

O software para o coletor de dados construído foi desenvolvido na plataforma IDE Arduino, padrão utilizado para desenvolvimento de softwares para circuitos microcontrolados dessa família de dispositivos. Foi necessário adicionar bibliotecas dos fabricantes para utilização dos componentes adicionados, tais como

módulo *bluetooth* HC-06, módulo RTC DS-1307 e módulo de gravação de dados em cartão de memória SD.

### Software Mobile Pressure

Para alcançar os objetivos planejados, foi projetado e desenvolvido um software para utilização em dispositivos móveis (smartphones ou tablets) para integrar ao hardware construído e adaptado à câmara de pressão.

Como metodologia de desenvolvimento, infelizmente não há nenhuma específica destinada ao uso de desenvolvedores solo, de modo que se optou por adotar um método derivado do Scrum, adaptado para o trabalho com apenas um desenvolvedor. Dessa forma, foi estipulado o fluxo similar ao proposto por Pagotto et al. (2016), que definiu uma estratégia com *sprints* mais curtos (uma semana), sem a necessidade de reuniões diárias, mantendo as entregas e revisões tradicionais ao Scrum, conforme figura 6.



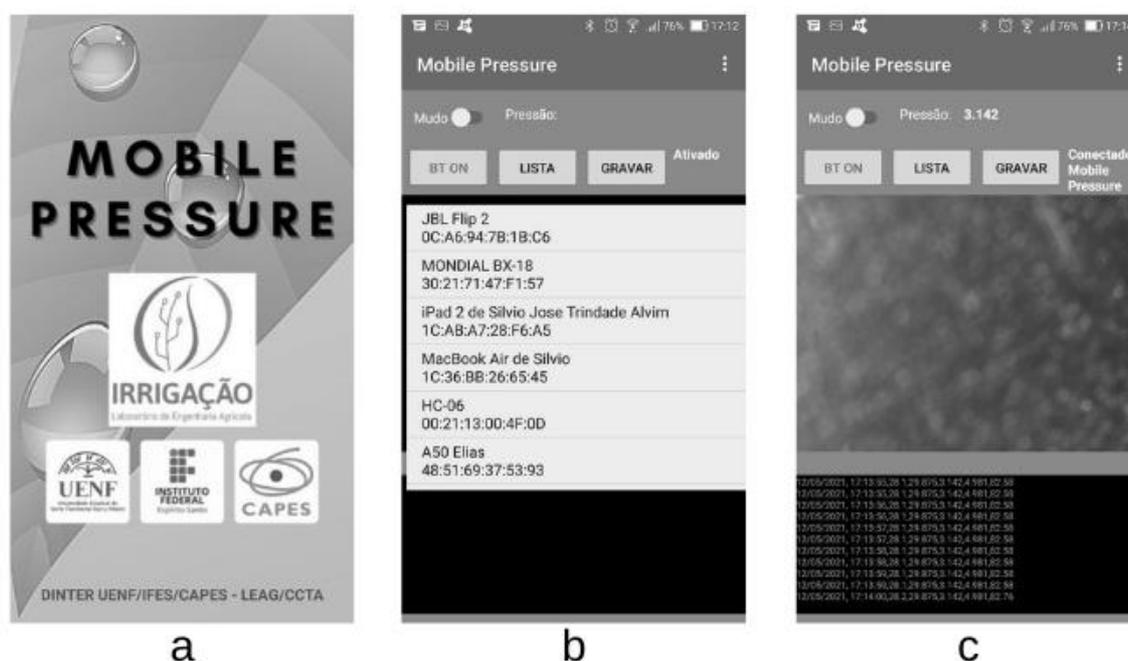
**Figura 6:** Scrum solo, adaptado para trabalho com desenvolvedor único. Fonte: Pagotto et al. (2016).

Foi escolhido a plataforma Android, que é o sistema operacional para dispositivos móveis mais utilizada hoje no mundo, respondendo por uma fatia de mercado global na faixa de 74,44%, em dados de 09/2020 (StatCounter, 2020).

O ambiente de desenvolvimento Android Studio IDE foi o escolhido para desenvolvimento do software, já que é o padrão para desenvolvimento nessa plataforma, com amplo suporte e documentação. A linguagem utilizada foi o Java, que é considerada a linguagem nativa para desenvolvimento no Android, também sendo um dos padrões mais sólidos do mercado de software, sendo a segunda linguagem de programação mais utilizada no mundo, conforme o índice TIOBE (Tiobe, 2021).

A plataforma Android não disponibiliza comunicação nativa com câmeras UVC, de modo que foi preciso construir uma solução customizada, a partir de bibliotecas de código aberto disponibilizadas em repositórios de software, para que a câmera pudesse trabalhar de forma adequada nos dispositivos móveis com o software desenvolvido.

Abaixo, na figura 7, imagens da aplicação em funcionamento em um smartphone:

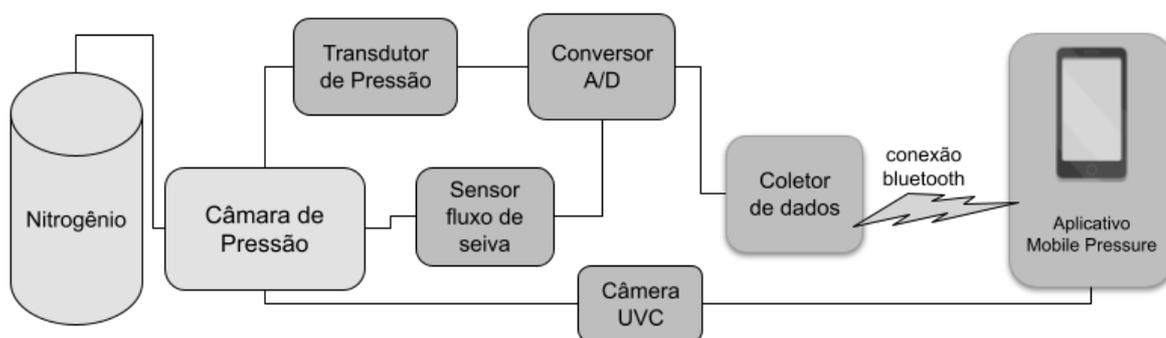


**Figura 7:** Telas do aplicativo desenvolvido. a) Tela de abertura; b) Tela de conexão/pareamento *bluetooth*; c) Versão em produção (estável), apresentando dados de sensor de fluxo de seiva na parte de baixo da tela. Fonte: o autor (2021).

Para avaliação da usabilidade e utilidade, foi adotado a metodologia SUS (*System Usability Scale*) como instrumento de avaliação e validação para o software móvel. Trata-se de metodologia já bastante sedimentada no campo de desenvolvimento de software, composta por 10 questões de rápida resposta. Para preservar o conteúdo do questionário, foi realizada uma tradução reversa para a língua portuguesa, como proposto por Tenório et al. (2011). As questões foram traduzidas para a língua portuguesa e, a seguir, um tradutor profissional realizou a tradução para a língua inglesa, para efeitos de comparação e para garantir a manutenção do significado e estrutura do texto, o mais próximo possível do texto original. Foi utilizada em conjunto também a escala proposta pela metodologia NPS (*Net Promoter Score*) como forma de aferir a aderência e fidelização proporcionada pelo aplicativo móvel desenvolvido. De acordo com Sauro e Lewis (2016), há uma forte correlação positiva entre os valores de SUS e NPS, de modo que os resultados obtidos nessas escalas devem ser analisados em conjunto, como forma de validação.

A fim de verificar o grau de consistência interna das respostas dos alunos na referida escala SUS e verificar o comportamento de seus componentes, utilizou-se a análise de confiabilidade com o cálculo do coeficiente alfa de Cronbach (Quintino et al., 2000; Pereira et al., 2017).

O esquema da solução final, integrando o hardware desenvolvido e adaptado com o software criado especificamente para esta finalidade está exposto conforme a figura 8, abaixo:



**Figura 8:** Esquema final da solução, integrando hardware e software. Fonte: o autor (2021).

## RESULTADOS E DISCUSSÕES

As primeiras versões do coletor de dados contavam com dois módulos *bluetooth* distintos, um para transmitir os dados oriundos do transdutor de pressão e outro responsável por enviar dados de sensores de fluxo de seiva. Para efeitos de simplificar o circuito utilizado, optou-se por utilizar apenas um módulo *bluetooth* e enviar todos os dados diretamente ao aplicativo através de uma única conexão, eliminando com isso a necessidade de um dos módulos, simplificando o circuito, diminuindo seu consumo de energia e também seu custo de montagem final.

O aplicativo se mostrou estável nos testes realizados, gravando os vídeos e áudios dos experimentos desenvolvidos no Leag sem maiores percalços, apresentando funcionamento aceitável. Com a possibilidade de se rever o vídeo do momento da pressurização, todos os operadores se sentiram mais confortáveis e seguros de apontar o momento do *endpoint* com mais clareza, o que pode ser feito inclusive em conjunto, mostrando o vídeo para operadores mais experientes, que podem contribuir também no treinamento de futuros usuários da câmara de pressão, mesmo que estes não venham a fazer uso do aplicativo.

O custo de montagem do conjunto demonstra que sua implementação pode ser muito atrativa do ponto de vista financeiro, com possibilidades de se adaptar às câmaras de pressão convencionais já utilizadas sem grandes dificuldades, visto que todos os materiais e componentes utilizados são de fácil aquisição. Os benefícios se tornam ainda mais concretos e evidentes quando se observa os valores cobrados hoje no mercado nacional para uma câmara de pressão. Como os instrumentos são importados, sofrem os efeitos da taxa de câmbio desfavorável a quem compra, e com isso os valores de uma câmara oscilam de R\$ 50.000,00 a R\$ 70.000,00 para compra no país, através de representantes dos fabricantes. No Quadro 1 abaixo, uma estimativa com os custos aproximados dos materiais utilizados no desenvolvimento da solução, não incluindo a câmara de pressão e o cilindro de nitrogênio.

**Quadro 1:** Lista de materiais e custo para construção do hardware para a solução integrada, cotação em março/2021

ITEM	QUANT.	VR. UNIT.	TOTAL
Transdutor de Pressão 300 psi	1	R\$ 145,00	R\$ 145,00
Arduino Nano	1	R\$ 40,00	R\$ 40,00
Módulo RTC DS1307	1	R\$ 18,00	R\$ 18,00
Módulo Bluetooth HC-06	1	R\$ 35,00	R\$ 35,00
Módulo SD Card	1	R\$ 17,00	R\$ 17,00
Fonte ajustável	1	R\$ 15,00	R\$ 15,00
Conversor A/D	1	R\$ 40,00	R\$ 40,00
Transistores diversos	1	R\$ 10,00	R\$ 10,00
Resistores SMD	1	R\$ 10,00	R\$ 10,00
Termistores SMD	1	R\$ 10,00	R\$ 10,00
Fios, placas, conectores, solda e cola	1	R\$ 60,00	R\$ 60,00
Câmera UVC	1	R\$ 98,00	R\$ 98,00
Artefato suporte impressão 3D	1	R\$ 15,00	R\$ 15,00
Cabo OTG para smartphone	1	R\$ 10,00	R\$ 10,00
<b>TOTAL</b>			<b>R\$ 523,00</b>

Fonte: o autor (2021).

Com o quadro acima, observa-se que o custo com material é extremamente baixo (R\$ 523,00) o que demonstra a total viabilidade financeira da solução proposta, considerando que os custos com as adaptações giram próximos a 2% do valor de aquisição de uma câmara convencional, há razões de sobra para promover as adaptações. O ganho em precisão de identificação do *endpoint*, o registro em vídeo e áudio das medições para análise posterior, a possibilidade de se agrupar outros sensores às medidas, tais como fluxo de seiva, temperatura e umidade, fazem parte das razões técnicas favoráveis às adaptações. Somando a isso o fator pecuniário, com necessidade de pouco aporte para grandes benefícios, torna-se extremamente recomendável a utilização da solução integrada.

A metodologia adotada para desenvolvimento, o Scrum solo, se mostrou adequada ao conseguir gerar em pouco tempo de desenvolvimento um aplicativo estável, cumprindo todos os requisitos funcionais (comunicação com coletor de dados via *bluetooth*, utilização da câmera UVC, gravação dos vídeos com camada de overlay contendo data e pressão, entre outros) de forma plena e satisfatória.

O software para dispositivo móvel Mobile Pressure possui uma interface simples, de manuseio altamente intuitivo. Para validar sua usabilidade foi aplicada a metodologia SUS (*System Usability Scale*), que permite avaliar diversos aspectos de um determinado software.

Em relação à avaliação de usabilidade, a metodologia SUS foi escolhida por tratar-se de um instrumento relativamente simples, constituído por um pequeno número de questões de respostas rápidas. Apesar da aparente subjetividade das questões, ele nos indica adequadamente o nível de satisfação do usuário.

O questionário foi aplicado aos usuários imediatos do sistema. Apesar da amostra restrita, o resultado foi relevante e mostrou potencial aderência ao sistema. O valor obtido para o SUS-score foi de 90,31 pontos (>80,3: excelente), o que demonstra de forma inequívoca os acertos nas escolhas das funcionalidades e no design de usabilidade. Aliado à métrica proposta pelo NPS, que atingiu o escore de 86 pontos (entre 75 e 100: excelente), verifica-se novamente o êxito do projeto, o que demonstra um caminho muito promissor para próximas versões.

Para atestar a confiabilidade dos dados obtidos nos questionários aplicados, utilizou-se o coeficiente alfa de Cronbach. Como pode-se observar no Quadro 2, o valor obtido para esse coeficiente foi de 0,71, caracterizando a amostra com tendo um nível razoável de confiabilidade, (> 0,70) considerado como limite para uma confiabilidade aceitável (Sauro e Lewis, 2016).

**Quadro 2:** Resumo da análise sobre a usabilidade do aplicativo

NPS	SUS	Desvio Padrão	Confiabilidade da amostra (a)
86	90,31	7,75	0,71

Fonte: o autor (2021).

O instrumento de avaliação SUS foi idealizado como *quick and dirty* (Padrini-Andrade et al., 2019), ou seja, um instrumento criado para avaliação inicial, visando identificar possíveis inconsistências no sistema de forma rápida. À medida que o número de usuários aumente, caso seja percebida a necessidade de

identificação mais detalhada de algumas características, outros instrumentos e métodos deverão ser adotados.

Para verificar individualmente alguns quesitos importantes atestados pela metodologia, foi utilizada a relação proposta por Tenório et al. (2011) entre os componentes de qualidade indicado por Nielsen e as questões do SUS, numa escala de amplitude de 0 a 4:

- **Facilidade de aprendizagem:** está representada nas questões 3, 4, 7 e 10 do SUS. A média do resultado destas questões é 3,47.
- **Eficiência do sistema:** os itens 5, 6 e 8 estão relacionados à eficiência do Sistema. Analisando a média destas questões obtivemos 3,71.
- **Identificar inconsistências do sistema:** as inconsistências ou minimização dos erros são medidas através da questão 6. Neste item, o score SUS foi 3,88.
- **Avaliar a facilidade de memorização:** a facilidade de memorização é avaliada pela questão 2, o score de 3,75 demonstra satisfação em relação a este item.
- **Verificar a satisfação dos usuários:** a satisfação dos usuários está representada pelos itens: 1, 4, 9. A média destas questões foi 3,54.

## RESUMOS E CONCLUSÕES

Com o objetivo construir uma solução integrada para auxiliar no uso de câmaras de pressão convencionais, o presente trabalho dividiu suas atividades em duas etapas distintas, uma direcionada ao hardware (adaptação da câmara, instalação de sensores, coletor de dados, suporte da câmera UVC) e software (programa do coletor de dados e aplicativo móvel). Posteriormente, foi realizada a validação do aplicativo móvel perante os usuários da solução utilizando métricas específicas à avaliação de software.

A solução de hardware foi desenvolvida de forma incremental, incluindo as funções desejadas no equipamento convencional e construindo um coletor de dados customizado, que pudesse ser confiável para ser utilizado tanto em condições de laboratório quanto de campo. O aparato desenvolvido atendeu

plenamente às expectativas, fornecendo um meio simples e robusto para armazenamento das informações, além de servir como ponte para transmissão de dados ao aplicativo móvel, utilizando conexões *bluetooth* de forma eficiente. Foi dado ênfase na redundância de dados, armazenados tanto no coletor customizado, em cartões de memória, quanto no aplicativo móvel, em arquivos *csv* (*comma separated values*).

As adaptações para medição de pressão e uso da câmera UVC funcionaram de forma satisfatória, proporcionando segurança ao operador, que pode consultar seu trabalho *a posteriori*, utilizando os vídeos, sem necessidade de se preocupar de ter perdido o *endpoint*, ou ter anotado de maneira errônea.

O aplicativo móvel foi desenvolvido utilizando a metodologia Scrum solo, que se mostrou adequada, gerando versões preliminares a cada *sprint* e um produto final que atende ao *product backlog* estipulado no início da empreitada, cumprindo todos os seus requisitos funcionais.

Na métrica de fidelidade NPS, o valor de pontuação atingido (86 pontos) caracteriza a solução proposta como “excelente” perante seus usuários. Quanto à usabilidade do aplicativo móvel, a avaliação pela metodologia SUS atingiu 90,31 pontos, caracterizando como “excelente” na escala proposta por Sauro e Lewis (2016). Em todos os quesitos separados da escala SUS (aprendizagem, eficiência, erros, memorização e satisfação) o software atingiu valores acima de 70% da escala sugerida, demonstrando o êxito do projeto proposto. Os questionários aplicados tiveram sua confiabilidade testada pelo coeficiente alfa de Cronbach, atingindo o valor de 0,71, demonstrando ser um instrumento confiável.

Dentre as demandas detectadas podemos destacar as possibilidades de melhoria da solução no que diz respeito à parametrização nos dois lados do software, tanto no software que equipa o coletor de dados, quanto ao software do dispositivo móvel. Essa parametrização iria permitir que o usuário pudesse inserir novos sensores diretamente no circuito e receber seus dados no aplicativo móvel durante as medições, sem necessidade de recompilação dos softwares, com as alterações funcionando em tempo de execução (*runtime*). Outra boa possibilidade de melhoria e que já está em andamento, diz respeito à adição, no aplicativo, de uma camada de inteligência artificial, para identificação do *endpoint* através de estratégias de visão computacional, dispensando a análise visual do operador.

Como forma de reforçar a avaliação da solução integrada desenvolvida, para os próximos trabalhos pretende-se implementar cópias dos instrumentos criados para uso em outros laboratórios e em análises de campo, no intuito de aumentar o público utilizador do mesmo. Isso irá fornecer maiores retornos e opiniões, para que se possa aprimorar a solução proposta de forma contínua.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Almeida, A. C. S. (2012) *Desenvolvimento de um controlador de irrigação acionado mecanicamente pela tensão da água no solo*. Tese de Doutorado – Piracicaba - SP, Universidade de São Paulo, 96p.
- Arduino. Arduino Nano - Tech Specs. Disponível em: <<https://store.arduino.cc/usa/arduino-nano>>. Acessado: 10/outubro/2020.
- Berilli, S. da S. (2017) *Desenvolvimento de Instrumentação para Monitorar o Potencial Hídrico Foliar*. Dissertação (Mestrado em Produção Vegetal) – Campos dos Goytacazes - RJ, Universidade Federal Norte Fluminense Darcy Ribeiro, 71p.
- Ding, Y.; Zhang, Y.; Zheng, Q.-S.; Tyree, M. T. (2014) Pressure-volume curves: revisiting the impact of negative turgor during cell collapse by literature review and simulations of cell micromechanics. *New Phytologist*, v. 203, n. 2, p. 378–387, jul. 2014. Disponível em: <<http://doi.wiley.com/10.1111/nph.12829>>. Acessado: 10/06/2020. doi: 10.1111/nph.12829.
- Fulton, A.; Grant, J.; Buchner, R.; Connell, J. (2014) Using the Pressure Chamber for Irrigation Management in Walnut, Almond, and Prune. *ANR Publication 8503 University of California*, May. 1-27.
- Levin, A. D. (2019) Re-evaluating pressure chamber methods of water status determination in field-grown grapevine (*Vitis* spp.). *Agricultural Water Management*, v. 221, n. May, p. 422–429. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.agwat.2019.03.026>>. doi: 10.1016/j.agwat.2019.03.026.
- Padrini-Andrade, L.; Balda, R. D. C. X.; Bandiera-Paiva, P.; Nunes, M. D. V.; Guinsburg, R.; Testoni, D.; Meneses, J.; Perussi-e-Silva, R.; Bomfim, O. (2019) Avaliação da usabilidade de um sistema de informação em saúde neonatal segundo a percepção do usuário. *Scopus*.
- Pagotto, T.; Fabri, J. A.; Lerario, A.; Goncalves, J. A. (2016) Scrum solo: Software process for individual development., [S.l.]: *IEEE*, jun. 2016. p. 1–6. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/7521555/>>.

- Pereira, R. V. S.; Kubrusly, M.; Marçal, E. (2017) Desenvolvimento, Utilização e Avaliação de uma Aplicação Móvel para Educação Médica: um Estudo de Caso em Anestesiologia. *Renote*, v. 15, n. 1, p. 1–10, doi: 10.22456/1679-1916.75104.
- Quintino, C.; Guedes, T.; Martins, A. (2000) Análise estatística das atitudes dos alunos de iniciação científica da Universidade Estadual de Maringá , em relação à disciplina Estatística. *Acta Scientiarum*, p. 1523–1529.
- Sauro, J.; Lewis, J. R. (2016) *Quantifying the User Experience: Practical Statistics for User Research*. 2ª Edição ed. Cambridge, EUA: Elsevier, 354p.
- Shackel, K. Using the Pressure Chamber. . Disponível em: <[http://fruitsandnuts.ucdavis.edu/pressure\\_chamber\\_operation/](http://fruitsandnuts.ucdavis.edu/pressure_chamber_operation/)>. Acessado: 25/outubro/2020.
- StatCounter. Mobile Operating System Market Share Worldwide. . Disponível em: <<https://gs.statcounter.com/os-market-share/mobile/worldwide>>. Acessado: 25/outubro/2020.
- Steduto, P.; Hsiao, T. C.; Fereres, E.; Raes, D. (2012) *Crop yield response to water*. Roma: FAO, 505p.
- Tenório, J. M.; Cohrs, F. M.; Sdepanian, V. L.; Pisa, I. T.; Marin, H. D. F. (2011) Desenvolvimento e Avaliação de um Protocolo Eletrônico para Atendimento e Monitoramento do Paciente com Doença Celíaca. *Revista de Informática Teórica e Aplicada*, v. 17, n. 2, p. 210, doi: 10.22456/2175-2745.12119.
- Tiobe. TIOBE Index for April 2021. . Disponível em: <<https://www.tiobe.com/tiobe-index/>>. Acessado: 15/abril/2021.
- Yang, D.; Pan, S.; Tyree, M. T. (2016) The impact of xylem cavitation on water potential isotherms measured by the pressure chamber technique in *Metasequoia glyptostroboides* Hu & W.C. Cheng. *Journal of Experimental Botany*, v. 67, n. 15, p. 4571–4580, doi: 10.1093/jxb/erw234.

### 3.2 APLICAÇÃO DE ESTRATÉGIAS DE INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL EM ESTUDOS DE MANEJO DA IRRIGAÇÃO: UMA REVISÃO SISTEMÁTICA

#### RESUMO

O objetivo do presente estudo foi analisar o cenário atual da adoção de técnicas de Inteligência Artificial (IA) no gerenciamento de irrigação e no uso de dados de sensores eletrônicos. Uma revisão bibliográfica sobre a aplicação das estratégias de IA nas atividades de manejo da irrigação foi realizada usando a técnica de Revisão Sistemática da Literatura (RSL), com critérios explícitos de busca. Mais de 45 mil títulos completos em 130 bases de referência foram consultados de uma só vez e foram selecionados 38 estudos primários, que formaram a base da presente revisão. Foi possível verificar, entre outras abordagens, o crescente uso de Redes Neurais Artificiais (RNA) alimentadas com dados de sensores de parâmetros climáticos e do solo, para compor soluções de gerenciamento de irrigação. As RNAs têm sido a escolha mais recorrente para soluções que exigem aprendizado de máquina. As tecnologias baseadas em lógica *fuzzy* se destacaram nos Sistemas de Suporte à Decisão (SSD). As abordagens híbridas *neuro-fuzzy* gerenciam os melhores aspectos contidos em cada uma das duas técnicas (RNA e lógica *fuzzy*). Existe uma clara predominância do uso de sensores autônomos sem fio e interconectados em rede. Boas possibilidades de desenvolvimento de soluções para o gerenciamento da irrigação agrícola apontam para a crescente aplicação de aprendizado de máquina baseado em RNA, Máquina Vetor de Suporte (SVM) e

florestas aleatórias, com o uso de redes de sensores sem fio e visão computacional baseadas em imagens de sensoriamento remoto.

## ABSTRACT

The aim of the present study was to analyze the current scenario of Artificial Intelligence (AI) techniques adoption in irrigation management and in the use of electronic sensor data. A bibliographic review on the AI strategies application in irrigation management activities was carried out using the Systematic Literature Review (SLR) technique with explicit search criteria. More than 45 thousand complete titles in 130 reference bases were consulted at once and 38 primary studies were selected, which formed the basis for the present review. It was possible to verify, among other approaches, the growing use of Artificial Neural Networks (ANN) fed with data from climate and soil parameters sensors, to compose irrigation management solutions. ANNs have been the most recurrent choice for solutions that require machine learning. Technologies based on fuzzy logic stood out in Decision Support Systems (SSD). Hybrid neuro-fuzzy approaches combine the best aspects contained in each of the two techniques (ANN and fuzzy logic). There is a clear predominance of the use of autonomous wireless sensors, interconnected in a network. Good possibilities of developing solutions for agriculture irrigation management point to the increasing application of machine learning based on ANN, Support Vector Machine (SVM) and Random Forest, with use of wireless sensor networks and computer vision based on remote sensing images.

## INTRODUÇÃO

A irrigação é uma das tecnologias aplicadas na agricultura que mais tem contribuído para o aumento na produção de alimentos. Sobre o termo manejo de irrigação, entende-se por determinar quando irrigar e a quantidade de água a ser utilizada em cada estágio de crescimento da planta. O objetivo primário desse

gerenciamento é maximizar a produtividade sem comprometer o meio ambiente (Cao, 1992).

Os métodos de irrigação e seu manejo se tornam críticos principalmente em áreas agrícolas situadas nas regiões áridas e semiáridas do planeta, onde a água é escassa. O uso de estratégias inteligentes de irrigação para aplicação de água no momento e em quantidade corretas é fundamental para uma boa performance de crescimento da planta e consequente boa produtividade (Gu et al., 2017).

O uso de sensores para obter valores de umidade do solo, umidade do ar, temperatura, radiação solar, pressão atmosférica entre outras grandezas já é uma realidade plenamente sedimentada na abordagem de gerenciamento da irrigação. Posto isso, métodos inteligentes para estimar o estresse hídrico de plantas e realizar o acionamento imediato dos sistemas de irrigação de forma automatizada são sempre importantes, uma vez que irá culminar em economia de água e no manejo adequado de um determinado cultivo.

