

**KAROLINE MATIELLO ALMEIDA**

**CÁLCIO E ENXOFRE MELHORAM A EFICIÊNCIA HIDRÁULICA DO  
XILEMA E REDUZEM EVENTOS DE FORMAÇÃO DE EMBOLISMO EM  
PLANTAS DE EUCALIPTO.**

**VIÇOSA – MINAS GERAIS**

**KAROLINE MATIELLO ALMEIDA**

**CÁLCIO E ENXOFRE MELHORAM A EFICIÊNCIA HIDRÁULICA DO  
XILEMA E REDUZEM EVENTOS DE FORMAÇÃO DE EMBOLISMO EM  
PLANTAS DE EUCALIPTO.**

Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Solos e Nutrição de Plantas, para obtenção do título de *Doctor Scientiae*.

Orientador: Samuel V. Valadares

Coorientadores: Samuel C. V. Martins  
Nairam F. de Barros  
Hermínia E. P. Martinez

**VIÇOSA – MINAS GERAIS**

**Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Central da Universidade  
Federal de Viçosa - Campus Viçosa**

T

A447c  
2024

Almeida, Karoline Matiello, 1995-

Cálcio e enxofre melhoram a eficiência hidráulica do xilema e reduzem eventos de formação de embolismo em plantas de eucalipto / Karoline Matiello Almeida. – Viçosa, MG, 2024.  
1 tese eletrônica (65 f.): il. (algumas color.).

Orientador: Samuel Vasconcelos Valadares.

Tese (doutorado) - Universidade Federal de Viçosa,  
Departamento de Solos, 2024.

Referências bibliográficas: f. 56-65.

DOI: <https://doi.org/10.47328/ufvbbt.2024.430>

Modo de acesso: World Wide Web.

1. Eucalipto - Efeito da umidade do solo. 2. Solo - Teor de enxofre. 3. Solo - Teor de cálcio. 4. Xilema. 5. Floema.  
I. Valadares, Samuel Vasconcelos, 1987-. II. Universidade Federal de Viçosa. Departamento de Solos. Programa de Pós-Graduação em Solos e Nutrição de Plantas. III. Título.

CDD 22. ed. 631.432

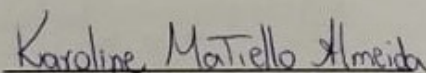
**KAROLINE MATIELLO ALMEIDA**

**CÁLCIO E ENXOFRE MELHORAM A EFICIÊNCIA HIDRÁULICA DO  
XILEMA E REDUZEM EVENTOS DE FORMAÇÃO DE EMBOLISMO EM  
PLANTAS DE EUCALIPTO.**

Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Solos e Nutrição de Plantas, para obtenção do título de *Doctor Scientiae*.

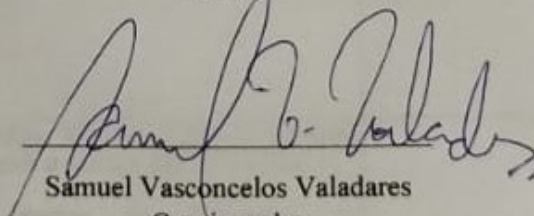
APROVADA: 28 de fevereiro de 2024.

Assentimento:



Karoline Matiello Almeida

Autora



Samuel Vasconcelos Valadares

Coorientador

À minha mãe Maria Gorete Matiello e  
ao meu irmão Paulo Geovane Meireles.

**Dedico.**

## **AGRADECIMENTOS**

Primeiramente quero agradecer a Deus por ter sido meu refúgio durante todo esse tempo e por ter me concebido a oportunidade de realizar o doutorado.

À minha família, em especial a minha mãe Maria Gorete, meu irmão Paulo Geovane e meus avós, por todo apoio fornecido.

Aos meus tios Edson Marcio e Lucina, por terem me recebido de forma tão generosa e terem me apoiado durante todo o tempo.

Ao meu orientador Samuel Valadares por todos esses anos de orientação e amizade.

Aos meus coorientadores Samuel Martins, Nairam de Barros e Hermínia Martinez, por toda ajuda durante meus projetos.

A todos os professores que foram responsáveis pelo meu crescimento intelectual.

À Universidade Federal de Viçosa pela oportunidade de seguir meus estudos.

Ao Programa de Pós-Graduação em Solos e Nutrição de Plantas pela infraestrutura e suporte.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico pela concessão da bolsa de estudos.

A todos os meus amigos e estagiários Santiago, Murilo e Geraldo, por toda ajuda durante a condução dos experimentos.

Aos meus amigos Leonardo, Françoise, Ana Paula, Aniely, Joesio, Sara e Carol, por toda ajuda e por terem tornado essa jornada mais alegre.