## Inteligência artificial

O termo inteligência artificial (IA) é muito amplo, e foi introduzido pela primeira vez por McCarthy, em 1956, ao organizar uma conferência no Dartmouth College (Fazel Zarandi et al., 2020). De acordo com Luger (2013), a “inteligência artificial pode ser definida como o ramo da ciência da computação que se ocupa da automação do comportamento inteligente”. Foge ao escopo da presente revisão emitir considerações sobre as possíveis definições do termo “comportamento inteligente”, no entanto grande parte das definições de IA incluem a ideia de solucionar problemas com a utilização de máquinas e programas que simulam os processos cognitivos humanos (Norvig e Russell, 2013). Dentre as técnicas e abordagens comumente utilizadas em IA, destacam-se a lógica *fuzzy*, os sistemas especialistas e os algoritmos de aprendizado de máquina, como as redes neurais.

## Lógica *fuzzy*

A implementação de sistemas com lógica *fuzzy* (ou nebulosa) é utilizada em diversas áreas, tais como automação industrial, robótica, processamento de imagens e sistemas de apoio à decisão. Os sistemas *fuzzy* são um tipo de sistema

especialista que utilizam uma base de conhecimento na forma de um banco de regras. O princípio fundamental da lógica *fuzzy*, o da dualidade, estabelece que dois eventos opostos coexistem. Isto é, um elemento pode pertencer, em certo grau, a um conjunto e, em outro grau, a outro conjunto (Maia, 2007). Indo além dos sistemas binários comumente adotados na matemática discreta, a lógica *fuzzy* prevê graus de pertinência, ou graus de verdade, para as coisas. Dessa forma, segundo Marro et al. (2010), na “lógica *fuzzy* um elemento pertence a um conjunto com um certo grau, fazendo com que uma determinada sentença possa ser parcialmente verdadeira e parcialmente falsa”. Assim posto, um software dotado de regras de inferência *fuzzy* pode ser utilizado em situações que necessitam de ajustes mais precisos, não sendo apenas um sistema classificatório binário, mas permitindo ao sistema “pensar” nos moldes de incerteza e raciocínio aproximado, tipicamente associados ao comportamento humano.

No entanto, sistemas *fuzzy*, por sua natureza estática, não tem capacidade de aprendizado ou mesmo a maleabilidade necessária para se adaptar a contextos extremamente dinâmicos. Assim, os pesquisadores vêm tentando criar sistemas híbridos, combinando sistemas *fuzzy* com redes neurais artificiais (*neuro-fuzzy*), para que essa limitação possa ser minimizada (Marro et al., 2010).

### Aprendizado de máquina

O termo aprendizado de máquina (AM), no original em inglês *machine learning*, é a técnica que estuda como construir programas de computador que possam melhorar seu desempenho em uma determinada tarefa por meio de experiência. Esta técnica vem se despontando como um dos ramos da IA atualmente com maior utilização e aprofundamento.

As técnicas de AM podem ser classificadas, de uma forma geral, em dois tipos básicos (Géron, 2019):

- Aprendizado supervisionado: onde os dados de treinamento fornecidos à máquina incluem suas respectivas saídas desejadas (rótulos). Regressão linear, máquinas de vetores de suporte (SVM), árvores de decisão e redes neurais são os principais algoritmos para esse tipo;
- Aprendizado não supervisionado: quando não se conhecem atributos de saída (rótulos) e deseja-se agrupar ou encontrar regras de associação de dados de um conjunto, ou seja, a máquina tenta aprender sem exemplos.

*Clustering* e aprendizado da regra de associação são alguns dos principais algoritmos nessa categoria.

Grande parte dos algoritmos de aprendizado de máquina utilizados atualmente, sobretudo os de aprendizado supervisionado, são implementações de algum tipo de regressão, tais como a linear, polinomial, logística, entre outras (Géron, 2019), bem como os algoritmos de classificação. Também se destaca o grande uso de redes neurais.

## Redes Neurais

Redes Neurais Artificiais (RNAs), segundo Montañó (2016), “são uma tentativa de representação de um modelo computacional do sistema nervoso, a fim de simular a capacidade de aprendizado do cérebro humano”. As RNAs podem ser melhores descritas como um “conjunto de unidades de processamento densamente interconectadas que manipulam sistemas de informações distribuídos em paralelo e têm o mesmo conceito que o das redes neurais biológicas do cérebro humano” (Allawi et al., 2018).

Uma rede neural é composta de nós conectados por ligações com um peso associado que determina a força e o sinal dessa ligação. Pesos são a principal forma de armazenamento em redes neurais e algoritmos de aprendizagem trabalham atualizando os valores desses pesos. Os nós de entrada e saída são aqueles com conexões com o mundo externo. Cada nó é independente dos demais e, portanto, pode realizar seus cálculos apenas a partir de seus valores de entrada e respectivos pesos. Cada unidade recebe os valores de entrada, calcula o nível de ativação e, quando ativada, envia o sinal para suas ligações de saída (Patrício e Rieder, 2018).

As redes neurais são compostas de camadas, onde cada camada possui usualmente alguns nós, também chamados de neurônios. As camadas internas, entre os nós de entrada e saída, são chamadas camadas ocultas. Redes neurais com várias camadas ocultas são chamadas de redes de aprendizado profundo (*deep learning*).

Segundo Géron (2019), há diversos fatores que confluem para que as RNAs sejam umas das soluções mais utilizadas atualmente em inteligência artificial, sendo apresentadas algumas, a seguir:

- A grande quantidade de dados disponíveis atualmente para treinamento das RNAs, advindos do uso de sensores automatizados e potencializados pela facilidade de compartilhamento pela internet;
- O grande aumento do poder computacional desde a década de 1990;
- O círculo virtuoso de financiamento e progresso das RNAs. Diversos produtos surpreendentes baseados em redes neurais estão regularmente aparecendo nas manchetes, o que traz ainda mais financiamento, resultando em mais melhorias e mais produtos interessantes.

### Máquinas de vetores de suporte

SVM (Support Vector Machines) é um algoritmo de aprendizado de máquina para problemas de classificação e de regressão. Seu maior foco é no treinamento e classificação de um conjunto de dados. Quando aplicado à problemas de regressão, faz-se adaptações em sua função de otimização, e é comum ver a nomenclatura SVR nesse caso. Um classificador SVM clássico é capaz de classificar os pontos do conjunto de entrada em duas classes possíveis, utilizando uma linha, também chamada de hiperplano. Sendo o SVM um método não paramétrico, ressalta-se sua flexibilidade de representar funções complexas e, ao mesmo tempo, ser bastante resistente ao *overfitting* (Patrício e Rieder, 2018). Algoritmos de classificação supervisionados como o SVM tendem a ter maior dificuldade ao lidar com grandes conjuntos de dados, exigindo maior poder computacional.

### Árvores de decisão e Floresta aleatória

Árvores de decisão (*decision trees*) são métodos de aprendizado de máquinas supervisionados muito utilizados em problemas de classificação e regressão. Neste método, vários pontos de decisão são criados. Estes pontos são os “nós” da árvore e em cada um deles o resultado da decisão será seguir por um lado ou por outro. Estes lados ou caminhos disponíveis são os “ramos”, formando assim a estrutura básica de uma árvore de decisão.

Uma das vantagens do uso dessa abordagem é que ela dispensa a necessidade de normalização de dados, não havendo muita necessidade de operações de preparação prévia do conjunto de dados. No entanto, é considerado

um algoritmo instável, uma vez que pequenas mudanças nos dados de entrada podem desencadear uma grande mudança na sua estrutura.

Já a floresta aleatória (*random forest*) é também considerado um algoritmo de aprendizado supervisionado para tarefas de classificação e regressão, que cria uma combinação de várias árvores de decisão. Resumidamente, o algoritmo de florestas aleatórias cria várias árvores de decisão e as combina para obter uma predição com maior acurácia e mais estabilidade. Dessa forma, ele geralmente obtém resultados com maior acurácia que a árvore de decisão isolada, porém é mais complexo de implementar.

## REVISÃO SISTEMÁTICA DE LITERATURA

A Revisão Sistemática de Literatura (RSL) é uma técnica de revisão bibliográfica que se tornou, de início, muito difundida e utilizada na área médica e de saúde. Trata-se de uma forma de identificar, avaliar e interpretar toda a pesquisa disponível de relevância para uma determinada questão específica ou assunto de interesse. A RSL faz uso de diversos estudos individuais sobre o assunto em pauta, estudos estes chamados de primários. Então, por se utilizar de diversos estudos primários, a RSL é considerada um estudo secundário (Kitchenham, 2004).

A utilização da técnica de RSL aumentou significativamente nas últimas décadas, e esse fenômeno pode ser explicado devido à explosão de informações nesse período, favorecida justamente pela adoção massiva de tecnologias para elaboração, publicação e compartilhamento de informações. Especialmente no mundo acadêmico e científico, a internet possibilitou o intercâmbio de informações, transpondo as barreiras dos limites geográficos e linguísticos. Com isso, muitos pesquisadores identificaram a necessidade de catalogar, reanalisar ou mesmo agruparem conjuntos de dados de resultados de pesquisas científicas anteriores já disponíveis (Silva Filho, 2009).

Segundo Kitchenham (2004), a maior parte dos estudos científicos começam com algum tipo de revisão de literatura. O grande problema é que, dependendo de como é realizada essa revisão, pode ter pouco valor científico. No caso da RSL, como é realizada a partir de uma estratégia pré-definida, permite que

a integridade da revisão seja avaliada. É comum que alguns pesquisadores, ao fazerem revisões de literatura narrativas convencionais, incluam apenas opiniões que corroboram suas hipóteses de pesquisa preferidas, deixando de fora estudos que adentram em caminhos diferentes ou que tenham outros pontos de vista.

Para que a revisão sistemática tenha êxito, é importante que seja bem formulada, começando sempre pela formulação da pergunta de pesquisa. Após essa etapa, é feita a busca dos estudos primários, através de uma *string* ou *query* de busca, nas bases mais relevantes sobre o assunto. Essa *string* nada mais é do que uma estratégia muito utilizada em formulários de busca utilizando alguns conectivos lógicos bem comuns na álgebra booleana (AND, OR, NOT) de modo a selecionar apenas os estudos que tenham os assuntos caracterizados como relevantes no momento da formulação da pergunta de pesquisa (Kitchenham, 2004).

Uma das vantagens da RSL é a possibilidade chamada de meta-análise, onde dados do resultado de duas ou mais pesquisas diferentes podem ser reagrupados e, posteriormente, analisados estatisticamente sob um novo prisma, uma nova hipótese ou questão científica (Silva Filho, 2009).

## METODOLOGIA E PROTOCOLO DE REVISÃO

A pergunta para a presente pesquisa foi realizada tendo em mente a necessidade de conhecer o atual estado da arte do uso de inteligência artificial no manejo de irrigação para a agricultura. Esse panorama irá permitir um melhor direcionamento em novas pesquisas, além de estabelecer bases e possíveis novas hipóteses de trabalho nessa área. Dessa forma, as perguntas deste trabalho são:

- a) Qual o atual panorama das pesquisas de uso da inteligência artificial (e suas ramificações) no manejo de irrigação para a agricultura?
- b) Quais estratégias de inteligência artificial têm sido usadas para trabalhar os dados obtidos de sensores como parâmetros agroclimáticos, do solo ou mesmo da planta e realizar o manejo da irrigação?

Também foi definido de antemão que não seria realizada meta-análise nos dados obtidos, dada a grande heterogeneidade dos tipos de estudos possíveis de se obter na pesquisa e por não contribuir diretamente para a resposta das questões propostas.

A plataforma escolhida para busca foi a dos Periódicos Capes, do Governo Federal do Brasil. Trata-se de uma maneira simples de consultar de uma só vez mais de 45 mil títulos completos em 130 bases referenciais. Repositórios de publicadores, instituições e periódicos nacionais e internacionais altamente conceituados, tais como ScienceDirect/Elsevier, EBSCO, SciELO, Scopus, Springer, MDPI, Embrapa entre diversos outros (CAPES, 2020).

A *string* de busca foi montada tendo como base a língua inglesa, já que mesmo os trabalhos científicos desenvolvidos no Brasil são publicados também em artigos na língua inglesa. No entanto, foram mantidos como critério de inclusão artigos escritos também em português, uma vez que a busca poderá selecionar artigos em outras línguas se as palavras-chave utilizadas na *string* de busca estiverem em algum trecho do *abstract*, por exemplo.

A *string* abaixo foi executada no formulário de busca avançada do site Periódicos Capes, mantido pelo Ministério da Educação do Brasil:

*("expert system" OR "artificial intelligence" OR "fuzzy logic" OR "artificial neural network" OR "machine learning") AND irrigation*

Para montagem da *string*, foram levadas em consideração as técnicas mais comumente associadas ao uso de Inteligência Artificial em pesquisas e mesmo aplicações práticas. Desde abordagens mais consolidadas, baseadas em lógica *fuzzy* (Maia, 2007) até o uso de sistemas especialistas, técnica também há muito estabelecida em diversas áreas, com destaque para a agricultura e, mais especificamente, na irrigação (Mohan e Arumugam, 1997).

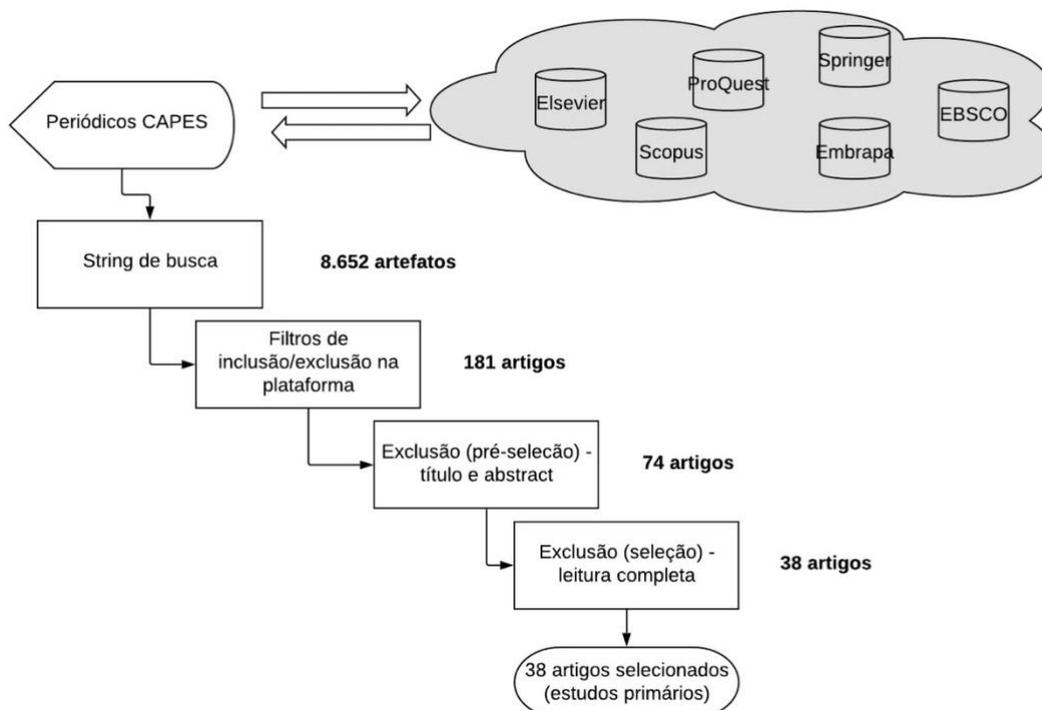
A aplicação da *string* acima foi para pesquisa “no assunto”: no formulário do site há também a possibilidade de pesquisar apenas no *abstract*, apenas nos autores ou em todos os itens ao mesmo tempo. Considerando que ao pesquisar todos os itens poderia haver alguns retornos baseados nos títulos dos departamentos onde os pesquisadores trabalham e que poderiam não condizer com trabalhos na área, gerando resultados falsamente positivos.

A pesquisa retornou 8.652 artefatos, incluindo livros, artigos, imagens, mídia audiovisual publicados. Para continuação da revisão, como critérios de inclusão, foram escolhidos os trabalhos com as seguintes características abaixo:

- Língua: Inglês ou Português;
- Apenas artigos científicos, e somente os publicados em periódicos revisados por pares;
- Artigos publicados nos últimos 6 anos incompletos (01/01/2015 a 30/04/2021);
- Tópico de interesse: agricultura;
- Texto completo disponível para leitura.

A quantidade de resultados caiu para 181 artigos após a aplicação de filtros com os critérios de inclusão determinados acima. Trata-se de uma quantidade relativamente grande para se realizar uma revisão bibliográfica. Dessa forma, utilizando ainda o critério de relevância, foram analisados e realizada a leitura de todos os títulos e dos *abstracts* para certificar que o assunto atende aos requisitos especificados nas perguntas da pesquisa previamente elaboradas. Essa etapa foi chamada de pré-seleção, em que foram mantidos 74 artigos.

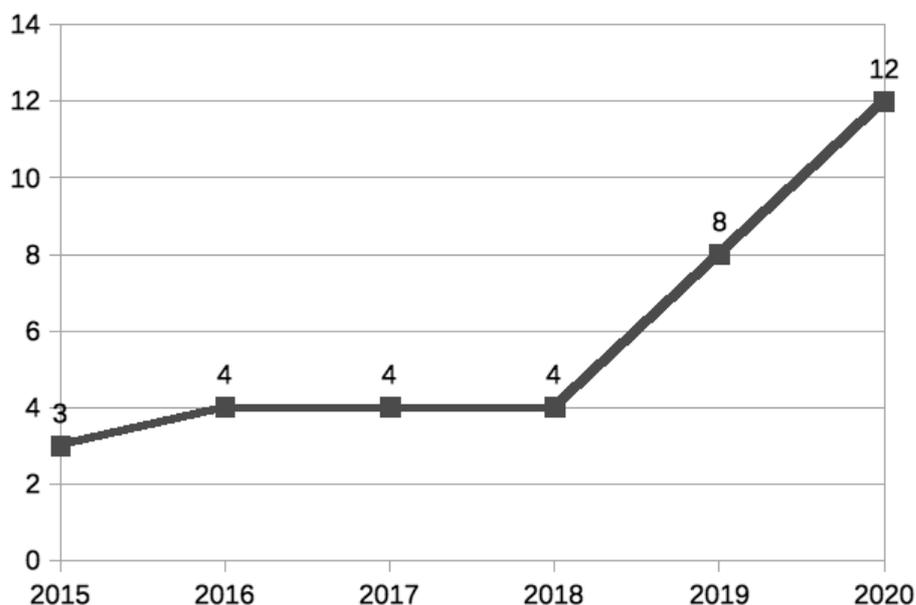
A partir desse resultado, procedeu-se a leitura completa dos artigos, para atestar sua pertinência e aplicação para a solução das duas questões propostas. Desse procedimento foram selecionados 38 estudos primários que irão compor a revisão. A Figura 1 demonstra, de forma resumida, todo o trâmite de seleção dos estudos primários.



**Figura 1:** Diagrama de seleção dos estudos primários. Fonte: o autor (2021).

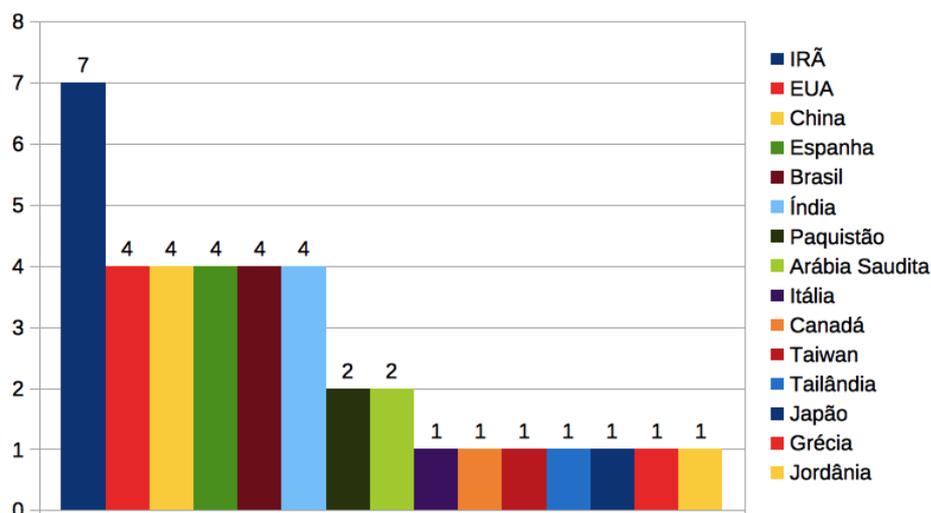
## RESULTADOS DA RSL E CONSIDERAÇÕES SOBRE OS ESTUDOS PRIMÁRIOS

Para responder as perguntas norteadoras da presente revisão, inicialmente, é importante observar a distribuição geográfica e temporal dos estudos selecionados. É possível verificar o crescimento, mesmo de maneira não uniforme, dos estudos na área ao longo do período escolhido. A Figura 2 apresenta a quantidade de estudos em cada ano do intervalo escolhido para a revisão, onde observa-se a clara tendência de crescimento, com pico no ano de 2020. Os estudos do ano 2021 não foram considerados para este gráfico, devido ser o ano corrente. Considerando que alguns pesquisadores possam ter feito utilização de conjunto de dados de anos anteriores, para essa verificação foi escolhido a data de publicação dos estudos.



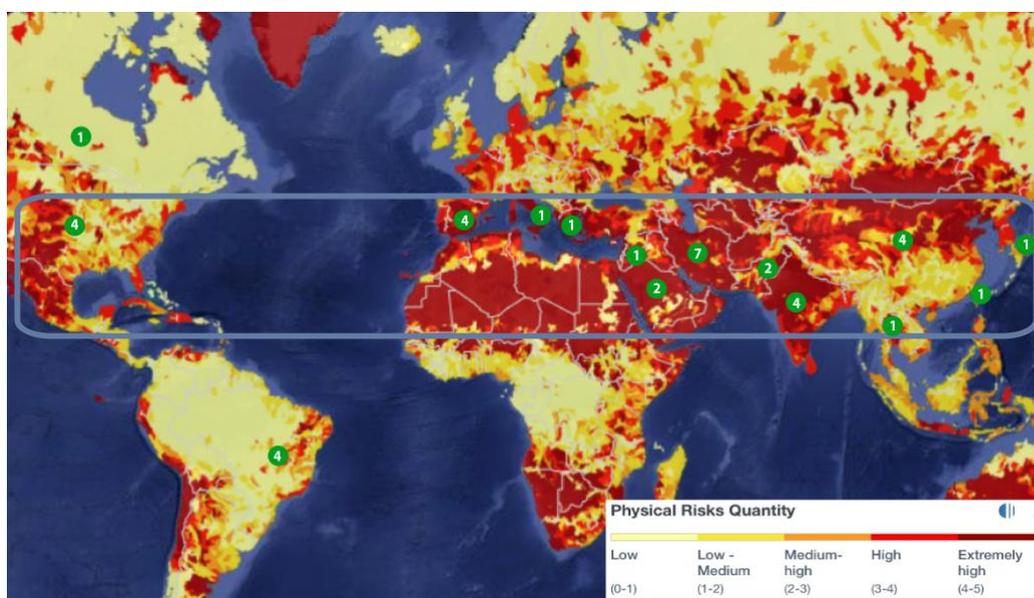
**Figura 2:** Frequência de publicação dos estudos primários selecionados. Fonte: o autor (2021).

No aspecto geográfico é importante ressaltar que, sobre a distribuição dos estudos, os três primeiros colocados em quantidade de estudos (Irã, China e EUA) estão também entre os 5 primeiros colocados no ranking dos países com a maior área equipada para irrigação no mundo (FAO, 2017). A liderança do Irã em quantidade de estudos pode ser explicada pela grande necessidade de um melhor gerenciamento da pouca água disponível, considerando que na maior parte do país predominam os climas árido e semiárido. Ao continuar no ranking, a mesma lógica dos países com maior área equipada para irrigação prevalece, com as duas grandes potências mundiais (EUA e China) rivalizando na quantidade de estudos. Estes são os países que mais investem em pesquisa e desenvolvimento, em números absolutos, de acordo com o Fórum Econômico Mundial (WEF, 2018), o que também ajuda a refletir diretamente suas posições também nessa área de estudos, conforme visto na Figura 3.



**Figura 3:** Distribuição dos estudos primários por país de origem. Fonte: o autor (2021).

No entanto é preciso ressaltar que 86,84% dos estudos primários selecionados foram desenvolvidos em área tradicionalmente associadas ao risco de escassez de água em nível moderado a alto, seja por efeitos climáticos ou por dificuldades de manejo, conforme visto na Figura 4 (WRI, 2014), e esse aspecto também ajuda a explicar a presença do Irã como líder nos estudos primários selecionados para esta revisão.



**Figura 4:** Distribuição geográfica dos estudos primários. Fonte: WRI (2014), adaptado pelo autor.

Para uma análise mais detalhada, os estudos foram agrupados pelas principais tecnologias de IA utilizadas. Alguns foram citados em mais de uma categoria, por utilizar concomitantemente técnicas diferentes. Uma lista completa dos estudos primários selecionados está no anexo II, e uma matriz contendo o cruzamento de estratégias e tipos de dados utilizados está disponível no anexo III.

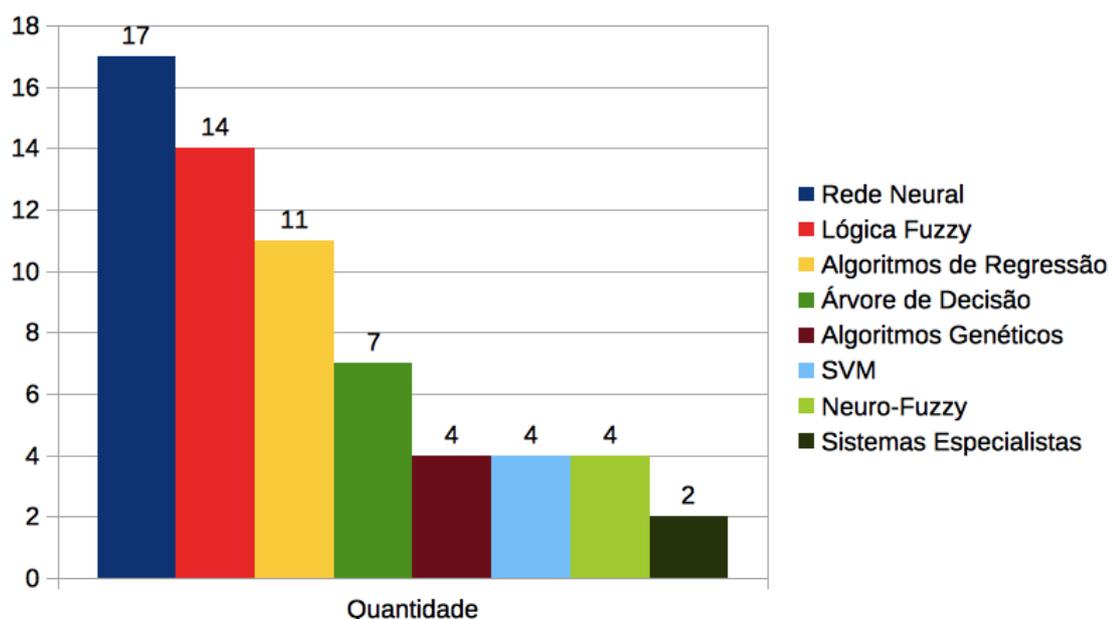
#### Uso de redes neurais

Observou-se ao classificar os estudos por técnicas de IA utilizadas, que há predominância de algumas abordagens. Na Figura 5, percebe-se o grande uso de Redes Neurais Artificiais, presente em 17 estudos primários. As RNAs foram as que mais frequentemente apareceram como soluções de aprendizado de máquina, o que corrobora a opinião de Géron (2019), mostrando seu grande potencial de crescimento.

Em alguns poucos casos, as RNAs se mostraram menos eficientes que outras abordagens. Em estudos comparativos como o feito por Haghverdi et al. (2015), as abordagens baseadas em RNA se mostraram inferiores a algoritmos de regressão como o GWR (*Geographically Weighted Regression*), para prever o teor de água disponível no solo próximo à raiz. No trabalho de Seyedzadeh et al. (2020) uma variação do uso de SVM se mostrou superior a redes neurais para estimar descarga em irrigação por fita gotejadora.

Em alguns dos estudos primários selecionados foram utilizadas redes neurais para estimar evapotranspiração. Na pesquisa de Feng et al. (2016), três tipos de redes neurais – *extreme learning machine* (ELM), rede neural otimizada por algoritmo genético (GANN) e *wavelet neural network* (WNN) – foram treinadas com dados de 13 estações meteorológicas para estimativas de evapotranspiração, tem os dois primeiros tipos (ELM e GANN) com bons resultados, mesmo utilizando poucos dados de entrada, quando comparados com as equações tradicionais. Já Kelley e Pardyjak (2019) utilizaram uma rede neural mais simples (apenas uma camada oculta com 10 neurônios e somente um neurônio na camada de saída), treinando com dados de poucos sensores de baixo custo, coletados durante duas semanas, foi o suficiente para obter dados sólidos de evapotranspiração, utilizando Penman-Monteith como controle. No trabalho de Raza et al. (2020), três

tipos de redes neurais – *multilayer perceptron* (MLP), *general regression neural network* (GRNN) e *cascade correlation neural network* (CCNN) – não foram capazes de superar uma estratégia baseada em SVM para previsão de evapotranspiração utilizando dados climáticos.



**Figura 5:** Abordagens técnicas utilizadas pelos estudos primários. Fonte: o autor (2021).

Na maioria dos casos as RNAs obtiveram melhores resultados que algoritmos de regressão diversos. De acordo com Al-Ghobari et al. (2018), RNA teve desempenho superior a MLR (*Multiple Linear Regression*) para prever perdas por evaporação em irrigação por aspersão; e conforme visto no estudo de King e Shellie (2016) RNA também superou MLR para prever temperatura foliar em videiras, utilizado no cálculo de *crop water stress index* (CWSI).

Uma rede neural foi utilizada para manejo de irrigação baseado em dados de umidade do solo no trabalho de Gu et al. (2021), obtendo estimativas com 20% mais precisão que métodos baseados em balanço hídrico e evapotranspiração, no entanto teve desempenho inferior ao método de detecção de estresse hídrico chamado RZWQM2-WS.

No estudo de Elnesr e Alazba (2017), uma RNA obteve bom desempenho para previsão das dimensões do contorno úmido em uma irrigação por gotejamento

subterrâneo, utilizando variáveis como tempo de infiltração, descarga do emissor e condutividade hidráulica saturada.

Abordagens inovadoras para previsão de fluxo de irrigação foram utilizadas em Mouatadid et al. (2019), com uma arquitetura de rede neural recorrente LSTM (*Long Short-Term Memory*), se mostrando superior a abordagens usando uma RNA tradicional e MLR. A pesquisa de Nadafzadeh e Mehdizadeh (2019) utilizou estratégias de visão computacional para alimentar uma rede neural e determinar ponto de murcha de gramas e pastagens e, assim, determinar um regime de irrigação adequado, mesmo em condições de escassez hídrica.

Estratégia de *deep learning* com uma rede neural *long short-term memory* (LSTM) foi utilizada para manejo de irrigação em arroz na pesquisa de Sidhu et al. (2020a), com resultados compatíveis com as recomendações de um especialista humano e com o software APSIM. Outra pesquisa a apresentar o uso de rede neural profunda foi o trabalho de Wakamori et al. (2020), que utilizou uma rede neural multimodal, baseada em LSTM, com alterações baseadas no agrupamento de variáveis ambientais, que nomearam de C-Drop, obtendo um ganho de 21% de precisão nas estimativas de estresse hídrico através de dados climáticos e imagens das folhas.

Um detalhe a observar é que a Figura 5 ilustra uma maior quantidade de estratégias do que a quantidade de estudos primários selecionados, uma vez que alguns trabalhos utilizam mais de uma técnica para cumprirem seus objetivos.

#### Uso de lógica *fuzzy*

A segunda abordagem mais utilizada foram as tecnologias baseadas em lógica *fuzzy*, com 14 estudos primários. Trata-se de uma tecnologia que vem sendo utilizada há décadas com grande aceitação por ser baseada em regras lógicas de fácil explicação, tendo um histórico de uso em produtos comerciais (Shi et al., 2019).

Considerando apenas os estudos que utilizam essa tecnologia em sua forma convencional (não-híbrida), observa-se que é uma das escolhas mais comuns na construção de softwares SSD (Sistemas de Suporte à Decisão), bastante utilizados para gerenciamento de irrigação mais simplificados, como em Yang et al. (2017), que obteve bons resultados em culturas de trigo, milho e algodão, que usou dados de estações meteorológicas e relatórios técnicos para

abastecer a base de conhecimento. Giusti e Marsili-Libelli (2015), demonstra a superioridade de sua solução contra um produto comercial de manejo.

No trabalho de Villarrubia et al. (2017) a base de dados de um SSD utilizando lógica *fuzzy* é alimentada por uma rede de sensores sem fio, coletando dados de temperatura, radiação solar, pH e umidade do solo, umidade do ar e velocidade do vento para decisões de irrigação. Uma arquitetura parecida foi adotada por Jamroen et al. (2020), que utilizou sensores sem fio e de baixo custo, disponíveis comercialmente, para propor uma solução *fuzzy* baseada em dados de temperatura do dossel, radiação solar, déficit de pressão de vapor e umidade do solo, conseguindo reduzir o uso de água em 59,61%, o consumo de energia elétrica em 67,35%, enquanto o rendimento da safra aumentou em 22,58%, comparando com uma estratégia convencional de irrigação por gotejamento. Uma solução similar é a proposta de Munir et al., (2018), que utiliza uma arquitetura com sensores cabeados de baixo custo, voltados à economia de energia, coletando dados de umidade do solo e do ar para abastecer a base de conhecimento, conseguindo resultados superiores à abordagem manual de irrigação.

A pesquisa desenvolvida por Shi et al. (2019) alimenta o sistema decisório com imagens multiespectrais obtidas por sensoriamento remoto. A técnica, bastante avançada, faz uso dessas imagens para obter o índice vegetativo, associado a modelos de evapotranspiração e, assim, municiar o sistema decisório que implementa regimes de irrigação via lógica *fuzzy*. Essa técnica foi bem-sucedida por fornecer um mapa de controle do ciclo de trabalho para um sistema de irrigação de taxa variável em pivô central. Outra pesquisa que utilizou imagens para alimentar sistemas de decisão *fuzzy* foi o de Chang e Lin (2018), que desenvolveram um pequeno trator robótico que irriga e faz a capina de pequenas culturas. De acordo com os autores, a ideia bem-sucedida dessa máquina automatizada pode ser expandida a outras tarefas, como plantio de sementes e aplicação de fertilizantes ou herbicidas.

A lógica *fuzzy* também foi usada com bons resultados quando comparada a abordagens paramétricas tradicionais para avaliação de terras para utilização de irrigação por gotejamento, como visto no estudo de Hoseini (2019).

## Algoritmos de regressão

Diversos algoritmos de regressão foram identificados em 11 dos estudos selecionados, muitos com comparativos de desempenho. Haghverdi et al. (2015), utilizaram algumas técnicas de regressão geoestatística como *kriging*, *co-kriging*, *regression kriging* e *geographically weighted regression* (GWR) e também uma rede neural. GWR e *regression kriging* se mostraram mais eficientes para prever o teor de água disponível no solo próximo à raiz.

A pesquisa de Ferreira et al. (2019) faz uma comparação de um algoritmo de regressão multivariada com alguns métodos tradicionais (sem IA) para estimativa de evapotranspiração, constatando um melhor desempenho dos algoritmos de regressão, principalmente quando trabalham com dados climáticos limitados.

No trabalho de Torres-Sanchez et al. (2020), três estratégias de regressão foram testadas – regressão linear, regressão baseada em florestas aleatórias e regressão com máquinas vetor de suporte (SVR) – utilizando dados de solo e climáticos, tendo todas elas apresentado desempenho considerado válido, em comparação com recomendações de um agrônomo, para manejo de irrigação.

Em Sidhu et al. (2020b), sete estratégias de aprendizado de máquina (6 regressões e 1 rede neural) foram comparadas para estimar a demanda de água em função de parâmetros climáticos no manejo de irrigação em arroz, tendo o algoritmo Adaboost com o melhor desempenho com precisão média de 71% em comparação com os outros modelos.

Na pesquisa de Filgueiras et al. (2020) foram testados seis algoritmos de regressão para previsão de evapotranspiração e conteúdo de água no solo a partir de imagens obtidas por mecanismos de sensoriamento remoto. Floresta aleatória foi o que teve melhor desempenho para prever água no solo e Cubist o melhor para evapotranspiração.

Em uma pesquisa com oito algoritmos de regressão testados para previsão de evapotranspiração com imagens obtidas por sensoriamento remoto, Dias et al. (2021) concluíram pelo melhor desempenho do algoritmo Cubist, que se mostrou uma boa alternativa para essa previsão em locais onde não se dispõe de dados climáticos confiáveis, com métricas de  $R^2=0,91$ ,  $NSE=0,90$  e  $nRMSE=8,54\%$ .

Já no trabalho de King e Shellie (2016) a regressão linear múltipla (MLR) perde para uma rede neural no cálculo de CWSI em uvas a partir da temperatura foliar.

Em Karandish e Šimůnek (2016), a MLR não superou uma abordagem *neuro-fuzzy* (ANFIS) para prever conteúdo de água no solo utilizando dados climáticos e de solo.

O trabalho de Navarro-Hellín et al. (2016) demonstrou um desempenho inferior de *Partial Least Square Regression* (PLSR) para gerenciamento para irrigação na comparação com um sistema *neuro-fuzzy*, sobretudo em situações de escassez hídrica. Foram utilizados dados climáticos e de solo.

De acordo com Al-Ghobari et al. (2018), RNA teve desempenho superior a MLR (*Multiple Linear Regression*) para prever perdas por evaporação em irrigação por aspersão. MLR também não conseguiu superar redes neurais na previsão de fluxo de irrigação na pesquisa de Mouatadid et al. (2019), tendo pior desempenho que todos os demais modelos de testados.

### Árvores de decisão e florestas aleatórias

Dentre os trabalhos envolvendo árvores de decisão e florestas aleatórias que não são híbridos (estes serão abordados na seção posterior), está a pesquisa de Torres-Sanchez et al. (2020), já citada anteriormente. Nele há o uso de uma regressão baseada em floresta aleatória que, junto a outras duas técnicas tiveram desempenho válido para manejo de irrigação.

Em Sidhu et al. (2020b) há o uso tanto de árvores de decisão quanto de floresta aleatória, em comparação com outros algoritmos de regressão. Após o vencedor Adaboost, foram os dois (floresta aleatória e árvore de decisão) que tiveram melhor desempenho, mostrando a viabilidade de sua adoção para manejo de irrigação em arroz.

No manejo de irrigação por gotejamento superficial e subterrâneo, o estudo de Shiri et al. (2020) utilizou *gene expression programming* (GEP) e floresta aleatória com dados de solo, para prever a dimensão da frente de molhamento. Ambas as estratégias se mostraram adequadas, e ainda revelaram que a irrigação pulsada foi mais eficiente que a contínua.

O trabalho de Filgueiras et al. (2020), também já citado na seção que aborda as regressões, faz uso de floresta aleatória para previsão de água no solo

usando coeficiente de cultura, ( $K_c$ ), evapotranspiração de referência ( $ET_o$ ), radiação solar ( $R_o$ ), *normalized difference vegetation index* (NDVI), e *simple ratio index* (SR) com variáveis independentes.

Ao utilizar árvores de decisão como classificadores, o trabalho de Blasi et al. (2021) mostra sua viabilidade (97,86% de precisão) para previsão de eventos de irrigação positivos e negativos (irrigar ou não irrigar), utilizando dados de sensores de solo (temperatura e umidade).

Por fim, o trabalho de Karimi et al. (2020) testou variações de florestas aleatórias para preencher dados meteorológicos omissos ou perdidos para cálculo da evapotranspiração de referência. Alguns dos algoritmos de floresta aleatória se mostraram adequados à tarefa, sem que o autor conclua ter sido superior às estratégias clássicas de regressão linear simples para calibrar as equações utilizadas.

#### Estratégias mistas ou híbridas

Outra categoria a ser considerada são os estudos que usam estratégias híbridas. Para contornar as limitações de aprendizado da lógica *fuzzy* (aprendizado), pesquisadores têm apostado em soluções contendo uma camada de RNA e outra de lógica *fuzzy*. Essas estratégias são chamadas de *neuro-fuzzy* e podem ser vistas em Navarro-Hellín et al. (2016) para construir um sistema SSD de gerenciamento para irrigação com *Adaptive Neuro Fuzzy Inference Systems* (ANFIS), com desempenho superior a um método de regressão estatística; em Keswani et al. (2019) aplicado em agricultura de precisão, com redes neurais montando um mapa de distribuição da umidade de solo e o sistema *fuzzy* fazendo o controle das válvulas de irrigação baseada nessas informações; em Kontogiannis et al. (2017) que demonstra um melhor desempenho da sua solução *neuro-fuzzy* chamada FITRA contra um algoritmo simples de acionamento de irrigação mediante leitura de sensores de umidade de solo.

No trabalho de Karandish e Šimůnek (2016), foi criado um modelo *neuro-fuzzy* para predição de teor de água no solo com desempenho superior à regressão linear múltipla e similar ao desempenho de uma solução baseada em SVM, mas que não foi capaz de superar o produto comercial Hydrus 2D para tal tarefa.

Seyedzadeh et al. (2020) utilizaram várias estratégias híbridas para realizar o manejo de irrigação através da estimativa de descarga em fitas gotejadoras.

Dentre elas, duas abordagens *neuro-fuzzy* – *neuro-fuzzy sub-clustering* (NF-SC) e *neuro-fuzzy c-Means clustering* (NF-FCM) – utilizando parâmetros do equipamento de irrigação, como temperatura da água e pressão da água no sistema, que obtiveram bons resultados, porém inferiores a uma estratégia LS-SVM utilizada no mesmo estudo.

Além das iniciativas *neuro-fuzzy*, outra abordagem mista utilizando lógica *fuzzy* se vê no trabalho de Omidzade et al. (2020), que acrescenta um algoritmo de aprendizado chamado SARSA a uma solução *fuzzy* para gerenciar o agendamento da entrega de água em canais de irrigação compartilhados entre diferentes fazendeiros, com desempenho superior a um algoritmo AC (*Ant Colony*).

Há também, em menor quantidade, iniciativas de estratégias híbridas utilizando combinações de Algoritmos Genéticos (AG) com Árvores de Decisão, como em González Perea et al. (2019) para previsão de eventos de irrigação baseado em dados climáticos, com precisão de 68% a 100% para previsão de eventos de irrigação positivos e de 93% a 100% para eventos de irrigação negativos; combinação de AG com RNA, como demonstrado em Feng et al. (2016), para estimar evapotranspiração de referência utilizando dados de temperatura, sendo superior ao modelo de Hargreaves. Este mesmo algoritmo híbrido, quando alimentado com informações de radiação solar, foi também superior aos tradicionais modelos de Makkink, Priestley–Taylor e Ritchie para estimar evapotranspiração.

O trabalho de Goap et al. (2018) propõe uma solução que junta um algoritmo de aprendizado de máquina supervisionado (SVM) a outro não-supervisionado (*k-means clustering*) para compor uma arquitetura integrada utilizando dados climáticos e de solo para realizar o manejo de irrigação, tendo seus resultados de previsão de umidade do solo considerados encorajadores pelos autores. Já na pesquisa de Mouatadid et al. (2019), foram utilizadas redes neurais com transformada *wavelet*, conseguindo resultados com maior precisão que as redes neurais convencionais para previsão de fluxo de irrigação.

#### Outras abordagens

Entre as diversas estratégias menos utilizadas, destaca-se a pesquisa de Stone et al. (2015), que testaram um produto comercial de Sistema Especialista (SE) chamado Irrigator PRO, comparando com gerenciamento manual da irrigação,

obtendo desempenho similar. Foram utilizados dados de solo obtidos com 35 tensiômetros e os autores ressaltam que a proposta deveria ser testada, em trabalhos posteriores, também em solos de características diferentes e com menos uniformidade.

O trabalho desenvolvido por Torres et al. (2020) utiliza um modelo quadrático de aprendizado de máquina utilizando SVM para cálculo de valores de evapotranspiração de referência, atingindo valores próximos (RMSE 0,79) ao modelo de referência Penman-Monteith, utilizando menos dados de entrada. Esse modelo é parte da solução multinível proposta pelos autores, chamada Hydra, para detecção de eventos de irrigação e tomada de decisão automática.

Alguns trabalhos fazem uso de algoritmos genéticos, como em Nadafzadeh e Mehdizadeh (2019), que utiliza essa técnica para selecionar as melhores características de imagens que constituíram a entrada de dados de uma rede neural. Um tipo de algoritmo genético chamado *gene expression programming* (GEP) foi utilizado na pesquisa de Shiri et al. (2020), já citado anteriormente.

Dentre as abordagens que utilizam SVM, destacam-se os trabalhos de Karandish e Šimůnek (2016), Goap et al. (2018), Torres-Sanchez et al. (2020), Seyedzadeh et al. (2020), Raza et al. (2020) e Torres et al. (2020).

#### Uso de sensores e parâmetros utilizados

O uso de sensores sem fio tem se mostrado bastante eficaz para abastecer com dados, em tempo real, as estratégias de IA utilizadas nos estudos primários selecionados. Vários dos estudos selecionados fazem uso de sensores para alimentar seus algoritmos e sistemas de decisão. Em Villarrubia et al. (2017) e Jamroen et al. (2020) utilizam uma rede de sensores sem fio alimentando continuamente um sistema *fuzzy*; em Goap et al. (2018) utilizam sensores sem fio para coletar dados para um algoritmo de regressão. No trabalho de Kelley e Pardyjak (2019) são utilizados sensores de baixo custo para temperatura, radiação solar, umidade do ar e velocidade do vento para municiar uma rede neural e, por sua vez estimar a evapotranspiração. Torres et al. (2020) utilizam uma rede de sensores sem fio modificados, para menor consumo de energia, para municiar sua solução Hydra com dados de umidade e temperatura tanto do solo quanto do ar. O referido autor também utiliza dados de estações meteorológicas para compor o resultado final.

Há menção do uso de sensores com transmissão sem fio nos trabalhos de Giusti e Marsili-Libelli (2015), Navarro-Hellín et al. (2016), Kontogiannis et al. (2017), Chang e Lin (2018), Keswani et al. (2019) e Jamroen et al. (2020).

As tecnologias utilizadas na comunicação sem fio foram as mais diversas possíveis, predominando o uso de conexões 3G/GPRS, Wi-Fi e LoRa. Como essa implementação depende muito da localidade da instalação dos sensores e a disponibilidade dos serviços de comunicação, há que se pesquisar mais profundamente em futuros trabalhos sobre o cenário de adoção desses protocolos de comunicação.

O trabalho de Munir et al. (2018) faz uma análise crítica sobre sensores sem fio e seu grande consumo de energia. A solução proposta mantém os sensores ligados fisicamente a um microcontrolador e, este sim, faz comunicação sem fio com um ponto de acesso, que se encarrega de guardar os dados na nuvem, minimizando possíveis problemas de conexão que possam ocorrer em uma rede de sensores sem fio.

Quanto aos dados utilizados para as estratégias de IA, destacam-se principalmente as variáveis climáticas, utilizadas na grande maioria. Logo após, os dados de solo, mormente umidade e temperatura dos terrenos. Adicionalmente, seis estudos fizeram uso de imagens para serem tratadas por algoritmos inteligentes, a saber: Chang e Lin (2018) utilizam um robô que capina e irriga, baseado em imagens analisadas por um sistema *fuzzy* convencional; Shi et al. (2019) usam imagens de *drones* processadas em uma lógica *fuzzy* para decidir sobre quantidade de irrigação e Nadafzadeh e Mehdizadeh (2019) utilizam imagens processadas em uma rede neural para avaliar a condição hídrica de gramados. Wakamori et al. (2020) utilizaram imagens de murchamento de folhas para auxiliar na detecção do estresse hídrico; Filgueiras et al. (2020) e Dias et al. (2021) utilizaram imagens obtidas por mecanismos de sensoriamento remoto para previsão de conteúdo de água no solo e para evapotranspiração.

Por fim, alguns estudos trabalham utilizando parâmetros de aparelhos de irrigação, tais como pressão, temperatura da água, coeficiente de descarga, entre outros. Esse tipo de abordagem é visto nos trabalhos de Elnesr e Alazba (2017), Al-Ghobari et al. (2018) e Seyedzadeh et al. (2020).

## Futuras tendências

Algumas abordagens são claramente percebidas como de crescente utilização, tais como SVM, floresta aleatória e RNA. No caso de SVM, observa-se nos estudos selecionados um crescimento de seu uso no ano de 2020, o que pode se confirmar como uma tendência. Algoritmos SVM tem bom desempenho tanto em problemas de classificação quanto de regressão, no entanto costumam ser lentos para treinar quanto trabalhados com conjunto muito grande de dados. É também uma tarefa difícil escolher parâmetros adequados, como um *kernel* otimizado para o SVM, conforme visto no trabalho de Seyedzadeh et al. (2020), o que pode ser um complicador para sua adoção.

A adoção de soluções baseadas em *fuzzy* tendem a diminuir, uma vez que, mesmo com um histórico de confiabilidade e larga adoção, nessa estratégia não há uso de aprendizado de máquina, o que tende a tornar seu uso mais trabalhoso e com necessidades de intervenções manuais. Soluções híbridas *neuro-fuzzy* poderiam ajudar a contornar esse problema, no entanto elas têm se mostrado superiores apenas quando comparados com estratégias que não adotam inteligência artificial, tal como no trabalho de Kontogiannis et al. (2017) ou contra decisões tomadas por um expert humano, como em Navarro-Hellín et al. (2016). Na pesquisa de Karandish e Šimůnek (2016) uma abordagem *neuro-fuzzy* (ANFIS) superou apenas MLR, sendo inferior ao produto comercial comparado para prever conteúdo de água no solo. *Neuro-fuzzy* também teve desempenho inferior ao LS-SVM, como visto no trabalho de Seyedzadeh et al. (2020).

Nota-se o crescimento de estratégias baseadas em floresta aleatória, como uma forma mais poderosa de aplicação das árvores de decisão em trabalhos tanto de classificação quanto de regressão.

## CONCLUSÃO

Tendo todo o processo metodológico sido bem descrito em sua respectiva seção, a presente pesquisa é claramente replicável, o que reforça sua validade. Se esta RSL for replicada, ela poderia retornar publicações selecionadas ligeiramente diferentes, mas as diferenças seriam o resultado de diferentes julgamentos

peçoais durante as duas últimas etapas de seleção baseadas na leitura. Porém, é altamente improvável que as descobertas gerais mudem no que tange ao cenário de utilização de IA no manejo de irrigação, trabalhos recentes e tendências de uso para o futuro.

Na presente revisão, foi constatada a grande predominância de estratégias de IA baseadas em Redes Neurais Artificiais (RNA) e lógica *fuzzy* para trabalhos baseados em gerenciamento de irrigação e manejo de recursos hídricos. RNAs tem sido a escolha mais recorrente para soluções que necessitem de aprendizado de máquina, com excelente desempenho, geralmente conseguindo ser mais eficiente que algoritmos de regressão consagrados ou mesmo outras estratégias de IA. Estratégias baseadas em RNAs também se mostraram mais eficientes que as equações tradicionais para estimativa da evapotranspiração de referência, sobretudo quando há poucos dados disponíveis.

Soluções implementadas com lógica *fuzzy* têm se sobressaído em Sistemas de Suporte à Decisão (SSD), por trabalhar com regras relativamente fáceis e sobretudo por ser uma aposta de segurança: não tem os benefícios do aprendizado de máquina, mas conseguem boa eficiência em ambientes não críticos. É possível que se note uma diminuição de sua utilização nos anos vindouros, dando lugar a algoritmos de aprendizado de máquina.

Abordagens baseadas em árvores de decisão/floresta aleatória têm se destacado, demonstrando uma tendência de crescimento de sua adoção para os próximos anos.

Há uma clara predominância do uso de sensores autônomos sem fio, interligados em rede, referenciada na maioria dos estudos como WSN (*Wireless Sensor Network*). Boa parte dos pesquisadores constroem seus próprios sensores, utilizando componentes eletrônicos de comunicação facilmente disponíveis em lojas especializadas, ou utilizam sensores de baixo custo. Em comum a boa parte das pesquisas, as informações coletadas são armazenadas em bancos de dados remotos.