Aos técnicos de laboratório Fabiane, Leila e Guilherme, por toda ajuda.

Aos demais colegas por todo companheirismo e momentos de descontração.

A todos que de alguma forma tornaram esse sonho realidade.

## RESUMO

ALMEIDA, Karoline Matiello, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, fevereiro de 2024. **Cálcio e enxofre melhoram a eficiência hidráulica do xilema e reduzem eventos de formação de embolismo em plantas de eucalipto.** Orientador: Samuel Vasconcelos Valadares. Coorientadores: Samuel C. V. Martins, Nairam Félix de Barros e Hermínia E. P Martinez.

A falha do sistema hidráulico das plantas devido à redução da disponibilidade hídrica é uma das principais causas de morte de árvores no mundo. Um adequado manejo nutricional pode melhorar a condutância hidráulica e reduzir a vulnerabilidade ao embolismo, no entanto, estudos relacionando os mecanismos envolvidos no efeito dos nutrientes sobre o sistema hidráulico das plantas são escassos. Objetivou-se, com este trabalho, avaliar o efeito da omissão de cálcio (Ca) e enxofre (S) sobre a condutância hidráulica e vulnerabilidade ao embolismo em plantas de eucalipto. Foram realizados dois experimentos com plantas de eucalipto (*Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis*), cultivado em vasos de 8 L, em casa de vegetação. Ao longo dos experimentos, foram realizadas avaliações de trocas gasosas. Ao final dos experimentos foram avaliados efeitos dos tratamentos sobre a condutância hidráulica foliar ( $K_{\text{folha}}$ ), condutividade hidráulica xilemática ( $K_{\text{xilema}}$ ) e vulnerabilidade foliar ao embolismo. Os primeiros sinais de embolismo em plantas com S ocorreram em potenciais mais baixos, indicando uma boa margem de segurança hidráulica. Essas plantas também reduziram a elasticidade da parede celular e aumentaram seu potencial osmótico. Adicionalmente, apresentaram maior massa foliar específica, maior diâmetro hidráulico médio e menor número de vasos, além de aumentar taxa fotossintética e eficiência no uso da água. Plantas sem S aumentaram sua capacitância foliar, minimizando a perda de água durante flutuações no potencial hídrico. Plantas adubadas com Ca, sem S, apresentaram baixa margem de segurança hidráulica. Ambos os nutrientes (Ca e S) contribuíram para maiores valores de massa seca de ramo (MSR) e massa seca foliar (MSF), bem como maior  $K_{\text{xilema}}$  e  $K_{\text{folha}}$ . Os resultados deste trabalho demonstram que o fornecimento de Ca e S (principalmente) está associado à melhoria da condutância hidráulica e redução da vulnerabilidade ao embolismo em plantas de eucalipto.

**Palavras-chave:** *Eucalyptus*; Fertilização; Hidráulica da planta; Embolismo; Nutrição mineral.

## ABSTRACT

ALMEIDA, Karoline Matiello, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, February, 2024. **Calcium and sulfur improve xylem hydraulic efficiency and reduce embolism formation events in eucalyptus plants.** Adviser: Samuel Vasconcelos Valadares. Co-advisers: Samuel C. V. Martins, Nairam Félix de Barros e Hermínia E. P Martinez.

The failure of plant hydraulic systems, induced by reduced water availability in the soil, is one of the main causes of tree mortality worldwide. Adequate nutritional management can improve hydraulic conductance and reduce vulnerability to embolism in plants. However, studies on this topic are scarce, and the mechanisms by which different nutrients affect the plant hydraulic system need to be further explored. This study aimed to evaluate the effect of calcium and sulfur omission on hydraulic conductance and vulnerability to embolism in eucalypt. Two experiments were conducted with eucalyptus plants (*Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis*), grown in 8 L pots in a greenhouse. Throughout the experiments, gas exchange evaluations were performed. At the end of the experiments, the effects of the treatments on leaf hydraulic conductance ( $K_{\text{leaf}}$ ), xylem hydraulic conductivity ( $K_{\text{xylem}}$ ), leaf vulnerability to embolism, and plant growth were evaluated. The first signs of embolism in plants with S occurred at lower potentials. These plants also reduced cell wall elasticity and showed lower osmotic potential. Additionally, these plants had higher specific leaf mass and showed a larger average hydraulic diameter and fewer vessels, as well as increased photosynthetic rate and water use efficiency. Plants under S absence intensified their leaf capacitance, minimizing water loss during fluctuations in water potential. Consequently, these plants increased their saturated water content. Plants fertilized with Ca showed a lower cavitation index, but in the absence of S, the nutrient did not present a high hydraulic safety margin. Both nutrients (Ca and S) contributed to higher values of MSR and MSF, as well as higher  $K_{\text{xylem}}$  and  $K_{\text{leaf}}$ . Taken together, the results of this study demonstrate that the supply of Ca and S (mainly) is associated with improved hydraulic conductance and reduced vulnerability to embolism in eucalyptus plants. Understanding the mechanisms by which these nutrients influence plant responses to water stress allows the development of new strategies for rational nutrient management and mitigation of the negative effects of climate change, including more frequent droughts.