Por fim, boas possibilidades de desenvolvimento de soluções para o gerenciamento dos vários aspectos da irrigação na agricultura apontam para o uso crescente de soluções com aprendizado de máquina baseados em RNA, floresta aleatória e SVM, com o uso de redes de sensores sem fio coletando dados continuamente, municiando os conjuntos de dados de aprendizado de máquina e

armazenando informações em nuvem. Outro caminho promissor é o uso de imagens em estratégias utilizando visão computacional e principalmente de sensoriamento remoto, dado a disponibilidade de informações gratuitas que podem ser utilizadas em monitoramento de culturas agrícolas.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Al-Ghobari, H. M.; El-Marazky, M. S.; Dewidar, A. Z.; Mattar, M. A. (2018) Prediction of wind drift and evaporation losses from sprinkler irrigation using neural network and multiple regression techniques. *Agricultural Water Management*, v. 195, p. 211–221. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.agwat.2017.10.005>>. Acessado: 14/02/2020. doi: 10.1016/j.agwat.2017.10.005.
- Allawi, M. F.; Jaafar, O.; Mohamad Hamzah, F.; Abdullah, S. M. S.; El-shafie, A. (2018) Review on applications of artificial intelligence methods for dam and reservoir-hydro-environment models. *Environmental Science and Pollution Research*, v. 25, n. 14, p. 13446–13469. Disponível em: <<http://link.springer.com/10.1007/s11356-018-1867-8>>. Acessado: 9/02/2020. doi: 10.1007/s11356-018-1867-8.
- Blasi, A. H.; Abbad, M. A.; Al-Huweimel, R. (2021) Machine Learning Approach for an Automatic Irrigation System in Southern Jordan Valley. *Engineering, Technology & Applied Science Research*, v. 11, n. 1, p. 6609–6613, doi: 10.48084/etasr.3944.
- Cao, W. (1992) *Development of An Expert System for Irrigation and Fertilization Management in the Pacific Northwest*. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Oregon State University, 197p.
- CAPES. Portal de Periódicos Capes/MEC. Disponível em: <<http://www.periodicos.capes.gov.br>>. Acessado: 10/janeiro/2020.
- Chang, C.-L.; Lin, K.-M. (2018) Smart Agricultural Machine with a Computer Vision-Based Weeding and Variable-Rate Irrigation Scheme. *Robotics*, v. 7, n. 3, p. 38. Disponível em: <<http://www.mdpi.com/2218-6581/7/3/38>>. Acessado: 10/02/2020. doi: 10.3390/robotics7030038.
- Dias, S. H. B.; Filgueiras, R.; Filho, E. I. F.; Arcanjo, G. S.; Da Silva, G. H.; Mantovani, E. C.; Da Cunha, F. F. (2021) Reference evapotranspiration of Brazil modeled with machine learning techniques and remote sensing. *PLoS ONE*, v. 16, n. 2 February, p. 1–20, doi: 10.1371/journal.pone.0245834.
- Elnesr, M. N.; Alazba, A. A. (2017) Simulation of water distribution under surface

- dripper using artificial neural networks. *Computers and Electronics in Agriculture*, v. 143, n. October, p. 90–99. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.compag.2017.10.003>>. Acessado: 14/02/2020. doi: 10.1016/j.compag.2017.10.003.
- FAO. AQUASTAT - FAO's Global Information System on Water and Agriculture. . Disponível em: <<http://www.fao.org/aquastat/en/>>. Acessado: 12/fevereiro/2021.
- Fazel Zarandi, M. H.; Sadat Asl, A. A.; Sotudian, S.; Castillo, O. (2020) A state of the art review of intelligent scheduling. *Artificial Intelligence Review*, v. 53, n. 1, p. 501–593. Disponível em: <<http://link.springer.com/10.1007/s10462-018-9667-6>>. Acessado: 14/02/2020. doi: 10.1007/s10462-018-9667-6.
- Feng, Y.; Cui, N.; Zhao, L.; Hu, X.; Gong, D. (2016) Comparison of ELM, GANN, WNN and empirical models for estimating reference evapotranspiration in humid region of Southwest China. *Journal of Hydrology*, v. 536, p. 376–383. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.02.053>>. Acessado: 10/02/2020. doi: 10.1016/j.jhydrol.2016.02.053.
- Ferreira, L. B.; Duarte, A. B.; Cunha, F. F. da; Fernandes Filho, E. I. (2019) Multivariate adaptive regression splines (MARS) applied to daily reference evapotranspiration modeling with limited weather data. *Acta Scientiarum. Agronomy*, v. 41, n. 1, p. 39880. Disponível em: <<http://periodicos.uem.br/ojs/index.php/ActaSciAgron/article/view/39880>>. Acessado: 14/02/2020. doi: 10.4025/actasciagron.v41i1.39880.
- Filgueiras, R.; Almeida, T. S.; Mantovani, E. C.; Dias, S. H. B.; Fernandes-Filho, E. I.; Da Cunha, F. F.; Venancio, L. P. (2020) Soil water content and actual evapotranspiration predictions using regression algorithms and remote sensing data. *Agricultural Water Management*, v. 241, n. June, p. 106346. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106346>>. doi: 10.1016/j.agwat.2020.106346.
- Géron, A. (2019) *Mãos à Obra: Aprendizado de Máquina com Scikit-Learn & TensorFlow*. 1ª edição ed. Rio de Janeiro: Alta Books, 576p.
- Giusti, E.; Marsili-Libelli, S. (2015) A Fuzzy Decision Support System for irrigation and water conservation in agriculture. *Environmental Modelling and Software*, v. 63, p. 73–86. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.envsoft.2014.09.020>>. Acessado: 10/02/2020. doi: 10.1016/j.envsoft.2014.09.020.
- Goap, A.; Sharma, D.; Shukla, A. K.; Rama Krishna, C. (2018) An IoT based smart irrigation management system using Machine learning and open source technologies. *Computers and Electronics in Agriculture*, v. 155, n. September, p. 41–49. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.compag.2018.09.040>>. Acessado: 14/02/2020. doi: 10.1016/j.compag.2018.09.040.
- González Perea, R.; Camacho Poyato, E.; Montesinos, P.; Rodríguez Díaz, J. A. (2019) Prediction of irrigation event occurrence at farm level using optimal

- decision trees. *Computers and Electronics in Agriculture*, v. 157, n. December 2018, p. 173–180. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.compag.2018.12.043>>. doi: 10.1016/j.compag.2018.12.043.
- Gu, Z.; Qi, Z.; Ma, L.; Gui, D.; Xu, J.; Fang, Q.; Yuan, S.; Feng, G. (2017) Development of an irrigation scheduling software based on model predicted crop water stress. *Computers and Electronics in Agriculture*, v. 143, p. 208–221. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168169917301485>>. Acessado: 9/02/2020. doi: 10.1016/J.COMPAG.2017.10.023.
- Gu, Z.; Zhu, T.; Jiao, X.; Xu, J.; Qi, Z. (2021) Neural network soil moisture model for irrigation scheduling. *Computers and Electronics in Agriculture*, v. 180, n. 1, p. 105801. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.compag.2020.105801>>. doi: 10.1016/j.compag.2020.105801.
- Haghverdi, A.; Leib, B. G.; Washington-Allen, R. A.; Ayers, P. D.; Buschermohle, M. J. (2015) High-resolution prediction of soil available water content within the crop root zone. *Journal of Hydrology*, v. 530, p. 167–179. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.09.061>>. Acessado: 10/02/2020. doi: 10.1016/j.jhydrol.2015.09.061.
- Hoseini, Y. (2019) Use fuzzy interface systems to optimize land suitability evaluation for surface and trickle irrigation. *Information Processing in Agriculture*, v. 6, n. 1, p. 11–19. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.inpa.2018.09.003>>. Acessado: 10/02/2020. doi: 10.1016/j.inpa.2018.09.003.
- Institute, W. R. Aqueduct Water Risk Atlas. . Disponível em: <<https://wribrasil.org.br/en/resources/maps/aqueduct-water-risk-atlas>>. Acessado: 26/fevereiro/2020.
- Jamroen, C.; Komkum, P.; Fongkerd, C.; Krongpha, W. (2020) An intelligent irrigation scheduling system using low-cost wireless sensor network toward sustainable and precision agriculture. *IEEE Access*, v. 8, p. 172756–172769, doi: 10.1109/ACCESS.2020.3025590.
- Karandish, F.; Šimůnek, J. (2016) A comparison of numerical and machine-learning modeling of soil water content with limited input data. *Journal of Hydrology*, v. 543, p. 892–909. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0022169416307132>>. Acessado: 10/02/2020. doi: 10.1016/j.jhydrol.2016.11.007.
- Karimi, S.; Shiri, J.; Marti, P. (2020) Supplanting missing climatic inputs in classical and random forest models for estimating reference evapotranspiration in humid coastal areas of Iran. *Computers and Electronics in Agriculture*, v. 176, n. July, p. 105633. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.compag.2020.105633>>. doi: 10.1016/j.compag.2020.105633.
- Kelley, J.; Pardyjak, E. (2019) Using Neural Networks to Estimate Site-Specific Crop

- Evapotranspiration with Low-Cost Sensors. *Agronomy*, v. 9, n. 2, p. 108. Disponível em: <<http://www.mdpi.com/2073-4395/9/2/108>>. Acessado: 14/02/2020. doi: 10.3390/agronomy9020108.
- Keswani, B.; Mohapatra, A. G.; Mohanty, A.; Khanna, A.; Rodrigues, J. J. P. C.; Gupta, D.; De Albuquerque, V. H. C. (2019) Adapting weather conditions based IoT enabled smart irrigation technique in precision agriculture mechanisms. *Neural Computing and Applications*, v. 31, n. S1, p. 277–292. Disponível em: <<http://link.springer.com/10.1007/s00521-018-3737-1>>. Acessado: 9/02/2020. doi: 10.1007/s00521-018-3737-1.
- King, B. A.; Shellie, K. C. (2016) Evaluation of neural network modeling to predict non-water-stressed leaf temperature in wine grape for calculation of crop water stress index. *Agricultural Water Management*, v. 167, p. 38–52. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.agwat.2015.12.009>>. Acessado: 10/02/2020. doi: 10.1016/j.agwat.2015.12.009.
- Kitchenham, B. Procedures for Performing Systematic Reviews. , nº TR/SE-0401. Staffordshire, UK: [s.n.], jan. 2004. Disponível em: <<https://www.inf.ufsc.br/~aldo.vw/kitchenham.pdf>>. Acessado: 15/04/2020.
- Kontogiannis, S.; Kokkonis, G.; Ellinidou, S.; Valsamidis, S. (2017) Proposed Fuzzy-NN Algorithm with LoRaCommunication Protocol for Clustered Irrigation Systems. *Future Internet*, v. 9, n. 4, p. 78. Disponível em: <<http://www.mdpi.com/1999-5903/9/4/78>>. Acessado: 10/02/2020. doi: 10.3390/fi9040078.
- Luger, G. F. (2013) *Inteligência Artificial*. 6ª edição ed. São Paulo: Pearson, 636p.
- Maia, L. T. (2007) *Um estudo sobre aplicação de técnicas de inteligência artificial e engenharia de software à construção de um sistema de supervisão e controle*. Dissertação (Mestrado) - Brasília - DF - Universidade de Brasília, 100p.
- Marro, A. A.; Souza, A. M. de C.; Cavalcante, E. R. de S.; Bezerra, G. S.; Nunes, R. de O. (2010) *Lógica Fuzzy: Conceitos e aplicações*. Universidade Federal do Rio Grande do Norte . Natal-RN , 2010.
- Mohan, S.; Arumugam, N. (1997) Expert system applications in irrigation management: an overview. *Computers and Electronics in Agriculture*, v. 17, n. 3, p. 263–280, jun. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0168169997013094>>. doi: 10.1016/S0168-1699(97)01309-4.
- Montaño, R. A. N. R. (2016) *Aplicação de Técnicas de Aprendizado de Máquina na Mensuração Florestal*. Tese (Doutorado em Informática) - Curitiba - PR - Universidade Federal do Paraná, 102p.
- Mouatadid, S.; Adamowski, J. F.; Tiwari, M. K.; Quilty, J. M. (2019) Coupling the maximum overlap discrete wavelet transform and long short-term memory networks for irrigation flow forecasting. *Agricultural Water Management*, v. 219, n. August 2018, p. 72–85. Disponível em:

- <<https://doi.org/10.1016/j.agwat.2019.03.045>>. Acessado: 10/02/2020. doi: 10.1016/j.agwat.2019.03.045.
- Munir, M. S.; Bajwa, I. S.; Naeem, M. A.; Ramzan, B. (2018) Design and Implementation of an IoT System for Smart Energy Consumption and Smart Irrigation in Tunnel Farming. *Energies*, v. 11, n. 12, p. 3427. Disponível em: <<http://www.mdpi.com/1996-1073/11/12/3427>>. Acessado: 14/02/2020. doi: 10.3390/en11123427.
- Nadafzadeh, M.; Mehdizadeh, S. A. (2019) Design and fabrication of an intelligent control system for determination of watering time for turfgrass plant using computer vision system and artificial neural network. *Precision Agriculture*, v. 20, n. 5, p. 857–879. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s11119-018-9618-x>>. Acessado: 9/02/2020. doi: 10.1007/s11119-018-9618-x.
- Navarro-Hellín, H.; Martínez-del-Rincon, J.; Domingo-Miguel, R.; Soto-Valles, F.; Torres-Sánchez, R. (2016) A decision support system for managing irrigation in agriculture. *Computers and Electronics in Agriculture*, v. 124, p. 121–131. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S016816991630117X>>. Acessado: 9/02/2020. doi: 10.1016/j.compag.2016.04.003.
- Norvig, P.; Russell, S. (2013) *Inteligência Artificial*. 3ª edição ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 1324p.
- Omidzade, F.; Ghodousi, H.; Shahverdi, K. (2020) Comparing Fuzzy SARSA Learning and Ant Colony Optimization Algorithms in Water Delivery Scheduling under Water Shortage Conditions. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, v. 146, n. 9, p. 04020028, doi: 10.1061/(asce)ir.1943-4774.0001496.
- Patrício, D. I.; Rieder, R. (2018) Computer vision and artificial intelligence in precision agriculture for grain crops: A systematic review. *Computers and Electronics in Agriculture*, v. 153, n. August, p. 69–81, doi: 10.1016/j.compag.2018.08.001.
- Raza, A.; Shoaib, M.; Faiz, M. A.; Baig, F.; Khan, M. M.; Ullah, M. K.; Zubair, M. (2020) Comparative Assessment of Reference Evapotranspiration Estimation Using Conventional Method and Machine Learning Algorithms in Four Climatic Regions. *Pure and Applied Geophysics*, v. 177, n. 9, p. 4479–4508, doi: 10.1007/s00024-020-02473-5.
- Seyedzadeh, A.; Maroufpoor, S.; Maroufpoor, E.; Shiri, J.; Bozorg-Haddad, O.; Gavazi, F. (2020) Artificial intelligence approach to estimate discharge of drip tape irrigation based on temperature and pressure. *Agricultural Water Management*, v. 228, n. September 2019, p. 105905. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.agwat.2019.105905>>. doi: 10.1016/j.agwat.2019.105905.
- Shi, X.; Han, W.; Zhao, T.; Tang, J. (2019) Decision Support System for Variable Rate Irrigation Based on UAV Multispectral Remote Sensing. *Sensors*, v. 19,

- n. 13, p. 2880. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/1424-8220/19/13/2880>>. Acessado: 9/02/2020. doi: 10.3390/s19132880.
- Shiri, J.; Karimi, B.; Karimi, N.; Kazemi, M. H.; Karimi, S. (2020) Simulating wetting front dimensions of drip irrigation systems: Multi criteria assessment of soft computing models. *Journal of Hydrology*, v. 585, n. January, p. 124792. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.124792>>. doi: 10.1016/j.jhydrol.2020.124792.
- Sidhu, R. K.; Kumar, R.; Rana, P. S. (2020a) Long short-term memory neural network-based multi-level model for smart irrigation. *Modern Physics Letters B*, v. 34, n. 36, doi: 10.1142/S0217984920504187.
- Sidhu, R. K.; Kumar, R.; Rana, P. S. (2020b) Machine learning based crop water demand forecasting using minimum climatological data. *Multimedia Tools and Applications*, v. 79, n. 19–20, p. 13109–13124, doi: 10.1007/s11042-019-08533-w.
- Silva Filho, C. F. A. de B. (2009) *REVISÃO SISTEMÁTICA E META ANÁLISE DA EFICIÊNCIA DE FUNGICIDAS NA CULTURA DO ARROZ IRRIGADO NO RIO GRANDE DO SUL*. Lato sensu (especialização em Tecnologias Inovadoras de Pragas e Doenças de Plantas) – Faculdade de Agronomia - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 76p.
- Stone, K. C.; Bauer, P. J.; Busscher, W. J.; Millen, J. A.; Evans, D. E.; Strickland, E. E. (2015) Variable-rate irrigation management using an expert system in the eastern coastal plain. *Irrigation Science*, v. 33, n. 3, p. 167–175. Disponível em: <<http://link.springer.com/10.1007/s00271-014-0457-x>>. Acessado: 9/02/2020. doi: 10.1007/s00271-014-0457-x.
- Torres-Sanchez, R.; Navarro-Hellin, H.; Guillamon-Frutos, A.; San-Segundo, R.; Ruiz-Abellón, M. C.; Domingo-Miguel, R. (2020) A decision support system for irrigation management: Analysis and implementation of different learning techniques. *Water (Switzerland)*, v. 12, n. 2, doi: 10.3390/w12020548.
- Torres, A. B. B.; Da Rocha, A. R.; Coelho da Silva, T. L.; De Souza, J. N.; Gondim, R. S. (2020) Multilevel data fusion for the internet of things in smart agriculture. *Computers and Electronics in Agriculture*, v. 171, n. February, p. 105309. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.compag.2020.105309>>. doi: 10.1016/j.compag.2020.105309.
- Villarrubia, G.; Paz, J. F. De; Iglesia, D. H. D. La; Bajo, J. (2017) Combining Multi-Agent Systems and Wireless Sensor Networks for Monitoring Crop Irrigation. *Sensors*, v. 17, n. 8, p. 1775. Disponível em: <<http://www.mdpi.com/1424-8220/17/8/1775>>. Acessado: 9/02/2020. doi: 10.3390/s17081775.
- Wakamori, K.; Mizuno, R.; Nakanishi, G.; Mineno, H. (2020) Multimodal neural network with clustering-based drop for estimating plant water stress. *Computers and Electronics in Agriculture*, v. 168, n. December 2019, p. 105118. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.compag.2019.105118>>. doi: 10.1016/j.compag.2019.105118.

WEF. Innovators wanted: these countries spend the most on R&D. . Disponível em: <<https://www.weforum.org/agenda/2018/12/how-much-countries-spend-on-r-d/>>. Acessado: 20/fevereiro/2020.

Yang, G.; Liu, L.; Guo, P.; Li, M. (2017) A flexible decision support system for irrigation scheduling in an irrigation district in China. *Agricultural Water Management*, v. 179, p. 378–389. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0378377416302657>>. Acessado: 14/02/2020. doi: 10.1016/j.agwat.2016.07.019.

### 3.3 MOVIMENTO DO FLUXO XILEMÁTICO DURANTE PRESSURIZAÇÃO NA CÂMARA DE SCHOLANDER: MODELAGEM COMPUTACIONAL E ABORDAGEM EXPERIMENTAL

#### RESUMO

O uso da câmara de pressão como instrumento de apoio ao manejo de irrigação nas medidas do status hídrico da planta vem sendo feito ao longo dos anos com bom desempenho em algumas espécies. Tem sido aceito que a pressão de equilíbrio ( $P_B$ ) medida pela câmara reflete o módulo do valor da pressão negativa do xilema. No entanto, diversos estudos constataram valores discrepantes da pressão dos vasos do xilema quando comparados com outras abordagens técnicas, levando a diferentes interpretações dos valores de  $P_B$  obtidos pela câmara de pressão. A partir das análises destas novas interpretações e buscando compreender melhor o fenômeno, esta pesquisa propõe um método termométrico baseado no pulso de calor para rastreamento de fluxo de seiva, para identificar o início do fluxo mediante pressurização dentro da câmara de pressão. Para tal, foi desenvolvido um modelo de simulação computacional utilizando o método dos elementos finitos para análise de condução de calor mediante fluxo e também desenvolvido um sensor de fluxo de seiva para ser colocado dentro da câmara, na intenção de validar experimentalmente o modelo computacional proposto e auxiliar na compreensão dos resultados. Os resultados da simulação e do experimento mostraram que não há defasagem de tempo significativa entre o início da

pressurização e o movimento do fluxo de seiva no pecíolo foliar, concluindo que, embora os valores de  $P_B$  obtidos na câmara possam auxiliar no manejo da irrigação, ele não apresenta uma relação direta com alguma possível tensão negativa do xilema e sim uma função direta da quantidade de água livre disponível na folha sob pressão.

## ABSTRACT

The use of the pressure chamber as an instrument to support irrigation management in measuring the water status of the plant has been done over the years with good performance in some species. It has been accepted that the balance pressure ( $P_B$ ) measured by the chamber reflects the magnitude of the negative pressure value of the xylem. However, several studies found discrepant values of xylem vessel pressure when compared with other technical approaches, leading to different interpretations of the  $P_B$  values obtained by the pressure chamber. Based on the analysis of these new interpretations and seeking to better understand the phenomenon, this research proposes a heat pulse-based thermometric method for tracking sap flow, to identify the beginning of the flow through pressurization inside the pressure chamber. To this end, a computer simulation model was developed using the finite element method for analysis of heat conduction by flow and a sap flow sensor was also developed to be placed inside the chamber, with the intention of experimentally validating the proposed computational model and assist in understanding the results. The results of the simulation and the experiment showed that there is no significant time lag between the start of pressurization and the movement of the sap flow in the leaf petiole, concluding that, although the  $P_B$  values obtained in the chamber can help in the management of irrigation, it does not have a direct relationship with any possible negative xylem tension, but a direct function of the amount of free water available in the leaf under pressure.

## INTRODUÇÃO

O dispositivo mecânico conhecido como câmara de pressão tem sido utilizado com bastante frequência para medidas de potencial hídrico foliar, tanto em cultivos comerciais quanto em análises de laboratório, com grande aceitação, para investigar vários aspectos das relações hídricas das plantas. Um órgão da planta (geralmente uma folha, ou uma parte da haste) é cortado da planta e fechado dentro da câmara, tendo a extremidade cortada exposta do lado de fora deste receptáculo, para visualização. Aumenta-se a pressão dentro da câmara introduzindo gás (geralmente nitrogênio) até que a seiva apareça na superfície de corte, exposta do lado de fora, através dos vasos do xilema. Neste momento, a pressão da câmara é registrada como a “pressão de equilíbrio” ( $P_B$ ) ou “endpoint”. Quando essa pressão na câmara ultrapassa a necessária para empurrar o líquido para a superfície, a seiva do xilema se acumula na superfície e uma espuma densa com bolhas de gás estourando flui através da seiva (Canny e Roderick, 2005). Resumidamente, este é o procedimento de medição padronizado, comum a todos os que já usaram uma câmara de pressão, seja em campo ou laboratório.

É certo que diversas pesquisas concluíram que as medidas tomadas com a câmara de pressão medem adequadamente a pressão do xilema, como em Wei et al. (2001), que realizou comparações dessas medidas com sondas de pressão de xilema preenchidas com óleo e água, demonstrando uma concordância entre os métodos em uma faixa de 0 a 0,8 MPa. Uma nova validação do método foi também indicada por Cochard et al. (2001), baseado em variações de diâmetros no caule e sua correlação com as medidas obtidas com a câmara com folhas de noqueiras. No entanto, mesmo após mais de 50 anos da criação da técnica, ainda há uma grande discussão sobre quais as reais propriedades de uma folha que são medidas no processo de pressurização em uma câmara de pressão de Scholander.

Alguns autores sugerem diferentes interpretações para a pressão de equilíbrio ( $P_B$ ) nos tecidos foliares. Trabalhos constataram que maiores incrementos de pressão seriam necessários para comprimir a água à medida que o conteúdo de água diminui. Assim, as maiores pressões necessárias para espremer a seiva do rododendro em comparação com as folhas de girassol podem ser simplesmente porque o rododendro tem paredes celulares mais espessas mais resistentes à deformação pela pressão (Weatherley, 1970). Uma análise realizada

por Canny e Roderick (2005) demonstrou através de experimento que parte do gás injetado na câmara acaba se dissolvendo na solução que percorre o xilema, dando origem a um fluxo de gás para fora da câmara, até à extremidade do pecíolo cortado quando a pressão interna é maior que a pressão atmosférica e até mesmo por vários segundos após a exaustão da câmara e consequente equilíbrio de pressão. Isso significa dizer que é possível que o líquido do xilema seja trazido para a superfície de corte por um aumento no volume dos espaços de gás que estão dentro do limite externo do material não gasoso, ao invés de apenas pela aplicação de pressão de câmara, e isso deve ser considerado como uma fonte potencial de variação de  $P_B$ .

Roderick e Canny (2005) intensificaram estes argumentos em um artigo complementar, com uma análise mecânica, em contraponto a algumas análises termodinâmicas, para demonstrar que o que está sendo comprimido pela pressão é o “limite externo do material não gasoso da folha, que inclui o continuum das paredes celulares e a fase líquida” (Canny e Roderick, 2005). Os mesmos autores anteriormente citados alegam que Scholander e seus colegas assumiram que a pressão do líquido no xilema da folha cortada é inicialmente negativa e, ao equilibrá-la com uma pressão positiva, o líquido apareceria na superfície do corte. O problema dessa interpretação é que a pressão negativa significa que uma determinada massa de água ocupa mais espaço do que se estivesse sob pressão positiva. Assim, uma mudança de pressão negativa para positiva significa que o espaço ocupado por uma massa de água diminuiria. Em consequência, a interpretação de Scholander é vista de trás para frente (Roderick e Canny, 2005).

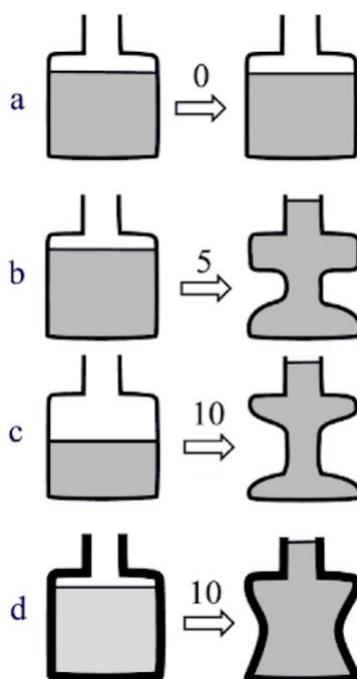
Outro fator de controvérsia é a ligação entre a técnica da câmara de pressão com a teoria de Coesão-Tensão (C-T). Embora diversas pesquisas desde Otto Renner, no início do século XX, já demonstravam que a água no xilema pode de fato existir sob tensão, favorecendo a teoria C-T, mas algumas ressalvas foram feitas, citando que o turgor das células do parênquima do xilema atinge o equilíbrio com a pressão dos vasos adjacentes e, dessa forma, esse acoplamento hidráulico impediria as tensões de vários MPa inferidas pela teoria C-T (Bentrup, 2017).

Algumas pesquisas realizadas com técnicas pouco invasivas (ou mesmo não-invasivas) desafiam essa ligação histórica da teoria C-T com a bomba de Scholander. A aquisição de água de algumas árvores e alguns tipos de cipós de fato depende de uma incrível diversidade de mecanismos, ao invés de

exclusivamente de gradientes de pressão hidrostática no conduto do xilema postulado pela teoria C-T. Zimmermann et al. (2004) propuseram uma teoria “multi-forças” de aquisição de água pelas plantas para explicar o estado da água na planta. Seu conceito avançado inclui métodos de biologia molecular de transporte transmembrana ativo e monitoramento online do status hídrico da planta no campo (Bentrup, 2017).

Durante experimentos com sensores de fluxo de seiva utilizando a técnica do pulso de calor, surgiu a hipótese da detecção do fluxo dentro da câmara, no espaço logo abaixo do selo de borracha da tampa que veda o pecíolo, como forma de detecção precoce do mesmo, considerando que a maioria dos experimentos similares com sensores de fluxo de seiva para detecção não-visual do fluxo indicador da pressão de equilíbrio ( $P_B$ ) ou *endpoint* são realizados com sensores colocados na porção do órgão vegetal que se projeta fora da câmara. Para tal tarefa, foi desenvolvido antes um modelo computacional baseado no Método dos Elementos Finitos (MEF) para realizar uma simulação de condução de calor *in silico*, como forma de analisar as condições e obter uma visão geral do fenômeno a ser investigado.

A ideia por trás da proposta de simulação com o método dos elementos finitos é amparado na analogia proposta por Roderick e Canny (2005), que dá uma interpretação mecânica para as medidas tomadas com a câmara de pressão. Os autores citados comparam o órgão vegetal sujeito à pressão como uma garrafa plástica com água, onde a pressão exercida nas paredes flexíveis da garrafa faz o conteúdo de água se elevar, sempre proporcionalmente à força de pressão empregada e também influenciada pela rigidez das paredes da garrafa, em comparação com as paredes dos tecidos vegetais que, quanto mais rígidas, mais força exigiria para o deslocamento da massa líquida (Figura 1).



**Figura 1:** “Analogia da garrafa plástica”, com cinco recipientes abertos contendo água e o efeito de uma pressão externa por uma força arbitrária, com transição no tempo da esquerda para a direita. Em (a), nenhuma pressão; em (b) 5 unidades arbitrárias de pressão levam a água ao topo; em (c) há menos água, necessitando maior pressão (10 unidades); em (d) as paredes são mais espessas e, mesmo contendo mais água, ainda necessita de mesma pressão de (c) para elevar a massa de água. Fonte: Roderick e Canny (2005), adaptado pelo autor.

Assim, como forma de estudar os pressupostos e conclusões das análises acima através de um novo prisma, o objetivo dessa pesquisa é investigar, através do método térmico de pulso de calor, o comportamento do fluxo de seiva dentro da câmara e, principalmente, se corresponde à análise mecânica demonstrada nos estudos citados anteriormente, no que tange aos fatores que influenciam os valores de pressão de equilíbrio ( $P_B$ ). Para tal, utiliza-se a simulação computacional utilizando o método dos elementos finitos citado anteriormente, resolvendo uma equação diferencial para cenários de fluxo com diversas velocidades e posteriormente um experimento com sensores de temperatura inseridos na parte interior da tampa da câmara de pressão para validação da simulação proposta. Para tanto é utilizado um método de razão de calor, buscando identificar as inflexões ou mudanças de comportamento nos parâmetros de temperatura observados, indicando o início do movimento do fluxo no tecido vegetal.

## MATERIAL E MÉTODOS

### Teoria

O princípio básico do método das medidas de fluxo de seiva por pulso de calor é promover o aquecimento da seiva em um determinado ponto do órgão da planta, seguido pelo rastreamento do calor ao longo do caminho da seiva usando sensores de temperatura. Ao considerar um tecido vegetal sendo homogêneo e isotrópico, com a seiva se movendo na direção  $y$ , a transferência de calor condutiva e convectiva combinada pode ser descrita segundo a Equação 1 (Marshall, 1958):

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \kappa \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) - v \frac{\partial T}{\partial y} \quad (1)$$

onde  $T$  é a temperatura (K),  $t$  é o tempo (s),  $\kappa$  é a difusividade térmica ( $\text{m}^2 \text{s}^{-1}$ ) do tecido vegetal e da seiva;  $x$  e  $y$  são coordenadas espaciais (m). A velocidade de pulso de calor  $V$  ( $\text{m s}^{-1}$ ), considerada como um valor positivo na direção  $y$ , está relacionada à densidade do fluxo de seiva  $J$  ( $\text{m s}^{-1}$ ) pela expressão (Equação 2):

$$V = J \left( \frac{\rho_s c_s}{\rho c} \right) \quad (2)$$

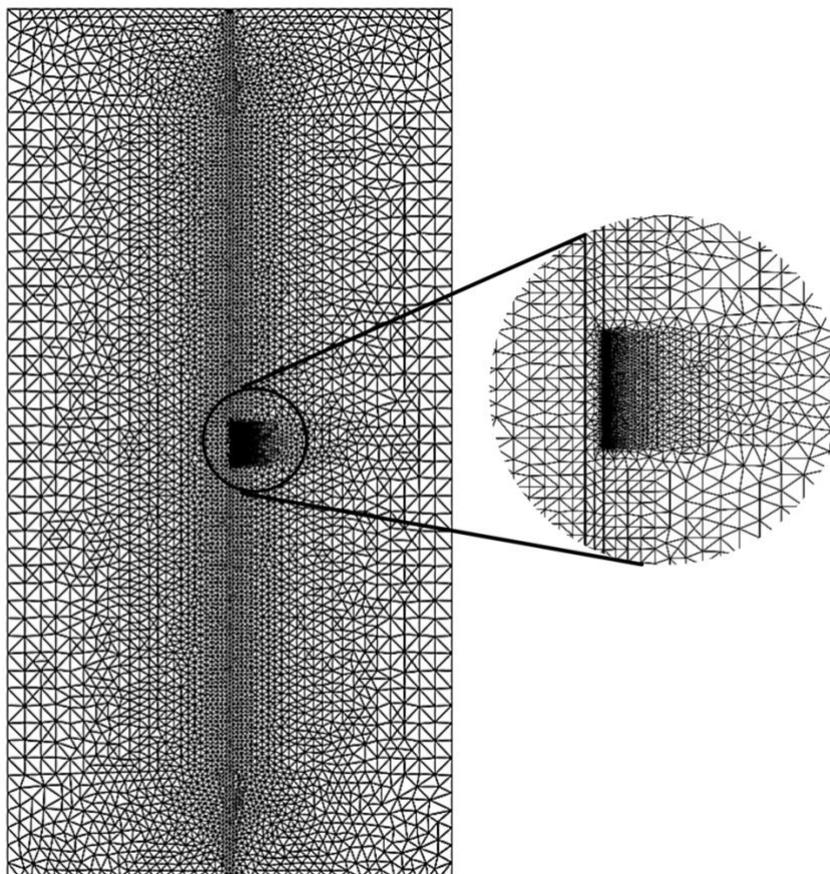
### Simulação do fluxo utilizando MEF

A proposta da presente pesquisa é realizar a simulação utilizando o método dos elementos finitos com o programa FreeFem++<sup>2</sup> para verificar o comportamento de uma instalação ideal e validar seus resultados de maneira experimental, utilizando sensores de pulso de calor para acompanhar o movimento da seiva e determinar o ponto que indica o início do fluxo. A base para a simulação foi desenvolvida para um aquecimento ideal, em uma estrutura em duas dimensões, visto que não interessa a perda de calor radial, uma vez que não acompanha o sentido do fluxo. Trata-se da simulação de um pecíolo vegetal cilíndrico de 1,5 mm

---

<sup>2</sup> <http://www3.freefem.org/>

de diâmetro entre duas áreas maiores, simulando um isolamento do pecíolo, como um invólucro. O comprimento do cilindro de fluxo foi estipulado em 20 cm e a área (Figura 2).

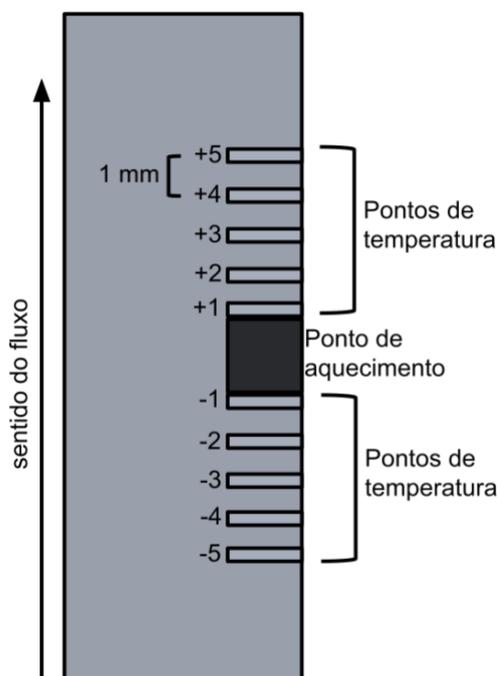


**Figura 2:** Malha (mesh) criada para solução das equações diferenciais pelo MEF com detalhe aumentado do trecho onde é realizado o aquecimento e as medidas de temperatura. Fonte: o autor (2021).

O modelo de elementos finitos para aplicação da equação diferencial que rege o transporte de calor em cada nó definido da estrutura 2D foi desenvolvido para a simulação, com ênfase no trecho central onde a malha foi intencionalmente aumentada em seu número de nós (e conseqüentemente o número de elementos) para um melhor resultado dos pontos de tomada de temperatura, na lateral direita do cilindro de fluxo, como visto no destaque da Figura 2.

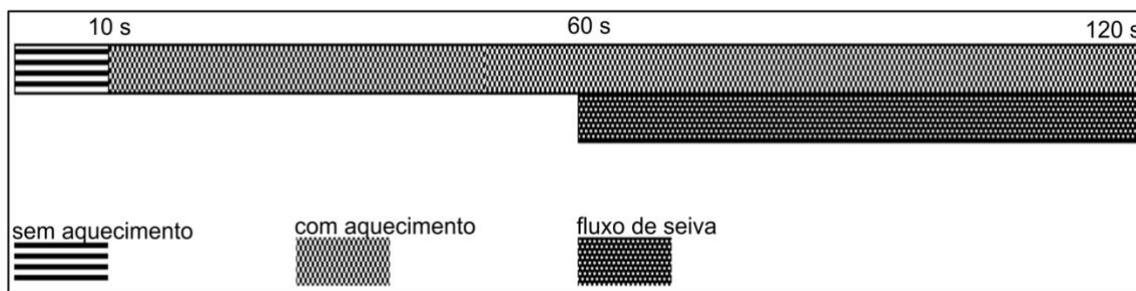
Foi designado o ponto médio na lateral direita do cilindro de fluxo como a fonte de aquecimento e foram também determinados cinco pontos de tomada de

temperatura acima desse ponto, com 1 milímetro de espaço entre eles, e cinco pontos abaixo com o mesmo espaçamento. Resumidamente, 1, 2, 3, 4 e 5 mm a montante e a mesma configuração a jusante do ponto de aquecimento, conforme Figura 3.



**Figura 3:** Esquema com o posicionamento do ponto de aquecimento e dos pontos de tomada de temperatura na simulação com MEF. Fonte: o autor (2021).

Para efeitos da simulação, foi determinado um ciclo de 120 segundos, sendo os 10 s iniciais de repouso; o aquecimento é ativado em a partir de 10 s, e o fluxo de seiva, a diferentes taxas de velocidade é ativado aos 60 s, conforme linha do tempo (Figura 4).



**Figura 4:** Ciclo temporal de testes com MEF em diversas velocidades de fluxo. Fonte: o autor (2021).

Dentro do ciclo exposto na Figura 4 foram testadas seis velocidades máxima de fluxo diferentes, a saber: 0, 50, 100, 200, 300 e 500  $\mu\text{m s}^{-1}$ , sempre começando na velocidade zero e indo até estes valores em um intervalo de tempo de 60 s (início em 60 s, fim em 120 s), na tentativa de simular um aumento de fluxo de seiva de valor arbitrário, que aconteceria mediante um incremento de pressão na câmara.

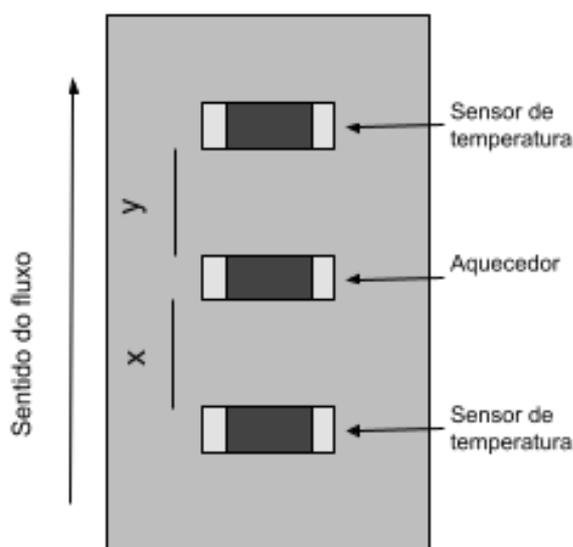
Os diversos pontos de tomada de temperatura foram concebidos como forma de verificar possibilidades de posicionamento dos sensores e contornar possíveis deficiências de distância na montagem dos sensores físicos no momento da validação experimental, dado o tamanho reduzido dos componentes envolvidos. Como a situação prática difere dessa idealização concebida para a simulação, algumas variações são esperadas na validação experimental.

Os dados numéricos gerados pelo método dos elementos finitos foram utilizados para verificar a condução de calor pelo cilindro de fluxo, com os valores de temperatura para os pontos abaixo e acima do centro de aquecimento.

### Construção dos sensores

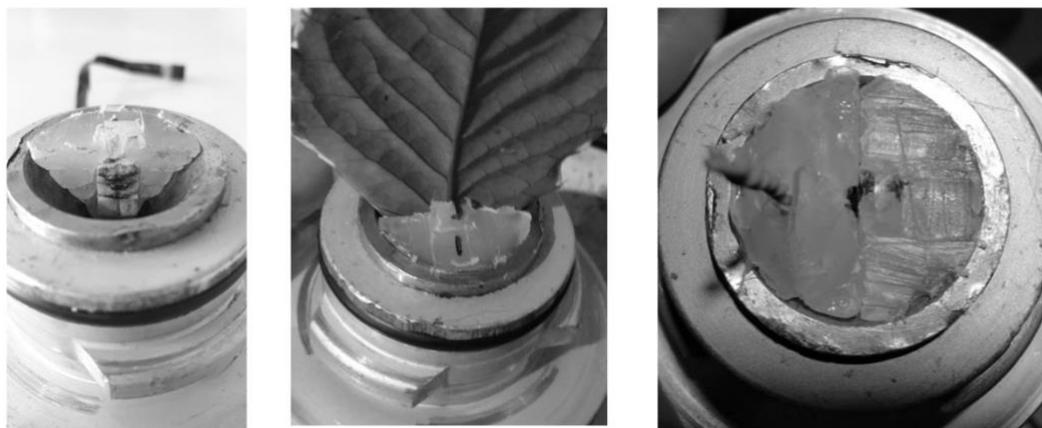
Os sensores foram desenvolvidos e construídos no Laboratório de Engenharia Agrícola (LEAG), localizado no Centro de Ciências e Tecnologias Agrárias (CCTA) da Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro (UENF), Campos dos Goytacazes, RJ, Brasil. A montagem foi baseada no método de pulso de calor que relaciona a velocidade do pulso com a velocidade de deslocamento da seiva nos órgãos das plantas, embora a medida da velocidade não esteja no escopo da pesquisa. O sensor proposto (Figura 5) consiste em dois

termistores SMD (surface-mount device) de 10K ohms/25<sup>o</sup>, um a jusante e outro a montante, ambos equidistantes (cenário ideal) do ponto central, que é constituído por um resistor SMD de 10 ohms, que foi utilizado como fonte de aquecimento. A fixação se deu utilizando adesivo termoplástico moldável e a montagem dos mesmos foi realizada na extremidade inferior da tampa da câmara de pressão (fabricante ELE International), de forma a deixá-los fixados e isolados de efeitos de temperaturas advindos do gás injetado na câmara de pressão.



**Figura 5:** Esquema de montagem dos sensores utilizados para validação experimental da simulação. Fonte: o autor (2021).

Dada as dimensões reduzidas dos componentes eletrônicos envolvidos, é muito difícil realizar uma montagem de dispositivos SMD de forma a manter as distâncias iguais ( $x$  e  $y$  na Figura 5) entre os dois termistores e a fonte de aquecimento (resistor). Como já era sabido que seria muito difícil obter  $x=y$  (termistores equidistantes), este foi um dos motivos da simulação MEF contar com diversos pontos de dados de temperatura, tanto acima quanto abaixo do ponto de aquecimento, a fim de simular também uma possível diferença de posicionamento nos sensores físicos (Figura 6).



**Figura 6:** Imagens do sensor e seu encapsulamento em adesivo termoplástico montado na parte interna da tampa da câmara de pressão. Fonte: o autor (2021).

A ligação ao circuito coletor de dados se deu por fios de cobre esmaltado da menor bitola possível de manuseio (28 AWG), para que os sensores pudessem ser posicionados dentro da câmara e estes fios passassem lateralmente pelo selo de borracha que veda o pecíolo sem a necessidade de alterações definitivas ou destrutivas na câmara e que não ocasionassem vazamentos de gás durante a pressurização.

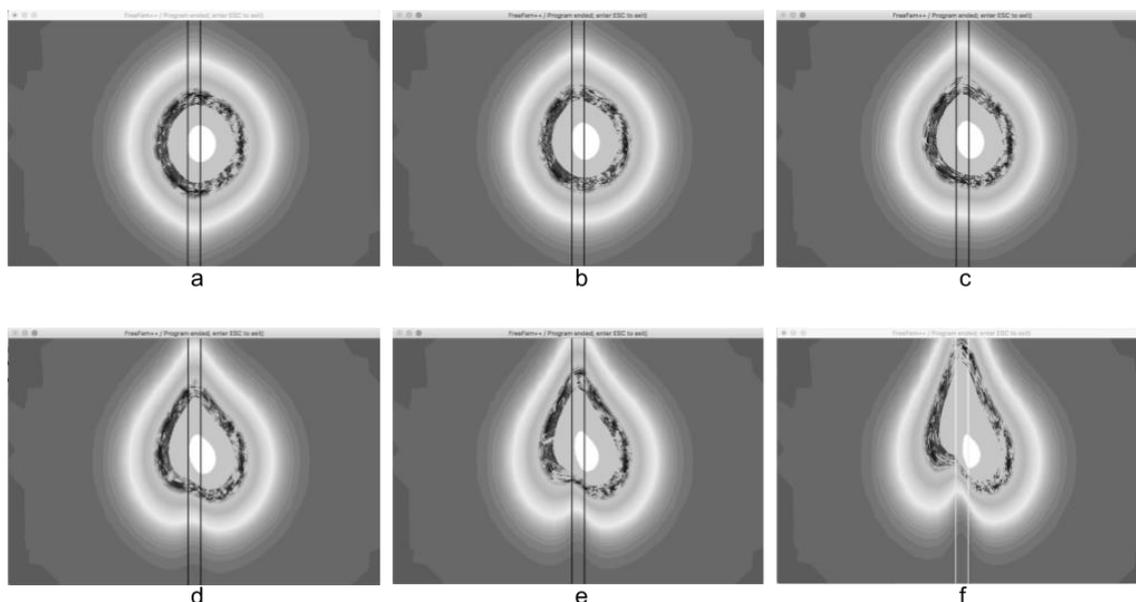
Para tratar os dados recebidos, foi utilizado um coletor de dados customizado, empregando um microcontrolador Arduino Nano, dispositivo reconhecido por seu tamanho reduzido, baixo custo de aquisição, baixo consumo de energia e razoável poder de processamento. Ele conta com um processador ATmega328 de 16Mhz, 32KB de memória Flash, 8 pinos de entrada analógica, 22 pinos digitais e consumo de apenas 19mA (Arduino, 2021). Para leitura dos dados foi utilizado um conversor analógico/digital externo (ADS1115) com 16 bits de resolução para maior precisão dos dados coletados. A peça de aquecimento foi controlada pelo coletor de dados, através da passagem da corrente elétrica pelo resistor, alimentada por um circuito de corrente constante. A variação da temperatura foi medida por meio dos termistores e seus valores registrados continuamente a cada 0,5 segundo, permitindo o cálculo da variação entre os dois pontos durante o ciclo de aquecimento e também durante a pressurização da câmara.

Para análise dos resultados numéricos recebidos tanto da simulação computacional quanto do experimento em laboratório, optou-se pela análise matemática indicada por Kirkham (2014), e proposta na pesquisa de Wang et al. (2002) e (Kluitenberg e Warrick, 2001), que demonstraram existir uma relação linear simples entre o fluxo de água (solo e planta) e o logaritmo natural (neperiano) da razão do aumento de temperatura a jusante da fonte de calor para o aumento de temperatura a montante da fonte de calor do caminho de fluxo. A simplicidade dessa relação torna os sensores de pulso de calor uma opção interessante para medir os fluxos de água na planta, mesmo em situações de fluxo muito pequeno ou mesmo fluxo reverso (Vandegehuchte e Steppe, 2012). Esse tipo de análise é utilizado no método de razão de calor, que utiliza uma montagem de sensores similar ao experimento proposto.

Mesmo sendo conhecida as equações para correção do mal posicionamento dos sensores de pulso de calor (Burgess et al., 2001), não há necessidade de seu uso para a presente pesquisa, uma vez que o interesse está na detecção do ponto de inflexão relativo ao início do fluxo de seiva durante a pressurização, e não na determinação de sua velocidade.

## RESULTADOS

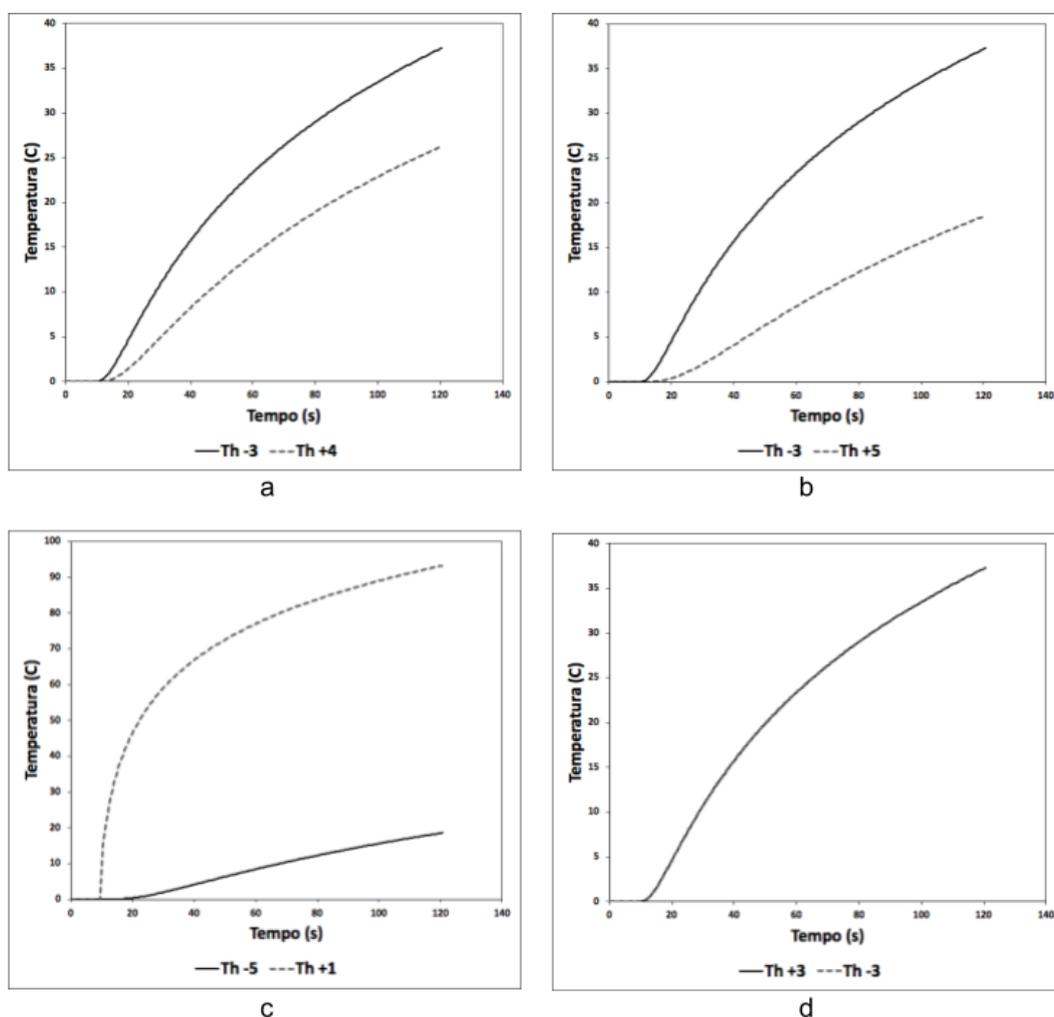
A simulação com o método dos elementos finitos (MEF) demonstrou a condução do calor gerado pela fonte de aquecimento em um cenário idealizado. Na Figura 7 é possível verificar o crescimento oblongo das extremidades da onda de calor, resultado dos efeitos da condução de calor no cilindro de fluxo simulado, em sentido vertical/axial no cilindro de fluxo modelado, que representaria a nervura central da folha e seu prolongamento de pecíolo. A sonda de aquecimento e os dois sensores de temperatura foram posicionados na lateral direita do cilindro de fluxo.



**Figura 7:** Simulação utilizando MEF no programa FreeFem++, demonstrando o aquecimento do cilindro de fluxo ao fim do ciclo de 120 segundos. Em (a), sem fluxo; em (b) fluxo de  $50 \mu\text{m s}^{-1}$ ; em (c) a  $100 \mu\text{m s}^{-1}$ ; em (d) a  $200 \mu\text{m s}^{-1}$ ; em (e) a  $300 \mu\text{m s}^{-1}$ ; em (f) a  $500 \mu\text{m s}^{-1}$ . Fonte: o autor (2021).

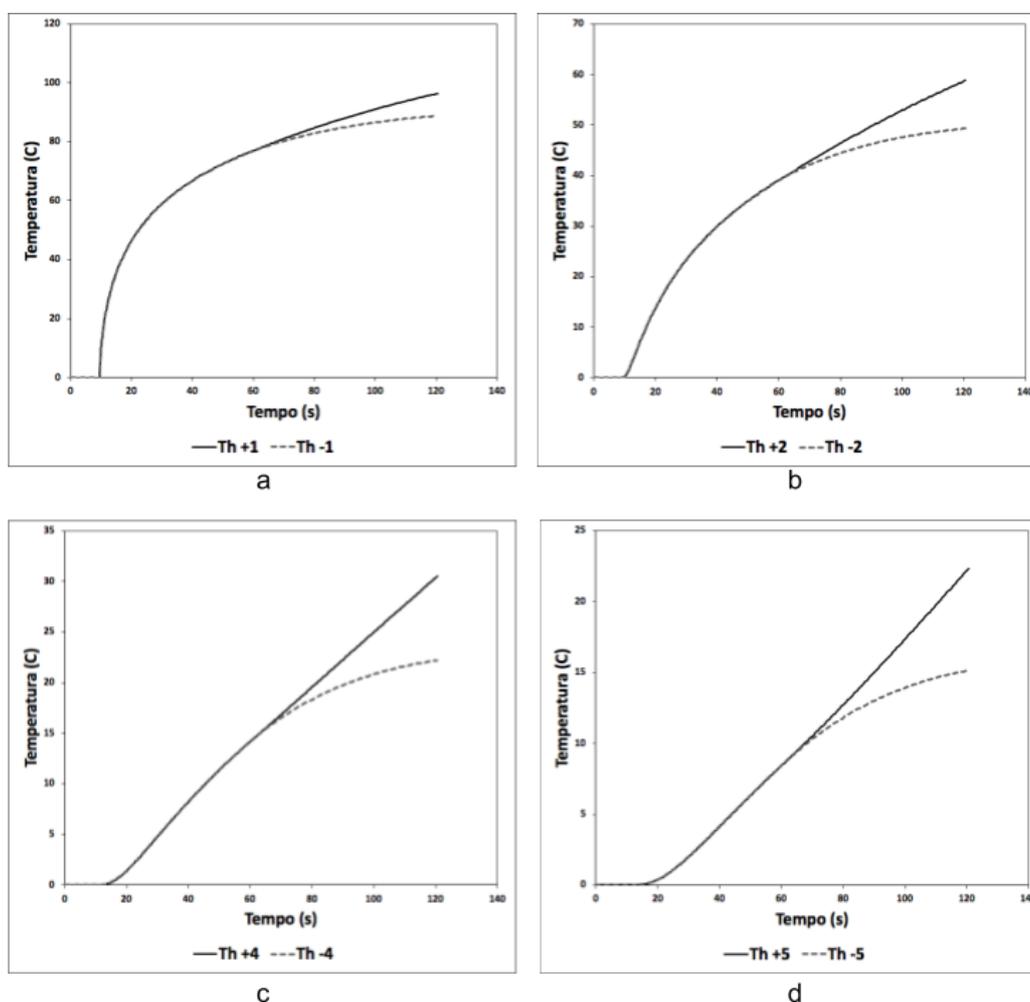
Com os dados numéricos gerados pela simulação, pode-se constatar como se dá a evolução da temperatura individualmente em cada um dos 10 pontos de temperatura ao redor do centro de aquecimento.

Na Figura 8 tem-se em (a) tomada de temperatura nos pontos -3 e +4, em (b) tem-se -3 e +5, e em (c) -5 e +1. Percebe-se a diferença no perfil de aquecimento sem presença de fluxo, dado às distâncias diferentes entre os pontos de medida e o ponto central de origem do calor. Da mesma forma, sem nenhum fluxo, usando pontos equidistantes, as linhas do gráfico irão praticamente se sobrepôr (d).



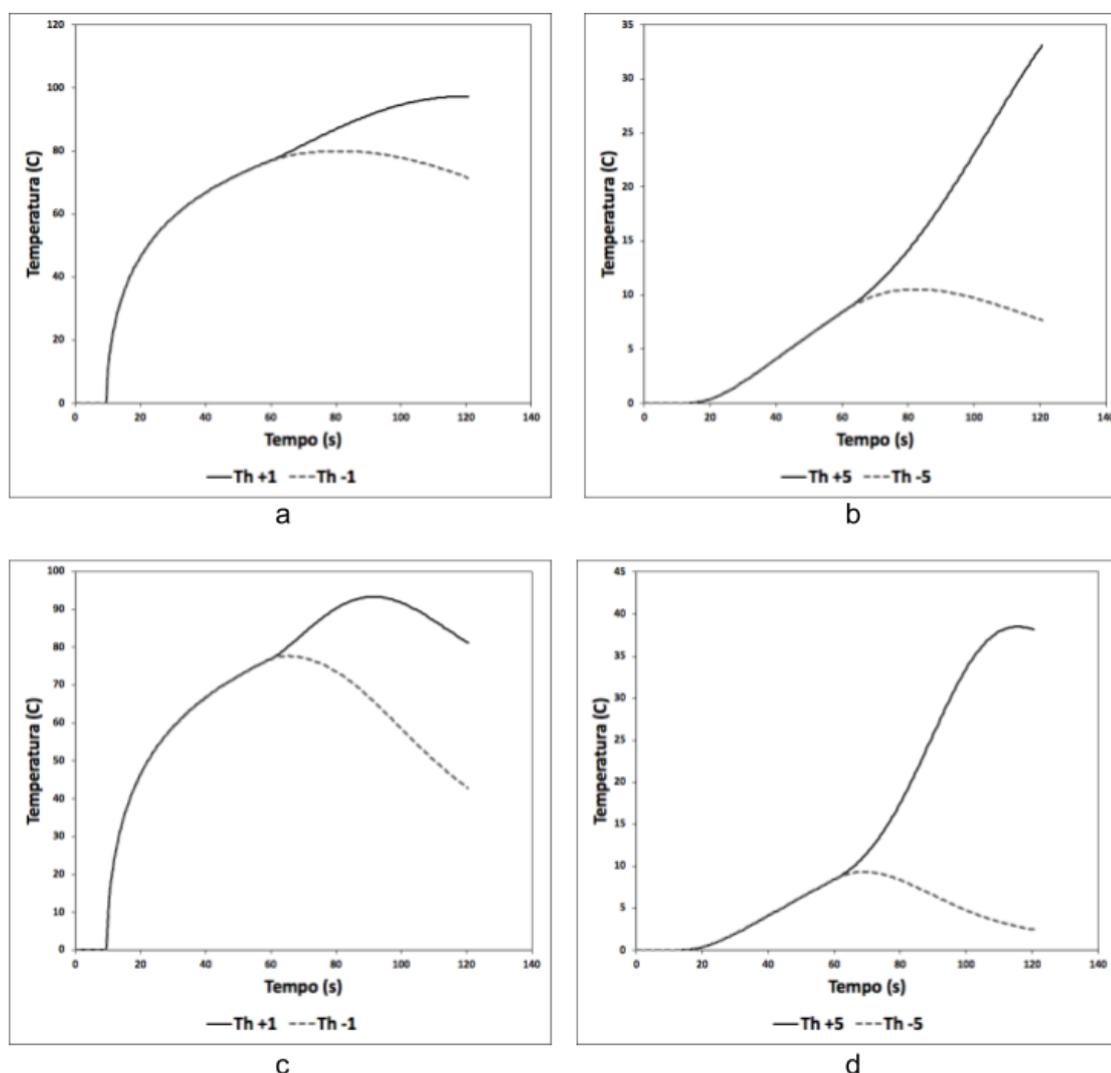
**Figura 8:** Perfil de aquecimento comparativo entre dois pontos de medida em diferentes distâncias em relação à fonte de calor, sem fluxo. Em (a) -3 e +4; em (b) -3 e +5; em (c) -5 e +1; em (d) -3 e +3. Fonte: o autor (2021).

Para efeito de verificação das alterações das medidas de temperatura mediante fluxo, os gráficos da Figura 9 abaixo demonstram as diferenças entre pontos equidistantes de diferentes posições a uma taxa de fluxo de  $50 \mu\text{m s}^{-1}$ , o menor valor de fluxo simulado.



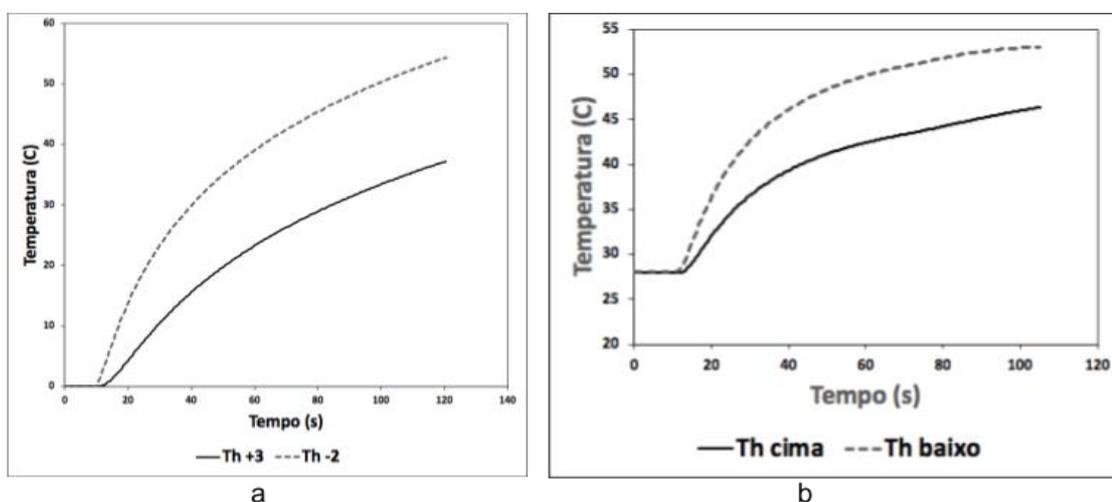
**Figura 9:** Perfis de aquecimento em diferentes posições ao fluxo de  $50 \mu\text{m s}^{-1}$  a partir de  $t=60$  s. Em (a), posições +1 e -1; em (b), +2 e -2; em (c), +4 e -4; em (d), +5 e -5. Fonte: o autor (2021).

Na Figura 10 é mostrado como foram simulados os fluxos nos pontos mais próximos e nos mais distantes, com fluxos de  $200 \mu\text{m s}^{-1}$  e  $500 \mu\text{m s}^{-1}$ . Em (a) e (b), é mostrado um fluxo de  $200 \mu\text{m s}^{-1}$ , enquanto em (c) e (d) com fluxo de  $500 \mu\text{m s}^{-1}$ . Há que se observar a rápida acentuação da diferença entre os pontos quando o fluxo é maior, e também uma mais rápida estabilização da temperatura.



**Figura 10:** Perfis de aquecimento nos pontos mais próximos e nos mais distantes ao fluxo de  $200 \mu\text{m s}^{-1}$  (a, b) e ao fluxo de  $500 \mu\text{m s}^{-1}$  (c, d), a partir de  $t=60$  s. Fonte: o autor (2021).

Após a verificação da resposta ao fluxo observada em diferentes posições com a simulação pelo MEF, foi procedida a análise dos resultados utilizando um logaritmo natural da razão entre dois tempos, com diferença de um segundo entre os mesmos, para destacar o ponto onde o perfil de aquecimento se modifica. Para tal, foi determinado os pontos +3 (cima) e -2 (baixo) para avaliação, por melhor condizer com as distâncias observadas na montagem física do sensor utilizado no experimento, resultando em uma curva de aquecimento mais próxima, conforme Figura 11.



**Figura 11:** Comparação entre os pontos de aquecimento escolhidos (+3 e -2) na simulação computacional MEF em (a) e no experimento laboratorial em (b). Fonte: o autor (2021).

Para a temperatura ( $T$ ), foi utilizada a Equação 3. No entanto, como na simulação as temperaturas empregadas foram relativas, para efeitos de representação gráfica e cálculo foi somado o valor de 25 em cada termo de um ponto de temperatura, representando o acréscimo de uma temperatura ambiente média:

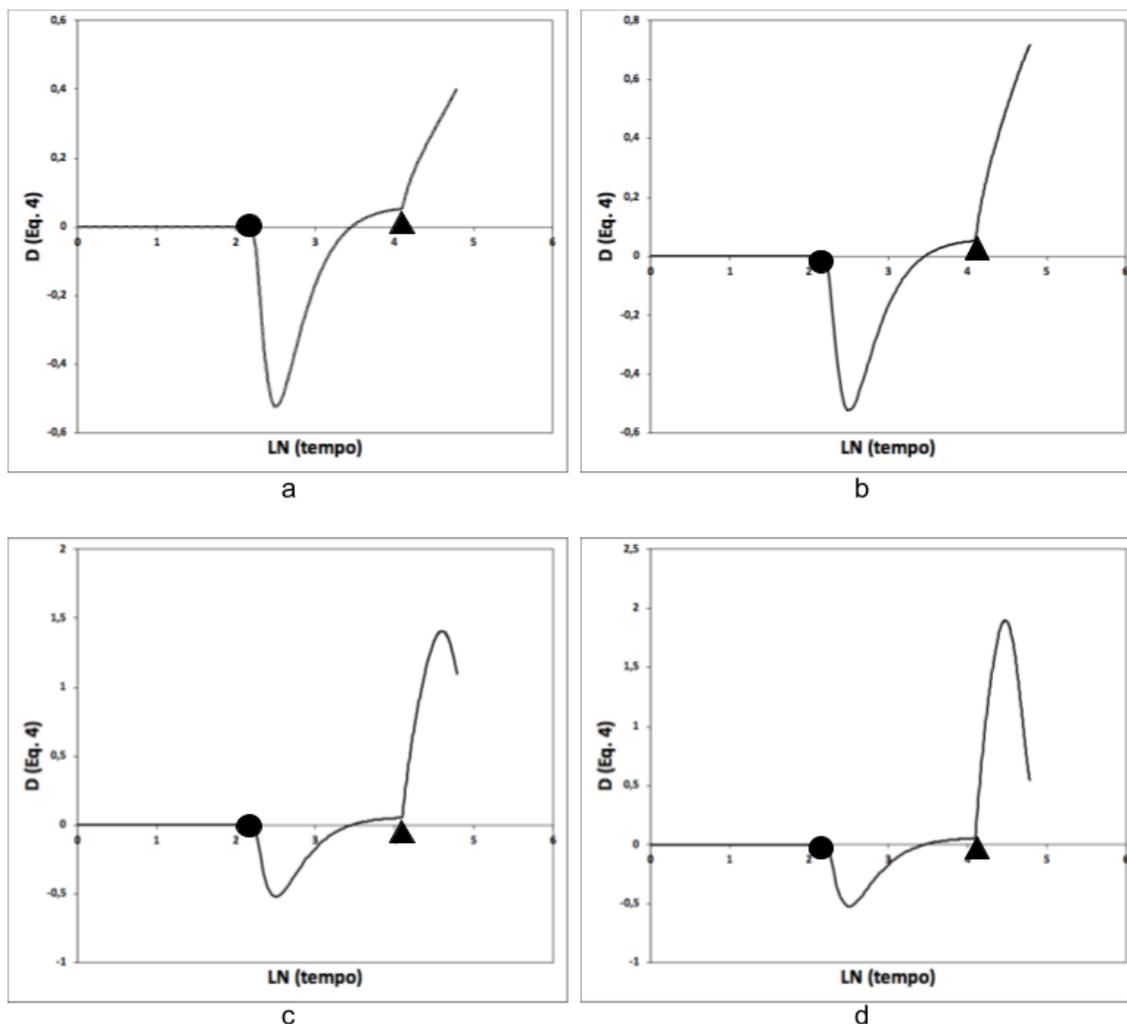
$$T = \ln\left(\frac{\text{Temp}_{\text{cima}}}{\text{Temp}_{\text{baixo}}}\right) \quad (3)$$

Finalizando, a equação com o dado ( $D$ ) no ponto  $x$ , que equivale à razão da diferença das duas tomadas de temperatura advindas da Equação 3 ( $T$ ) pela diferença dos dois tempos ( $t$ ). A diferença entre as temperaturas e os tempos inicial e final é de um segundo (Equação 4):

$$D_x = \frac{T_{x+0,5} - T_{x-0,5}}{t_{x+0,5} - t_{x-0,5}} \quad (4)$$

A partir da análise dos resultados da simulação com MEF utilizando a Equação 4, observa-se claramente os pontos de inflexão onde o perfil de aquecimento se modifica abruptamente, indicando os pontos onde há alterações de aquecimento significativas, resultados da diferença em 1 segundo do logaritmo

natural da razão das temperaturas dos dois pontos de aquecimento, conforme pode ser visto nos gráficos da Figura 12:



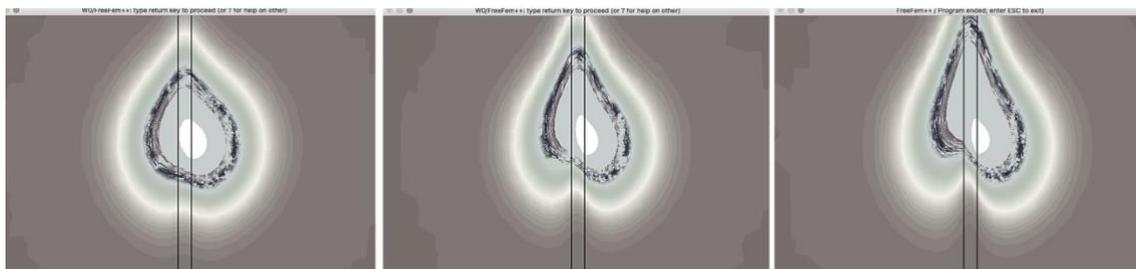
**Figura 12:** Análise de diferentes fluxos simulados no MEF através da razão de calor. Fluxo de  $50 \mu\text{m s}^{-1}$  em (a);  $100 \mu\text{m s}^{-1}$  em (b);  $300 \mu\text{m s}^{-1}$  em (c) e  $500 \mu\text{m s}^{-1}$  em (d). O círculo indica o início do aquecimento, enquanto o triângulo indica o momento do início do fluxo. Fonte: o autor (2021).

A análise pela razão de calor proposta na Equação 4 e aplicada aos dados da simulação demonstra os pontos de inflexão causados pela modificação do perfil de aquecimento entre os pontos de medida de temperatura escolhidos na simulação MEF, indicados nos gráficos com círculos (início do aquecimento) e triângulos (início do fluxo).

Na Figura 12 estão indicadas pelo círculo o momento onde o aquecimento é acionado, mostrando a queda da linha que vinha estável. Essa queda demonstra

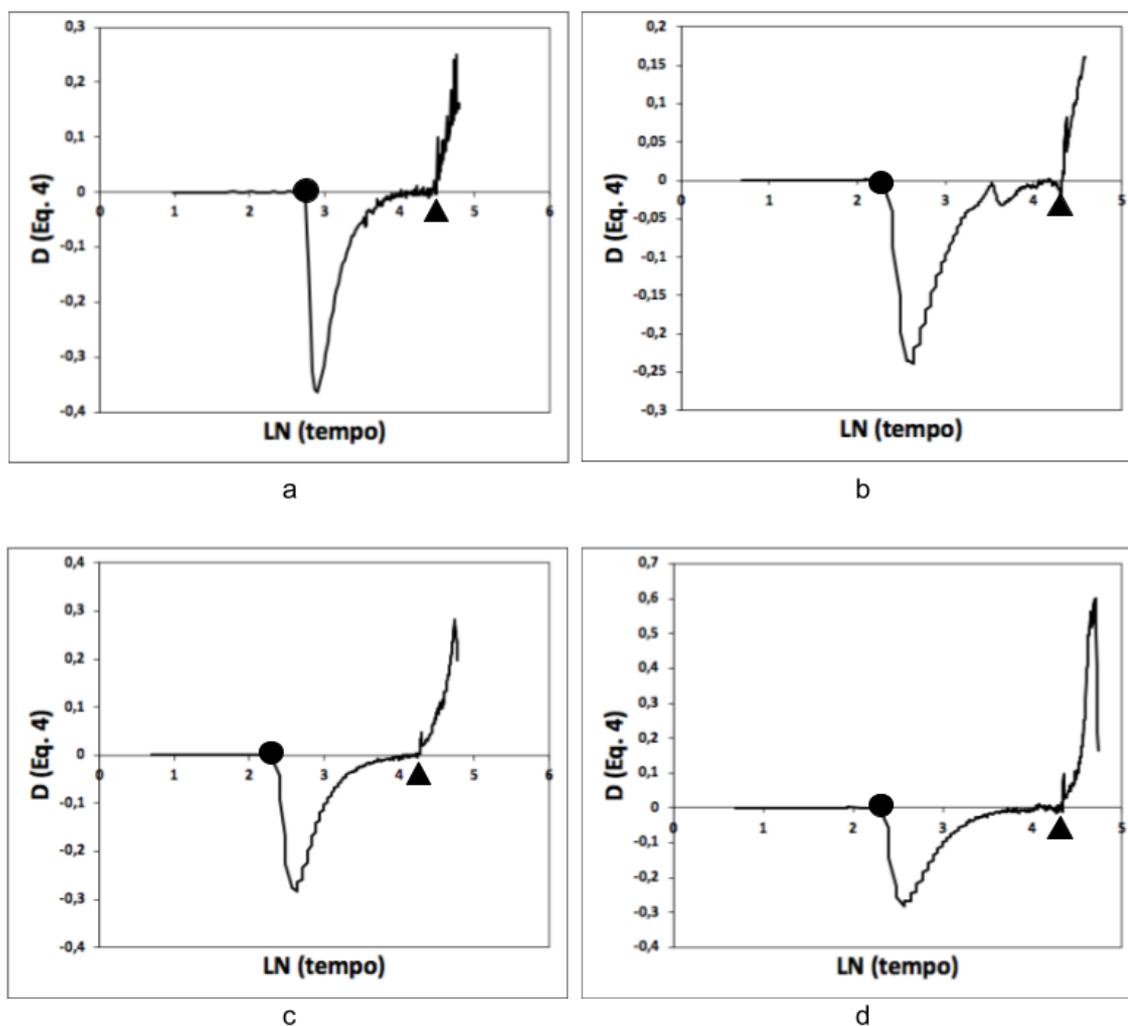
que a temperatura do ponto analisado mais próximo ao aquecedor (abaixo, -2) se aquece mais rapidamente que o ponto acima (+3), fazendo com que a razão caminhe para valores negativos, até o momento em que há nova estabilização, indicando que a temperatura entre eles está novamente crescendo em taxas de incremento próximas.

A indicação do pequeno triângulo nos gráficos da Figura 12 demonstram o exato momento onde o fluxo é iniciado. Como consequência desse fluxo simulado, a seiva em movimento ascendente “rouba” calor do ponto de temperatura abaixo do aquecedor (-2), levando por condução parte desse calor para o sensor acima (+3) do centro aquecido, também de fácil visualização na Figura 13, com o crescimento alongado da onda de calor mostrando o arrasto do fluxo. Esse movimento faz com que a razão se torne positiva, resultando na forte inflexão no gráfico a partir de 60 segundos.



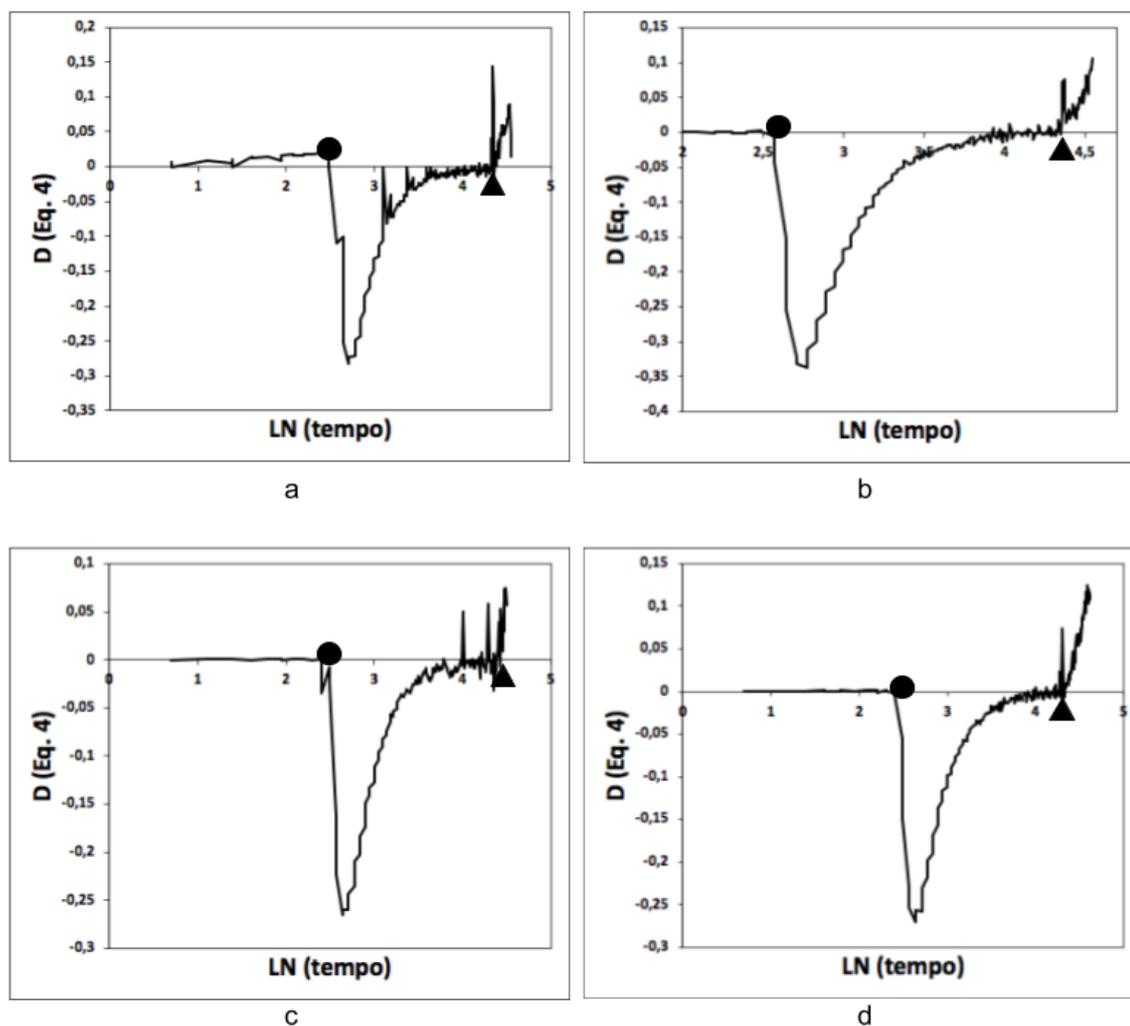
**Figura 13:** Padrão de dispersão de calor na simulação MEF apresentando o arrasto promovido pelo intenso fluxo de seiva a  $500\mu\text{m s}^{-1}$ . Fonte: o autor (2021).

Na validação experimental foram utilizadas folhas de café conilon (*Coffea canephora*) e uma espécie ornamental, a arália (*Polyscias scutellaria*). Os resultados do café podem ser verificados nos gráficos da Figura 14:



**Figura 14:** Validação experimental em folhas de *Coffea canephora*. Os círculos indicam o início do aquecimento, enquanto os triângulos indicam o momento do início da pressurização. Fonte: o autor (2021).

Nos gráficos da Figura acima é possível ver os mesmos pontos de inflexão notados na simulação com o programa FreeFem++ mostrados na Figura 12. Os pontos indicados pelos círculos coincidem com a ativação da corrente elétrica para aquecimento do resistor, na montagem do experimento. Já os pontos apontados pelos triângulos indicam uma inflexão que corresponde diretamente ao início da entrada de gás na câmara, mostrando que já se inicia um fluxo desde o começo do processo da pressurização, o que ratifica, através de uma abordagem térmica, a teoria exposta por Roderick e Canny (2005). O mesmo comportamento também aparece nas folhas de arália, conforme visto na Figura 15:



**Figura 15:** Validação experimental em folhas de *Polyscias scutellaria*. Fonte: o autor (2021).

## DISCUSSÃO

É sabido que, do lado de fora da câmara de pressão, o tamanho da porção do pecíolo exposta influi diretamente nas medidas, com pecíolos mais longos demorando mais tempo a exibir a seiva expelida pela pressão. Quando as medidas tomadas são apenas para suas condições particulares, então o comprimento do pecíolo não será importante, desde que se mantenha uma padronização, mas pode dificultar a comparação de seus valores com valores de referência publicados ou valores obtidos por outras pessoas, podendo gerar variação desnecessária em suas medições. Logo, uma grande quantidade de seiva percorre um caminho desde a nervura central da folha até surgir na extremidade cortada do pecíolo. Essa

característica simples já pode influenciar diretamente em valores diferentes de pressão de equilíbrio para folhas com mesmo status hídrico.

A interpretação da pressão de equilíbrio dada por Scholander et al. (1965) remete às mudanças induzidas pela pressão do gás na câmara. No entanto, destaca-se que é muito difícil detectar uma mudança na densidade (e, portanto, na pressão) em um sistema heterogêneo não rígido como uma folha vegetal apenas comprimindo-a experimentalmente, dada a baixíssima compressibilidade de líquidos e sólidos. Uma pressão de equilíbrio de 1,5 MPa, valor bem comum em medidas utilizando a câmara de pressão tanto em campo quanto em laboratório, aumentaria a densidade (isto é, reduziria o volume de uma massa constante) de água líquida em cerca de 0,07%. Isso seria muito difícil de detectar em comparação com as distorções (ou seja, mudanças na forma) produzidas em uma folha não rígida (Roderick e Canny, 2005). Também é considerado surpreendente que a publicação de diversos estudos com dados de medidas conflitantes não tenham levado a uma reavaliação crítica de base ampla sobre a técnica da câmara de pressão (Zimmermann, U. et al., 2004). Há estudos com medidas da pressão de equilíbrio tomada em árvores de *Eucalyptus pilularis* de até 60 m, e *Salix nigra* de até 35 m, todas em várias alturas diferentes. No eucalipto, foram realizadas 260 medidas de  $P_B$  entre as alturas de 1 a 57 m de altura; na *Salix* 253 valores entre 1 a 25 m de altura. Os valores de  $P_B$  variaram entre 0 e 2,5 MPa, e se correlacionam significativamente com a umidade relativa do ambiente, ao invés da altura da árvore (Bentrup, 2017; Zimmermann, D. et al., 2007). Outro estudo observou que os valores de pressão de equilíbrio medidos para *S. sempervirens* a uma altura de 110 m são surpreendentemente baixos (no máximo 1,8 MPa durante o dia), e que apoia fortemente a ideia de que o abastecimento de água de ramos folhosos é facilitado pela absorção de umidade da atmosfera, mediada pela mucilagem. Essa conclusão sugere que a interpretação dos valores de pressão de equilíbrio em termos de pressão do xilema é provavelmente obsoleta (Koch et al., 2004). Outra interpretação que impacta no conceito de pressão de equilíbrio é a de que o fluxo do xilema não é um fluxo impulsionado por pressão, mas uma dissolução do gás da câmara que se dissolveu na água da amostra durante a pressurização. O nitrogênio é notavelmente solúvel em água (Canny e Roderick, 2005).

O que se nota nos resultados do experimento ao iniciar a pressurização é o começo de uma inflexão grande nos valores dos gráficos (triângulos na Figura 14

e 15), demonstrando que a razão de calor entre os sensores se altera de forma bem rápida, quase que instantaneamente ao início da pressurização, demonstrando que o fluxo de seiva promoveu um desequilíbrio entre as temperaturas dos dois termistores, mostrando que houve um arrasto da onda de calor a montante, onde o termistor de baixo perde calor gradualmente e o de cima vai ganhando, fato este também observado na simulação pelo MEF, inclusive de forma visual, como demonstra a Figura 13. Embora a simulação demonstre isso visualmente de uma maneira bem gradual e, de certa forma lenta, a Equação 4 com a razão de calor proposta para esta análise tem a característica de ressaltar essa inflexão de forma bem acentuada e clara, como demonstrado na Figura 12 para a simulação computacional e ratificada experimentalmente, conforme demonstrado nas Figuras 14 e 15.

Havia sido levantada anteriormente a hipótese da existência de uma provável defasagem de tempo entre o início da pressurização e o movimento da seiva na nervura central e no seu prolongamento (pecíolo), baseados na ideia intuitiva de uma espécie de “tensão de ruptura” para o início do movimento. Ocorre que, mesmo em um fluxo simulado de baixa intensidade (Figura 12a) essa defasagem não ocorre, tendo a razão de calor acusado o movimento de desequilíbrio entre os termistores logo no início do fluxo. Esse mesmo comportamento foi observado também nas validações em *Coffea canephora* como na *Polyscias scutellaria*. Na simulação MEF não é levado em consideração uma possível tensão do xilema, ou seja, a existência de uma pressão negativa no cilindro de fluxo não foi simulada. Mesmo assim, o experimento laboratorial resultou similar à simulação, indicando a inexistência dessa “tensão de ruptura” para início do movimento. Se de fato existia alguma tensão envolvida na retenção dessa água no tecido vegetal, não foi grande o suficiente para ser registrado um atraso na movimentação da água.

A concordância de comportamento entre a simulação com MEF e o experimento laboratorial mostra que há movimento de condução de calor, no mesmo sentido do fluxo, tão logo a pressurização é iniciada. Considerando estudos que afirmam que colunas de água de xilema são instáveis, dada a hidrofobicidade dos elementos da parede do xilema (lipídios, proteínas, etc) (Zimmermann et al., 2004), é esperado um movimento de acomodação da água livre no xilema, provocado pelo incremento de pressão. Há grandes evidências de que as colunas

de água do xilema não são contínuas em condições normais, demonstrado por técnicas de infusão por corante e ressonância nuclear magnética (Westhoff et al., 2009). A descontinuidade da coluna de água no xilema leva à percepção de espaços que possam ser ocupados pela água livre, quando comprimida pela pressão de gás.

Outro fator em consideração é a rapidez da reação observada nos termistores no momento da pressurização. Wei et al. (2000) afirmam que a transmissão da pressão da câmara para o xilema se dá de forma instantânea – rápida e quantitativamente (Ding et al., 2014), o que explicaria a detecção rápida das mudanças de temperatura nos sensores. É provável que este seja o efeito causado pela água livre presente nos vasos xilemáticos, que ao serem comprimidas pelo gás da câmara começa um movimento de acomodação em direção à nervura central, que funcionaria como uma via principal de condução, e onde estão posicionados os sensores (Figura 6). Isso irá desencadear o ponto de inflexão visto nos gráficos. Outro fator que pode ter desencadeado o rápido movimento da seiva é a diluição de parte do nitrogênio da câmara, injetado na fase líquida da amostra, possibilidade já citada anteriormente, que pode ajudar a carregar a água livre pelo xilema.

Como resultado, deduz-se que os possíveis valores que são registrados como pressão de equilíbrio ( $P_B$ ) (*endpoint*) guardam mais relação com a quantidade de água livre disponível no xilema e nos tecidos adjacentes do que propriamente com um possível valor de tensão negativa, corroborando a analogia da “garrafa plástica com água”, citada na introdução. Tanto a simulação desenvolvida quanto o experimento físico realizado caminham para esta conclusão. Obviamente, não cabe na presente pesquisa questionar ou direcionar as discussões da teoria C-T sobre o fluxo de seiva ascendente em plantas, envolvendo essa conclusão. Essas considerações devem ser verificadas em estudos mais avançados, com essa finalidade específica.

Há que se salientar também que os resultados do experimento desenvolvido nesta pesquisa não invalidam a importância e o uso da câmara de pressão como instrumento de apoio para verificação do status hídrico da planta, uma vez que os valores apurados de  $P_B$ , em sua maioria, guardam algum nível de correlação com o teor de água no solo e, conseqüentemente, suas medidas servem de apoio para trabalhos de manejo de irrigação. Bentrup (2017) demonstra em seu

trabalho que a câmara de pressão pode não ser uma ferramenta confiável para apoiar a teoria C-T. No entanto, se calibrado pela sonda de pressão de turgor, pode ajudar a monitorar o status de água da planta. Importante também salientar o seu uso exitoso no manejo de irrigação em diversas culturas comerciais, sempre atrelado à boas práticas, tais como amostragem padronizada (altura dos ramos de coleta), tempo de equilíbrio das folhas em sacos aluminizados, tempo entre a excisão e a pressurização, acondicionamento das amostras, comprimento da porção externa do pecíolo, entre outras medidas visando a criação de um “corpo de conhecimento” sobre o uso da câmara de pressão em uma determinada espécie vegetal.

## RESUMO E CONCLUSÕES

Com o objetivo de verificar o comportamento do fluxo de seiva xilemático dentro da câmara de pressão no momento da pressurização e sua relação com a pressão de equilíbrio, foi desenvolvido um modelo computacional baseado no Método dos Elementos Finitos (MEF) para simular a condução térmica em uma estratégia de rastreamento de fluxo de seiva por pulso de calor. Após isso, foi realizado sua validação experimental com sensores físicos especialmente desenvolvidos no LEAG (Laboratório de Engenharia Agrícola) e acoplados em um arranjo na parte interna da tampa da câmara de pressão. Para o experimento físicos foram utilizadas amostras de folhas de café conilon (*Coffea canephora*) e arália (*Polyscias scutellaria*).

Após a análise dos dados numéricos gerados tanto pela simulação quanto no experimento laboratorial, com uma abordagem matemática baseada na razão de calor, verificou-se que não havia defasagem de tempo entre a pressurização e o movimento da seiva na nervura central/pecíolo dentro da câmara de pressão. Os termistores detectaram claramente uma inflexão, mostrando o arrasto do calor no sentido do fluxo xilemático no exato momento do início da pressurização. Este movimento foi creditado à água livre no xilema, impulsionada pela compressão da folha mediante o incremento de pressão, somado à diluição de nitrogênio na fase líquida da folha, que auxiliaria no rápido transporte da seiva no xilema.

Os valores que se interpretam como pressão de equilíbrio ( $P_B$ ) ou *endpoint*, seriam uma função direta do quantitativo de água disponível na folha. Não há nenhuma evidência no experimento desenvolvido de que a câmara de pressão mede uma pressão negativa do xilema, uma vez que os efeitos dessa pressão não se apresentaram de forma significativa, retardando a movimentação do fluxo da seiva e causando uma defasagem de tempo entre o momento da pressurização e a detecção da inflexão pela razão de calor nos sensores instalados. Dessa forma, o experimento propõe que a tensão negativa do xilema não esteja entre as propriedades medidas pela câmara de pressão, e sim uma medida correlacionada ao teor de água disponível na amostra.

No entanto, as conclusões obtidas não permitem desprezar os anos de experiência e bons resultados conseguidos com o uso da câmara de pressão em diversos ambientes e culturas vegetais. Há que se salientar que os valores de  $P_B$  medidos ainda guardam uma correlação com o teor de água na planta e, conseqüentemente, no solo, podendo servir de apoio ao manejo de irrigação, desde que calibrada previamente.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Arduino. Arduino Nano - Tech Specs. Disponível em: <<https://store.arduino.cc/usa/arduino-nano>>. Acessado: 10/outubro/2020.
- Bentrup, F. W. (2017) Water ascent in trees and lianas: the cohesion-tension theory revisited in the wake of Otto Renner. *Protoplasma*, v. 254, n. 2, p. 627–633, doi: 10.1007/s00709-016-1009-4.
- Burgess, S. S. O.; Adams, M. A.; Turner, N. C.; Beverly, C. R.; Ong, C. K.; Khan, A. A. H.; Bleby, T. M. (2001) An improved heat pulse method to measure low and reverse rates of sap flow in woody plants. *Tree Physiology*, v. 21, n. 15, p. 1157.
- Canny, M. J.; Roderick, M. L. (2005) A second pathway for gas out of the pressure chamber - What is being squeezed? *Plant Physiology and Biochemistry*, v. 43, n. 4, p. 315–321, doi: 10.1016/j.plaphy.2005.02.015.
- Cochard, H.; Forestier, S.; Améglio, T. (2001) A new validation of the Scholander pressure chamber technique based on stem diameter variations. *Journal of Experimental Botany*, v. 52, n. 359, p. 1361–1365. Disponível em:

- <<https://academic.oup.com/jxb/article-lookup/doi/10.1093/jxb/52.359.1361>>. Acessado: 10/06/2020. doi: 10.1093/jxb/52.359.1361.
- Ding, Y.; Zhang, Y.; Zheng, Q.-S.; Tyree, M. T. (2014) Pressure-volume curves: revisiting the impact of negative turgor during cell collapse by literature review and simulations of cell micromechanics. *New Phytologist*, v. 203, n. 2, p. 378–387. Disponível em: <<http://doi.wiley.com/10.1111/nph.12829>>. Acessado: 10/06/2020. doi: 10.1111/nph.12829.
- Kirkham, M. B. (2014) *Principles of Soil and Plant Water Relations*. 2º Edição - Oxford: Elsevier, 572p.
- Kluitenberg, G. J.; Warrick, A. W. (2001) Improved evaluation procedure for heat-pulse soil water flux density method. *Soil Science Society of America Journal*, v. 65, n. 2, p. 320–323, doi: 10.2136/sssaj2001.652320x.
- Koch, G. W.; Stillet, S. C.; Jennings, G. M.; Davis, S. D. (2004) The limits to tree height. *Nature*, v. 428, n. 6985, p. 851–854, doi: 10.1038/nature02417.
- Marshall, D. C. (1958) Measurements of sap flow in conifers by heat transport. *Plant Physiology*, v. 33, n. 6, p. 385–396, doi: 10.1104/pp.33.6.385.
- Roderick, M. L.; Canny, M. J. (2005) A mechanical interpretation of pressure chamber measurements—what does the strength of the squeeze tell us? *Plant Physiology and Biochemistry*, v. 43, n. 4, p. 323–336. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0981942805000641>>. Acessado: 10/06/2020. doi: 10.1016/j.plaphy.2005.02.014.
- Scholander, P. F.; Bradstreet, E. D.; Hemmingsen, E. A.; Hammel, H. T. (1965) Sap Pressure in Vascular Plants: Negative hydrostatic pressure can be measured in plants. *Science*, v. 148, n. 3668, p. 339–346. Disponível em: <<https://www.sciencemag.org/lookup/doi/10.1126/science.148.3668.339>>. doi: 10.1126/science.148.3668.339.
- 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, doi: 10.1111/j.1469-8137.2012.04237.x.
- Wang, Q.; Ochsner, T. E.; Horton, R. (2002) Mathematical analysis of heat pulse signals for soil water flux determination. *Water Resources Research*, v. 38, n. 6, p. 27-1-27–7, doi: 10.1029/2001wr001089.
- Weatherley, P. E. (1970) Some Aspects of Water Relations. *Advances in Botanical Research*, v. 3, n. C, p. 171–206, doi: 10.1016/S0065-2296(08)60320-1.
- Wei, C.; Steudle, E.; Tyree, M. T.; Lintilhac, P. M. (2001) The essentials of direct xylem pressure measurement. *Plant, Cell and Environment*, v. 24, n. 5, p. 549–555, doi: 10.1046/j.1365-3040.2001.00697.x.
- Wei, C.; Tyree, M. T.; Bennink, J. P. (2000) The transmission of gas pressure to

xylem fluid pressure when plants are inside a pressure bomb. *Journal of Experimental Botany*, v. 51, n. 343, p. 309–316, doi: 10.1093/jexbot/51.343.309.

- Westhoff, M.; Zimmermann, D.; Schneider, H.; Wegner, L. H.; Geßner, P.; Jakob, P.; Bamberg, E.; Shirley, S.; Bentrup, F. W.; Zimmermann, U. (2009) Evidence for discontinuous water columns in the xylem conduit of tall birch trees. *Plant Biology*, v. 11, n. 3, p. 307–327, doi: 10.1111/j.1438-8677.2008.00124.x.
- Zimmermann, D.; Westhoff, M.; Zimmermann, G.; Geßner, P.; Gessner, A.; Wegner, L. H.; Rokitta, M.; Ache, P.; Schneider, H.; Vásquez, J. A.; Kruck, W.; Shirley, S.; Jakob, P.; Hedrich, R.; Bentrup, F. W.; Bamberg, E.; Zimmermann, U. (2007) Foliar water supply of tall trees: Evidence for mucilage-facilitated moisture uptake from the atmosphere and the impact on pressure bomb measurements. *Protoplasma*, v. 232, n. 1–2, p. 11–34, doi: 10.1007/s00709-007-0279-2.
- Zimmermann, U.; Schneider, H.; Wegner, L. H.; Haase, A. (2004) Water ascent in tall trees: Does evolution of land plants rely on a highly metastable state? *New Phytologist*, v. 162, n. 3, p. 575–615, doi: 10.1111/j.1469-8137.2004.01083.x.

## 4. RESUMOS E CONCLUSÕES

Foram apresentados três trabalhos, sendo dois deles baseados em pesquisas com a câmara de pressão de Scholander, utilizada para medidas de potencial hídrico foliar, e uma revisão sistemática de literatura que ajudará a subsidiar a continuidade dessas pesquisas.

### 4.1. DESENVOLVIMENTO DE SOLUÇÃO INTEGRADA PARA AUXÍLIO NO USO DA CÂMARA DE PRESSÃO DE SCHOLANDER EM MEDIDAS DE POTENCIAL HÍDRICO FOLIAR

Uma das formas de se verificar a necessidade de irrigação em um plantio consiste em avaliar o potencial hídrico das plantas. Para se realizar essas medidas utiliza-se a câmara de pressão de Scholander, onde se pressuriza o tecido foliar para verificar a pressão hidrostática necessária para se conseguir circular a água pelo xilema. No entanto, o procedimento que se adota desde a década de 1960 tem algumas dificuldades associadas, sendo a principal delas a identificação do momento em que a água surge no corte transversal do pecíolo, do lado de fora da câmara. No intuito de minimizar os erros associados ao procedimento, foi desenvolvido uma solução integrada, composta de componentes de hardware e software para adaptação à câmaras de pressão convencionais, como forma de registrar por meio de uma gravação de vídeo, juntamente com o registro do sensor

de pressão e outros sensores. É possível acompanhar através do software desenvolvido para dispositivo móvel o processo, e ser consultado posteriormente em caso de dúvida. Para tal, foi adaptado um transdutor de pressão, associado a um coletor de dados microcontrolado com conexão *bluetooth*. Um aparato para suporte a uma câmera UVC, desenvolvido em impressão 3D, foi associado à solução, para registro das imagens. O conjunto de hardware comunica-se com um aplicativo móvel desenvolvido especialmente para essa finalidade, que recebe as informações do coletor de dados através de conexão sem fio e as imagens da câmera via cabo USB. O conjunto adaptado contendo o transdutor de pressão, o coletor de dados e o suporte com a câmera UVC se mostrou adequado e robusto, enviando informações para o aplicativo desenvolvido. O custo de montagem da solução integrada demonstra também a viabilidade econômica da mesma. O aplicativo foi avaliado quanto à sua usabilidade e eficiência, atingindo 90,31 pontos na métrica SUS (*System Usability Scale*) e 86 na NPS (*Net Promoter Score*), ambos considerados “excelente” nas suas respectivas escalas classificatórias. Os questionários aplicados aos usuários para avaliação da usabilidade foram testados utilizando o coeficiente alfa de Cronbach, atingindo o valor de 0,71, o que atesta também a confiabilidade do instrumento utilizado.

Dentre as demandas detectadas podemos destacar as possibilidades de melhoria da solução no que diz respeito à parametrização, tanto no software que equipa o coletor de dados, quanto no aplicativo móvel. Essa parametrização iria permitir que o usuário pudesse inserir novos sensores diretamente no circuito e receber seus dados no aplicativo móvel durante as medições, sem necessidade de recompilação dos softwares, com as alterações funcionando em tempo de execução (*runtime*). Outra boa possibilidade de melhoria e que já está em andamento, diz respeito à adição, no aplicativo, de uma camada de inteligência artificial, para identificação do *endpoint* através de estratégias de visão computacional, dispensando a análise visual do operador.

Como forma de reforçar a avaliação da solução integrada desenvolvida, para os próximos trabalhos pretende-se implementar cópias dos instrumentos criados para uso em outros laboratórios e em análises de campo, no intuito de aumentar o público utilizador do mesmo. Isso irá fornecer maiores retornos e opiniões, para aprimorar a solução proposta de forma contínua.

## 4.2. APLICAÇÃO DE ESTRATÉGIAS DE INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL EM ESTUDOS DE MANEJO DA IRRIGAÇÃO: UMA REVISÃO SISTEMÁTICA

Uma revisão bibliográfica sobre a aplicação das estratégias de IA nas atividades de manejo da irrigação foi realizada usando a técnica de Revisão Sistemática da Literatura (RSL), com critérios explícitos de busca. Mais de 45 mil títulos completos em 130 bases de referência foram consultados de uma só vez e foram selecionados 38 estudos primários, que formaram a base da presente revisão. Foi possível verificar, entre outras abordagens, o crescente uso de Redes Neurais Artificiais (RNA) alimentadas com dados de sensores de parâmetros climáticos e do solo, para compor soluções de gerenciamento de irrigação. As RNAs têm sido a escolha mais recorrente para soluções que exigem aprendizado de máquina. As tecnologias baseadas em lógica *fuzzy* se destacaram nos Sistemas de Suporte à Decisão (SSD). As abordagens híbridas *neuro-fuzzy* gerenciam os melhores aspectos contidos em cada uma das duas técnicas (RNA e lógica *fuzzy*). Existe uma clara predominância do uso de sensores autônomos sem fio e interconectados em rede.

Tendo todo o processo metodológico sido bem descrito em sua respectiva seção, a presente pesquisa é claramente replicável, o que reforça sua validade. Diferenças de julgamento no momento da seleção por leitura podem ser encontrados, porém é altamente improvável que as descobertas gerais mudem de forma significativa.

Estratégias baseadas em RNAs se mostraram mais eficientes que as equações tradicionais para estimativa da evapotranspiração de referência.

Soluções implementadas com lógica *fuzzy* têm se sobressaído em Sistemas de Suporte à Decisão (SSD), por trabalhar com regras relativamente fáceis e sobretudo por ser uma aposta de segurança. É possível que se note uma diminuição de sua utilização nos anos vindouros, dando lugar a algoritmos de aprendizado de máquina.

Abordagens baseadas em árvores de decisão/floresta aleatória têm se destacado, demonstrando uma tendência de crescimento de sua adoção para os próximos anos.

Há uma clara predominância do uso de sensores autônomos sem fio, interligados em rede, referenciada na maioria dos estudos como WSN (*Wireless Sensor Network*). Boa parte dos pesquisadores constroem seus próprios sensores, ou utilizam sensores de baixo custo.

Por fim, boas possibilidades de desenvolvimento de soluções para o gerenciamento dos vários aspectos da irrigação na agricultura apontam para o uso crescente de soluções com aprendizado de máquina baseados em RNA, floresta aleatória e SVM, com o uso de redes de sensores sem fio coletando dados continuamente, municiando os conjuntos de dados de aprendizado de máquina e armazenando informações em nuvem. Outro caminho promissor é o uso de imagens em estratégias utilizando visão computacional e principalmente de sensoriamento remoto, dado a disponibilidade de informações gratuitas que podem ser utilizadas em monitoramento de culturas agrícolas.

#### 4.3. MOVIMENTO DO FLUXO XILEMÁTICO DURANTE PRESSURIZAÇÃO NA CÂMARA DE SCHOLANDER: MODELAGEM COMPUTACIONAL E ABORDAGEM EXPERIMENTAL

O uso da câmara de pressão como instrumento de apoio ao manejo de irrigação nas medidas do status hídrico da planta vem sendo feito ao longo dos anos com bom desempenho em algumas espécies. Tem sido aceito que a pressão de equilíbrio ( $P_B$ ) medida pela câmara reflete o módulo do valor da pressão negativa do xilema. No entanto, diversos estudos constataram valores discrepantes da pressão dos vasos do xilema quando comparados com outras abordagens técnicas, levando a diferentes interpretações dos valores de  $P_B$  obtidos pela câmara de pressão. A partir das análises destas novas interpretações e buscando compreender melhor o fenômeno, esta pesquisa propõe um método termométrico baseado no pulso de calor para rastreamento de fluxo de seiva, para identificar o início do fluxo mediante pressurização dentro da câmara de pressão. Para tal, foi desenvolvido um modelo de simulação computacional utilizando o método dos elementos finitos para análise de condução de calor mediante fluxo e também desenvolvido um sensor de fluxo de seiva para ser colocado dentro da câmara, na

intenção de validar experimentalmente o modelo computacional proposto e auxiliar na compreensão dos resultados.

Após a análise dos dados numéricos gerados tanto pela simulação quanto no experimento laboratorial, onde foram utilizadas amostras de folhas de café conilon (*Coffea canephora*) e arália (*Polyscias scutellaria*), a partir de uma abordagem matemática baseada na razão de calor, verificou-se que não havia defasagem de tempo entre a pressurização e o movimento da seiva na nervura central/pecíolo dentro da câmara de pressão. Os termistores detectaram claramente uma inflexão, mostrando o arrasto do calor no sentido do fluxo xilemático no exato momento do início da pressurização. Este movimento foi creditado à água livre no xilema, impulsionada pela compressão da folha mediante o incremento de pressão, somado à diluição de nitrogênio na fase líquida da folha, que auxiliaria no rápido transporte da seiva no xilema.

Os resultados da simulação e do experimento mostraram que não há defasagem de tempo significativa entre o início da pressurização e o movimento do fluxo de seiva no pecíolo foliar, concluindo que, embora os valores de  $P_B$  obtidos na câmara possam auxiliar no manejo da irrigação, estes valores seriam uma função correlacionada ao quantitativo de água disponível na folha. Não há nenhuma evidência no experimento desenvolvido de que a câmara de pressão mede uma pressão negativa do xilema, uma vez que os efeitos dessa pressão não se apresentaram de forma significativa, retardando a movimentação do fluxo da seiva e causando uma defasagem de tempo entre o momento da pressurização e a detecção da inflexão pela razão de calor nos sensores instalados. Dessa forma, o experimento propõe que a tensão negativa do xilema não esteja entre as propriedades medidas pela câmara de pressão, e sim uma medida correlacionada ao teor de água disponível na amostra.

As conclusões obtidas não permitem desprezar os anos de experiência e bons resultados conseguidos com o uso da câmara de pressão em diversos ambientes e culturas vegetais. Há que se salientar que os valores de  $P_B$  medidos ainda guardam uma correlação com o teor de água na planta e, conseqüentemente, no solo, podendo servir de apoio ao manejo de irrigação, desde que calibrada previamente.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Amaral, A. M. (2019) *Fluxo de Seiva e Transpiração de Plantas Jovens de Mogno Brasileiro (Swietenia macrophylla King) Sob Regime Variável de Água no Solo*. Tese (Doutorado em Ciências Agrárias) – Rio Verde - GO, Instituto Federal Goiano, 77p.
- Amorim, L. B. De. (2013) *Status Hídrico de Solo e Planta em Ambiente Semiárido Associado com a Interceptação Pluvial*. Tese (Doutorado em Tecnologias Energéticas e Nucleares) – Recife - PE, Universidade Federal de Pernambuco, 100p.
- Araújo, M. C.; Esteves, B. dos S.; Sousa, E. F. de. (2012) Método de dissipação térmica para determinação do fluxo de seiva em coqueiro anão-verde. *Bragantia*, v. 71, n. 4, p. 558–562, doi: 10.1590/S0006-87052013005000004.
- Baker, J. M.; Van Bavel, C. H. M. (1987) Measurement of mass flow of water in the stems of herbaceous plants. *Plant, Cell and Environment*, v. 10, n. 9, p. 777–782. Disponível em: <<http://doi.wiley.com/10.1111/1365-3040.ep11604765>>. doi: 10.1111/1365-3040.ep11604765.
- Berilli, S. da S. (2017) *Desenvolvimento de Instrumentação para Monitorar o Potencial Hídrico Foliar*. Dissertação (Mestrado em Produção Vegetal) – Campos dos Goytacazes - RJ, Universidade Federal Norte Fluminense Darcy Ribeiro, 71p.
- Boucinha, R. M.; Tarouco, L. M. R. (2014) Avaliação de Ambiente Virtual de Aprendizagem com o uso do SUS - System Usability Scale. *Renote*, v. 11, n. 3, doi: 10.22456/1679-1916.44479.
- Boyer, J. S. (1995) *Measuring the Water Status of Plants and Soils*. 1ª ed. Newark, DE: Academic Press, 13–48p.
- Burgess, S. S. O.; Adams, M. A.; Turner, N. C.; Beverly, C. R.; Ong, C. K.; Khan, A.

- A. H.; Bleby, T. M. (2001) An improved heat pulse method to measure low and reverse rates of sap flow in woody plants. *Tree Physiology*, v. 21, n. 15, p. 1157.
- CamdenL's. Sap Flow and Arduinos. Disponível em: <<https://camdenl08.wordpress.com/2014/04/14/sap-flow/>>. Acessado: 15/março/2021.
- Cao, W. (1992) *Development of An Expert System for Irrigation and Fertilization Management in the Pacific Northwest*. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Oregon State University, 197p.
- Čermák, J.; Kučera, J.; Nadezhdina, N. (2004) Sap flow measurements with some thermodynamic methods, flow integration within trees and scaling up from sample trees to entire forest stands. *Trees - Structure and Function*, v. 18, n. 5, p. 529–546, doi: 10.1007/s00468-004-0339-6.
- Čermák, J.; Kučera, J.; Penka, M. (1976) Improvement of the method of sap flow rate determination in full-grown trees based on heat balance with direct electric heating of xylem. *Biologia Plantarum*, v. 18, n. 2, p. 105–110, doi: 10.1007/bf02923147.
- Clearwater, M. J.; Meinzer, F. C.; Andrade, J. L.; Goldstein, G.; Holbrook, N. M. (1999) Potential errors in measurement of nonuniform sap flow using heat dissipation probes. *Tree Physiology*, v. 19, n. 10, p. 681–687, doi: 10.1093/treephys/19.10.681.
- Delgado-Rojas, J. S.; Angelocci, L. R.; Folegatti, M. V.; Coelho Filho, M. A. (2007) Desempenho da sonda de dissipação térmica na medida da transpiração de plantas jovens de Lima Ácida. *Engenharia Agrícola*, v. 27, n. 2, p. 404–413. Disponível em: <[http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0100-69162007000300009&lng=pt&tlng=pt](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0100-69162007000300009&lng=pt&tlng=pt)>. doi: 10.1590/S0100-69162007000300009.
- Ding, Y.; Zhang, Y.; Zheng, Q.-S.; Tyree, M. T. (2014) Pressure-volume curves: revisiting the impact of negative turgor during cell collapse by literature review and simulations of cell micromechanics. *New Phytologist*, v. 203, n. 2, p. 378–387. Disponível em: <<http://doi.wiley.com/10.1111/nph.12829>>. Acessado: 10/06/2020. doi: 10.1111/nph.12829.
- Do, F.; Rocheteau, A. (2002) Influence of natural temperature gradients on measurements of xylem sap flow with thermal dissipation probes. 2. Advantages and calibration of a noncontinuous heating system. *Tree Physiology*, v. 22, n. 9, p. 649–654, doi: 10.1093/treephys/22.9.641.
- Edaphic. Pressure Chambers. Disponível em: <<https://edaphic.com.au/plant-and-leaf-water-potential/water-potential-pressure-chamber-with-internal-gas-cylinder/>>. Acessado: 10/março/2021.
- Edwards, W. R. N.; Becker, P.; Eermak, J. (1997) A unified nomenclature for sap

- flow measurements. *Tree Physiology*, v. 17, n. 1, p. 65–67. Disponível em: <<https://academic.oup.com/treephys/article-lookup/doi/10.1093/treephys/17.1.65>>. doi: 10.1093/treephys/17.1.65.
- 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, doi: 10.1016/S0378-3774(01)00119-6.
- Flo, V.; Martinez-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, n. 2, p. 362–374. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0168192319301248>>. doi: 10.1016/j.agrformet.2019.03.012.
- Fulton, A. Good Pressure Chamber Field Measurement Technique. . Disponível em: <<https://www.sacvalleyorchards.com/manuals/stem-water-potential/good-pressure-chamber-technique/>>. Acessado: 10/fevereiro/2021.
- Fulton, A.; Grant, J.; Buchner, R.; Connell, J. (2014) Using the Pressure Chamber for Irrigation Management in Walnut, Almond, and Prune. *ANR Publication 8503 University of California*, May. 1-27.
- Gabetto e Silva, M. (2008) *Desenvolvimento de Sensor de Fluxo de Seiva e de Coeficiente Indicador de Estresse Hídrico para Plantas de Cafeeiro Arábica*. Tese (Doutorado em Produção Vegetal) – Campos dos Goytacazes - RJ, Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro - UENF, 114p.
- Gomide, R. L.; Durães, F. O. M.; Kobayashi, M. K.; Machado, R. A. F. (2002) Monitoramento Automático de Fluxo de Seiva com Sondas de Balanço de Energia e Caracterização de Estresse Hídrico de Duas Linhagens de Milho (*Zea mays* L.), *XXXI Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola*, p. 3–6.
- Granier, A. (1985) Une nouvelle méthode pour la mesure du flux de sève brute dans le tronc des arbres. *Annales des Sciences Forestières*, v. 42, n. 2, p. 193–200. Disponível em: <<http://link.springer.com/10.1007/BF00117583>>. doi: 10.1051/forest:19850204.
- Green, S.; Clothier, B.; Jardine, B. (2003) Theory and Practical Application of Heat Pulse to Measure Sap Flow. *Agronomy Journal*, v. 95, n. 6, p. 1371–1379, doi: 10.2134/agronj2003.1371.
- Hanssens, J.; De Swaef, T.; Nadezhkina, N.; Steppe, K. (2013) Measurement of sap flow dynamics through the tomato peduncle using a non-invasive sensor based on the heat field deformation method. *Acta Horticulturae*, v. 991, p. 409–416, doi: 10.17660/ActaHortic.2013.991.50.
- ICT. SFM1 Sap Flow Meter. . Disponível em: <<https://www.ictinternational.com/products/sfm1/sfm1-sap-flow-meter/>>. Acessado: 20/fevereiro/2021.

- Karmali, S. (2019) *Desenvolvimento de aplicação móvel para submissão/revisão de despesas recorrendo a metodologias ágeis de desenvolvimento e à plataforma low-code OutSystems*. Dissertação de Mestrado – Lisboa, Portugal, Instituto Universitário de Lisboa, 60p. . Disponível em: <<https://arquivo.pt/wayback/20171216190603/http://quercus.pt/comunicados/2017/agosto/5346-a-fileira-do-eucalipto-em-portugal-mitos-e-realidades>>.
- King, B. A.; Shellie, K. C. (2016) Evaluation of neural network modeling to predict non-water-stressed leaf temperature in wine grape for calculation of crop water stress index. *Agricultural Water Management*, v. 167, p. 38–52. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.agwat.2015.12.009>>. Acessado: 10/02/2020. doi: 10.1016/j.agwat.2015.12.009.
- Kirkham, M. B. (2014) *Principles of Soil and Plant Water Relations*. 2º Edição - Oxford: Elsevier, 572p.
- Lacerda, C. F. de; Filho, J. E.; Pinheiro, C. B. *Fisiologia Vegetal*. . Disponível em: <<http://www.fisiologiavegetal.ufc.br/apostila.htm>>. Acessado: 20/fevereiro/2021.
- Levin, A. D. (2018) Scheduling Irrigation with a Pressure Chamber. . Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=s1GJUgvx7t4>>. Acessado: 15/fevereiro/2021.
- Levin, A. D. (2019) Re-evaluating pressure chamber methods of water status determination in field-grown grapevine (*Vitis* spp.). *Agricultural Water Management*, v. 221, n. May, p. 422–429. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.agwat.2019.03.026>>. doi: 10.1016/j.agwat.2019.03.026.
- Lotti, R. S.; Machado, A. W.; Mazzeiro, Ê. T.; Landre Júnior, J. (2006) Aplicabilidade científica do método dos elementos finitos. *Revista Dental Press de Ortodontia e Ortopedia Facial*, v. 11, n. 2, p. 35–43, doi: 10.1590/s1415-54192006000200006.
- Marshall, D. C. (1958) Measurements of sap flow in conifers. *Plant Physiology*, v. 33, n. 6, p. 385–396.
- Martins, D. dos S.; Costa, A. de F. S. da. (2003) *A cultura do mamoeiro: tecnologias de produção*. 1ª ed. Vitória - ES: Incaper, 497p.
- Meireles, M. C.; Bonifácio, B. (2015) Uso de Métodos Ágeis e Aprendizagem Baseada em Problema no Ensino de Engenharia de Software: Um Relato de Experiência. *Anais do XXVI Simpósio Brasileiro de Informática na Educação*, v. 1, n. Sbie, p. 180, doi: 10.5753/cbie.sbie.2015.180.
- Melo, R. F. de; Gruber, Y. B. G.; Coelho, R. D. (2007) Efeito Do Armazenamento Das Amostras Para Determinação Do Potencial Da Água Na Folha Pela Câmara De Pressão. *Irriga*, v. 12, n. 3, p. 326–337, doi: 10.15809/irriga.2007v12n3p326-337.

- Mirlisenna, G. Método dos Elementos Finitos: o que é? . Disponível em: <<https://www.esss.co/blog/metodo-dos-elementos-finitos-o-que-e/>>. Acessado: 10/maio/2021.
- Montenegro, A. A. T.; Bezerra, F. M. L.; Lima, R. N. de. (2004) Evapotranspiração e coeficientes de cultura do mamoeiro para a região litorânea do Ceará. *Engenharia Agrícola*, v. 24, n. 2, p. 464–472. Disponível em: <[http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0100-69162004000200027&lng=pt&tlng=pt](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0100-69162004000200027&lng=pt&tlng=pt)>. doi: 10.1590/S0100-69162004000200027.
- Nadezhdina, N. (2018) Revisiting the heat field deformation (HFD) method for measuring sap flow. *IForest*, v. 11, n. 1, p. 118–130, doi: 10.3832/ifer2381-011.
- Naor, A.; Peres, M. (2001) Pressure-increase rate affects the accuracy of stem water potential measurements in deciduous fruit trees using the pressure-chamber technique. *The Journal of Horticultural Science and Biotechnology*, v. 76, n. 6, p. 661–663. Disponível em: <<http://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/14620316.2001.11511427>>. doi: 10.1080/14620316.2001.11511427.
- Nielsen, J. Usability 101: Introduction to Usability. . Disponível em: <<https://www.nngroup.com/articles/usability-101-introduction-to-usability/>>. Acessado: 6/novembro/2020.
- Oliveira, L. E. M. de. Temas em Fisiologia Vegetal. . Disponível em: <<http://www.ledson.ufla.br/praticas-laboratoriais-em-fisiologia-vegetal/determinacao-do-estado-hidrico-em-tecidos-vegetais-teor-de-agua-teor-relativo-de-agua-e-potencial-hidrico/>>. Acessado: 10/janeiro/2020.
- Padrini-Andrade, L.; Balda, R. D. C. X.; Bandiera-Paiva, P.; Nunes, M. D. V.; Guinsburg, R.; Testoni, D.; Meneses, J.; Perussi-e-Silva, R.; Bomfim, O. (2019) Avaliação da usabilidade de um sistema de informação em saúde neonatal segundo a percepção do usuário. *Scopus*.
- Pagotto, T.; Fabri, J. A.; Lerario, A.; Goncalves, J. A. (2016) Scrum solo: Software process for individual development. jun. 2016, [S.l.]: *IEEE*, jun. p. 1–6. . Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/7521555/>>.
- Pavez, R. G.; Rodríguez, R. C.; Meza, G. R. (2011) Comparación de la cámara de presión tipo Scholander modelo Pump-up respecto a la cámara de presión tradicional en vides de mesa. *Idesia*, v. 29, n. 2, p. 175–179, doi: 10.4067/s0718-34292011000200023.
- Pepper, D. W.; Heinrich, J. C. (2017) *The Finite Element Method*. 3ª edição ed. Boca Raton - FL: CRC Press, 628p.
- Pereira, R. V. S.; Kubrusly, M.; Marçal, E. (2017) Desenvolvimento, Utilização e Avaliação de uma Aplicação Móvel para Educação Médica: um Estudo de

- Caso em Anestesiologia. *Renote*, v. 15, n. 1, p. 1–10, doi: 10.22456/1679-1916.75104.
- PMS Instrument. Pump-Up Chamber. Disponível em: <<https://www.pmsinstrument.com/products/pump-up-pressure-chamber/>>. Acessado: 10/janeiro/2021.
- 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, doi: 10.1093/treephys/tpw110.
- Previato, E. V. (2018) *Uma abordagem de desenvolvimento solo de aplicações utilizando princípios ágeis*. Dissertação de Mestrado – São Carlos - SP, Universidade Federal de São Carlos, 112p.
- Reis, F. de O.; Campostrini, E.; Sousa, E. F. de. (2009) Fluxo de Seiva Xilemática em Mamoeiro “Golden” Cultivado por Microaspersão Sobre Copa: Relações com as Variáveis Ambientais. *Brangantia*, v. 68, n. 2, p. 285–294. Disponível em: <<http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=90811759001>>.
- Reis, F. de O.; Campostrini, E.; Sousa, E. F. de; Silva, M. G. e. (2006) Sap flow in papaya plants: Laboratory calibrations and relationships with gas exchanges under field conditions. *Scientia Horticulturae*, v. 110, n. 3, p. 254–259, doi: 10.1016/j.scienta.2006.07.010.
- Sakuratani, T. (1981) A Heat Balance Method for Measuring Water Flux in the Stem of Intact Plants. *Journal of Agricultural Meteorology*, v. 37, n. 1, p. 9–17, doi: 10.2480/agrmet.37.9.
- Sakuratani, T. (1984) Improvement of the Probe for Measuring Water Flow Rate in Intact Plants with the Stem Heat Balance Method. *Journal of Agricultural Meteorology*, v. 40, n. 3, p. 273–277. Disponível em: <<http://joi.jlc.jst.go.jp/JST.Journalarchive/agrmet1943/40.273?from=CrossRef>>. doi: 10.2480/agrmet.40.273.
- Sauro, J.; Lewis, J. R. (2016) *Quantifying the User Experience: Practical Statistics for User Research*. 2ª Edição ed. Cambridge, EUA: Elsevier, 354p.
- Schlesinger, W. H.; Jasechko, S. (2014) Transpiration in the global water cycle. *Agricultural and Forest Meteorology*, v. 189–190, p. 115–117. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.agrformet.2014.01.011>>. doi: 10.1016/j.agrformet.2014.01.011.
- Scholander, P. F.; Bradstreet, E. D.; Hemmingsen, E. A.; Hammel, H. T. (1965) Sap Pressure in Vascular Plants: Negative hydrostatic pressure can be measured in plants. *Science*, v. 148, n. 3668, p. 339–346. Disponível em: <<https://www.sciencemag.org/lookup/doi/10.1126/science.148.3668.339>>. doi: 10.1126/science.148.3668.339.
- Scholander, P. F.; Hammel, H. T.; Hemmingsen, E. A.; Bradstreet, E. D. (1964)

Hydrostatic Pressure and Osmotic Potential in Leaves of Mangroves and Some other Plants. [S.l.]: *National Academy of Sciences*, p. 119–125.

ScienceDirect. Pressure Chamber. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/topics/earth-and-planetary-sciences/pressure-chamber>>. Acessado: 15/novembro/2020.

Shackel, K. Using the Pressure Chamber. Disponível em: <[http://fruitsandnuts.ucdavis.edu/pressure\\_chamber\\_operation/](http://fruitsandnuts.ucdavis.edu/pressure_chamber_operation/)>.

Shackel, K. A.; Johnson, R. S.; Medawar, C. K.; Phene, C. J. (2019) Substantial Errors in Estimates of Sap Flow Using the Heat Balance Technique on Woody Stems under Field Conditions. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, v. 117, n. 2, p. 351–356, doi: 10.21273/jashs.117.2.351.

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, doi: 10.1093/jxb/47.12.1833.

Souza, R. M. de. O Método dos Elementos Finitos Aplicado ao Problema de Condução de Calor. Disponível em: <[http://www.ufpa.br/nicae/integrantes/remo\\_souza/TrabPublicados/Apostilas/ApostilaElementosFinitosNiCAE.pdf](http://www.ufpa.br/nicae/integrantes/remo_souza/TrabPublicados/Apostilas/ApostilaElementosFinitosNiCAE.pdf)>. Acessado: 18/abril/2021.

Steduto, P.; Hsiao, T. C.; Fereres, E.; Raes, D. (2012) *Crop yield response to water*. Roma: FAO, 505p.

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, doi: 10.1093/jxb/32.1.221.

Swanson, Robert H. (1994) Significant historical developments in thermal methods for measuring sap flow in trees. *Agricultural and Forest Meteorology*, v. 72, n. 1, p. 113–132. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0168192394900949>>. Acessado: 10/08/2020. doi: [https://doi.org/10.1016/0168-1923\(94\)90094-9](https://doi.org/10.1016/0168-1923(94)90094-9).

Trcala, M.; Čermák, J. (2016) A new heat balance equation for sap flow calculation during continuous linear heating in tree sapwood. *Applied Thermal Engineering*, v. 102, p. 532–538. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359431116303854>>. doi: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.03.092>.

Turner, N. C. (1988) Measurement of plant water status by the pressure chamber technique. *Irrigation Science*, v. 9, n. 4, p. 289–308, doi: 10.1007/BF00296704.

Turner, N.; Long, M. (1980) Errors Arising From Rapid Water Loss in the Measurement of Leaf Water Potential by the Pressure Chamber Technique. *Functional Plant Biology*, v. 7, n. 5, p. 527, doi: 10.1071/pp9800527.

Vandegheuchte, M. W.; Steppe, K. (2012) Use of the correct heat conduction-convection equation as basis for heat-pulse sap flow methods in anisotropic

wood. *Journal of Experimental Botany*, v. 63, n. 8, p. 2833–2839, doi: 10.1093/jxb/ers041.

Williams, L. E.; Araujo, F. J. (2002) Correlations among Predawn Leaf, Midday Leaf, and Midday Stem Water Potential and their Correlations with other Measures of Soil and Plant Water Status in *Vitis vinifera*. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, v. 127, n. 3, p. 448–454. Disponível em: <<https://journals.ashs.org/view/journals/jashs/127/3/article-p448.xml>>. doi: 10.21273/JASHS.127.3.448.

Yang, D.; Pan, S.; Tyree, M. T. (2016) The impact of xylem cavitation on water potential isotherms measured by the pressure chamber technique in *Metasequoia glyptostroboides* Hu & W.C. Cheng. *Journal of Experimental Botany*, v. 67, n. 15, p. 4571–4580, doi: 10.1093/jxb/erw234.

Zimmermann, U.; Schneider, H.; Wegner, L. H.; Haase, A. (2004) Water ascent in tall trees: Does evolution of land plants rely on a highly metastable state? *New Phytologist*, v. 162, n. 3, p. 575–615, doi: 10.1111/j.1469-8137.2004.01083.x.

## APÊNDICES

## APÊNDICE A

Perguntas originais da metodologia SUS (System Usability Scale):

1. I think that I would like to use this feature frequently.
2. I found the feature unnecessarily complex.
3. I thought the feature was easy to use.
4. I think that I would need the support of a technical person to be able to use this feature.
5. I found the various functions in this feature were well integrated.
6. I thought there was too much inconsistency in this feature.
7. I would imagine that most people would learn to use this feature very quickly.
8. I found the feature very cumbersome to use.
9. I felt very confident using the feature.
10. I needed to learn a lot of things before I could get going with this feature.

Perguntas traduzidas da metodologia SUS (System Usability Scale) e adaptadas ao contexto do aplicativo:

1. Quando usar a câmara de pressão, acho que gostaria de usar esse aplicativo com frequência.
2. Achei o recurso desnecessariamente complexo.
3. Achei o aplicativo fácil de usar.
4. Acho que precisaria do suporte de um técnico para poder usar este aplicativo.
5. Achei que as várias funções deste aplicativo estavam bem integradas.
6. Eu acho que havia muita inconsistência neste aplicativo.
7. Eu imagino que a maioria das pessoas aprenderia a usar este aplicativo muito rapidamente.
8. Achei o sistema muito complicado de usar.
9. Eu me senti muito confiante usando o aplicativo.
10. Eu precisava aprender muitas coisas antes de começar a usar este sistema.

Pergunta metodologia NPS (Net Promoter Score)

- Qual a probabilidade de você indicar/recomendar o uso do aplicativo Mobile Pressure para colegas ou amigos que utilizam câmaras de pressão convencionais?

## APÊNDICE B

**Quadro 1B:** Lista dos estudos primários utilizados na RSL

<b>NÚMERO</b>	<b>ANO</b>	<b>AUTOR</b>	<b>PAÍS</b>	<b>TÍTULO</b>	<b>JOURNAL</b>
1	2015	(Haghverdi et al., 2015)	EUA	High-resolution prediction of soil available water content within the crop root zone	Journal of Hydrology
2	2015	(Giusti e Marsili-Libelli, 2015)	Itália	A Fuzzy Decision Support System for irrigation and water conservation in agriculture	Environmental Modelling & Software
3	2015	(Stone et al., 2015)	EUA	Variable-rate irrigation management using an expert system in the eastern coastal plain	Irrigation Science
4	2016	(Feng et al., 2016)	China	Comparison of ELM, GANN, WNN and empirical models for estimating reference evapotranspiration in humid region of Southwest China	Journal of Hydrology
5	2016	(King e Shellie, 2016)	EUA	Evaluation of neural network modeling to predict non-water-stressed leaf temperature in wine grape for calculation of crop water stress index	Agricultural Water Management
6	2016	(Karandish e Šimůnek, 2016)	Irã	A comparison of numerical and machine-learning modeling of soil water content with limited input data	Journal of Hydrology

Quadro 1B, Cont.

<b>7</b>	2016	(Navarro-Hellín et al., 2016)	Espanha	A decision support system for managing irrigation in agriculture	Computers and Electronics in Agriculture
<b>8</b>	2017	(Villarrubia et al., 2017)	Espanha	Combining Multi-Agent Systems and Wireless Sensor Networks for Monitoring Crop Irrigation	Sensors
<b>9</b>	2017	(Elnesr e Alazba, 2017)	Arábia Saudita	Simulation of water distribution under surface dripper using artificial neural networks	Computers and Electronics in Agriculture
<b>10</b>	2017	(Kontogiannis et al., 2017)	Grécia	Proposed Fuzzy-NN Algorithm with LoRa Communication Protocol for Clustered Irrigation Systems	Future Internet
<b>11</b>	2017	(Yang et al., 2017)	China	A flexible decision support system for irrigation scheduling in an irrigation district in China	Agricultural Water Management
<b>12</b>	2018	(Chang e Lin, 2018)	Taiwan	Smart Agricultural Machine with a Computer Vision-Based Weeding and Variable-Rate Irrigation Scheme	Robotics
<b>13</b>	2018	(Al-Ghobari et al., 2018)	Arábia Saudita	Prediction of wind drift and evaporation losses from sprinkler irrigation using neural network and multiple regression techniques	Agricultural Water Management

Quadro 1B, Cont.

<b>14</b>	2018	(Goap et al., 2018)	Índia	An IoT based smart irrigation management system using Machine learning and open source technologies	Computers and Electronics in Agriculture
<b>15</b>	2018	(Munir et al., 2018)	Paquistão	Design and Implementation of an IoT System for Smart Energy Consumption and Smart Irrigation in Tunnel Farming	Energies
<b>16</b>	2019	(Shi et al., 2019)	China	Decision Support System for Variable Rate Irrigation Based on UAV Multispectral Remote Sensing	Sensors
<b>17</b>	2019	(Mouatadid et al., 2019)	Canadá	Coupling the maximum overlap discrete wavelet transform and long short-term memory networks for irrigation flow forecasting	Agricultural Water Management
<b>18</b>	2019	(Ferreira et al., 2019)	Brasil	Multivariate adaptive regression splines (MARS) applied to daily reference evapotranspiration modeling with limited weather data	Acta Scientiarum
<b>19</b>	2019	(Hoseini, 2019)	Irã	Use fuzzy interface systems to optimize land suitability evaluation for surface and trickle irrigation	Information Processing in Agriculture

Quadro 1B, Cont.

<b>20</b>	2019	(Nadafzadeh e Mehdizadeh, 2019)	Irã	Design and fabrication of an intelligent control system for determination of watering time for turfgrass plant using computer vision system and artificial neural network	Precision Agriculture
<b>21</b>	2019	(Keswani et al., 2019)	Índia	Adapting weather conditions based IoT enabled smart irrigation technique in precision agriculture mechanisms	Neural Computing and Applications
<b>22</b>	2019	(Kelley e Pardyjak, 2019)	EUA	Using Neural Networks to Estimate Site-Specific Crop Evapotranspiration with Low-Cost Sensors	Agronomy
<b>23</b>	2019	(González Perea et al., 2019)	Espanha	Prediction of irrigation event occurrence at farm level using optimal decision trees	Computers and Electronics in Agriculture
<b>24</b>	2020	(Torres-Sanchez et al., 2020)	Espanha	A decision support system for irrigation management: Analysis and implementation of different learning techniques	Water
<b>25</b>	2020	(Jamroen et al., 2020)	Tailândia	An intelligent irrigation scheduling system using low-cost wireless sensor network toward sustainable and precision agriculture	IEEE Access

Quadro 1B, Cont.

<b>26</b>	2020	(Seyedzadeh et al., 2020)	Irã	Artificial intelligence approach to estimate discharge of drip tape irrigation based on temperature and pressure	Agricultural Water Management
<b>27</b>	2020	(Raza et al., 2020)	Paquistão	Comparative Assessment of Reference Evapotranspiration Estimation Using Conventional Method and Machine Learning Algorithms in Four Climatic Regions	Pure and Applied Geophysics
<b>28</b>	2020	(Omidzade et al., 2020)	Irã	Comparing Fuzzy SARSA Learning and Ant Colony Optimization Algorithms in Water Delivery Scheduling under Water Shortage Conditions	Journal of Irrigation and Drainage Engineering
<b>29</b>	2020	(Sidhu et al., 2020a)	Índia	Long short-term memory neural network-based multi-level model for smart irrigation	Modern Physics Letters B
<b>30</b>	2020	(Sidhu et al., 2020b)	Índia	Machine learning based crop water demand forecasting using minimum climatological data	Multimedia Tools and Applications
<b>31</b>	2020	(Torres et al., 2020)	Brasil	Multilevel data fusion for the internet of things in smart agriculture	Computers and Electronics in Agriculture
<b>32</b>	2020	(Wakamori et al., 2020)	Japão	Multimodal neural network with clustering-based drop for estimating plant water stress	Computers and Electronics in Agriculture

Quadro 1B, Cont.

<b>33</b>	2020	(Shiri et al., 2020)	Irã	Simulating wetting front dimensions of drip irrigation systems: Multi criteria assessment of soft computing models	Journal of Hydrology
<b>34</b>	2020	(Filgueiras et al., 2020)	Brasil	Soil water content and actual evapotranspiration predictions using regression algorithms and remote sensing data	Agricultural Water Management
<b>35</b>	2020	(Karimi et al., 2020)	Irã	Supplanting missing climatic inputs in classical and random forest models for estimating reference evapotranspiration in humid coastal areas of Iran	Computers and Electronics in Agriculture
<b>36</b>	2021	(Blasi et al., 2021)	Jordânia	Machine Learning Approach for an Automatic Irrigation System in Southern Jordan Valley	Engineering, Technology & Applied Science Research
<b>37</b>	2021	(Gu et al., 2021)	China	Neural network soil moisture model for irrigation scheduling	Computers and Electronics in Agriculture
<b>38</b>	2021	(Dias et al., 2021)	Brasil	Reference evapotranspiration of Brazil modeled with machine learning techniques and remote sensing	PLOS One

Fonte: o autor (2021).

## APÊNDICE C

**Quadro 1C:** Matriz dos estudos primários cruzando estratégias com tipos de dados utilizados

		ESTRATÉGIAS UTILIZADAS								
		REDE NEURAL	LÓGICA FUZZY	SISTEMAS ESPECIALISTAS	ALGORITMOS DE REGRESSÃO	ALGORITMOS GENÉTICOS	SVM	NEURO FUZZY	ÁRVORE DECISAO e FLORESTA ALEATÓRIA	OUTROS
DADOS UTILIZADOS	SOLO	1-6-7-9-10-21-29-37	2-6-7-8-10-15-19-21-25	3-29	1-6-7-24-30	33	6-14-24-31	6-7-10	33-36	14
	CLIMA	4-5-6-7-10-13-17-21-22-27-29-32	2-6-7-8-10-11-15-16-21-25	29	5-6-7-13-17-18-24-30-38	4-23	6-14-24-27-31	6-7-10	23-35	14
	IMAGEM	20-32	12-16		34-38	20				
	OUTROS	26	26-28				26	26		

Fonte: o autor (2021)