**Keywords:** Eucalyptus; Fertilization; Plant hydraulics; Embolism; Mineral nutrition.

## LISTA DE FIGURAS

**Figura 1.** Temperatura da casa de vegetação durante condução dos experimentos..... 16

**Figura 2.** Área acumulativa do xilema embolizado com a diminuição do potencial hídrico foliar em plantas de eucalipto submetidas a tratamentos com e sem Ca e S. As curvas representam dados médios (linha sólida)  $\pm$  DP (área sombreada). Linhas tracejadas representa os pontos de P<sub>12</sub> (12% de embolismo), P<sub>50</sub> (50% de embolismo) e P<sub>88%</sub> (88% de embolismo). (a) experimento 1 e (b) experimento 2. .... 23

**Figura 3.** Imagens representando a sequência de eventos de embolia observados nos tratamentos S+ Ca+ (a), S+ Ca- (b), S- Ca+ (c), S- Ca- (d). Cada evento de embolia é marcado por uma cor diferente e corresponde ao  $\Psi$ folha, de acordo com a escala apresentada. Os primeiros grandes sinais de embolismo foram observados nas nervuras principais, seguindo para nervuras secundárias..... 24

**Figura 4.** Avaliação de características foliares de plantas de eucalipto suplementadas com Ca e S. Seção transversal do limbo foliar de plantas de eucalipto, submetidas aos tratamentos +Ca+S (a); +Ca-S (B); -Ca+S (C) e -Ca-S (d). Ep.s: epiderme superior; Ep.i: epiderme inferior; Pp: parênquima paliçádico; Pl: parênquima lacunoso; Ei: espaço intercelular. Escala = 100  $\mu$ m. .... 29

**Figura 5.** Corte transversal da folha de eucalipto com detalhe na região da nervura central, submetidos aos tratamentos +Ca+S (a); +Ca-S (B); -Ca+S (C) e -Ca-S (d). Xi: xilema. Escala de A a D: 50 $\mu$ m. .... 31

**Figura 6.** Condutância hidráulica de folhas de Eucalipto na presença ou não de Ca e S. Letras maiúsculas denotam diferença significativa entre os tratamentos que receberam ou não o elemento Ca e letras minúsculas denotam diferença estatística entre tratamentos que receberam ou não o elemento S de acordo com o teste F (P <0,05). Os dados são média  $\pm$  EP (n = 5 para experimento 1 e n = 4 para experimento 2)..... 35

**Figura 7.** Condutividade hidráulica do xilema de Eucalipto na presença ou não de Ca e S. Letras maiúsculas denotam diferença significativa entre os tratamentos que receberam ou não o elemento Ca e letras minúsculas denotam diferença estatística entre tratamentos que receberam ou não o elemento S de acordo com o teste F (P <0,05). Os dados são média  $\pm$  EP (n = 5 para experimento 1 e n = 4 para experimento 2)..... 36

**Figura 8.** Massa seca do caule de Eucalipto na presença ou não de Ca e S. Letras maiúsculas denotam diferença significativa entre os tratamentos que receberam ou não o elemento Ca e letras minúsculas denotam diferença estatística entre tratamentos que receberam ou não o elemento S de acordo com o teste F (P <0,05). Os dados são média  $\pm$  EP (n = 5 para experimento 1 e n = 4 para experimento 2)..... 37

**Figura 9.** Massa seca da folha de Eucalipto na presença ou não de Ca e S. Letras maiúsculas denotam diferença significativa entre os tratamentos que receberam ou não o elemento Ca e letras minúsculas denotam diferença estatística entre tratamentos que receberam ou não o elemento S de acordo com o teste F (P <0,05). Os dados são média  $\pm$  EP (n = 5 para experimento 1 e n = 4 para experimento 2)..... 37

## LISTA DE TABELAS

- Tabela 1.** Composição da solução nutritiva, correspondente a 100% da força iônica, utilizada em cada tratamento durante o crescimento das mudas de eucalipto..... 17
- Tabela 2.** Potencial hídrico foliar (MPa) a 12%, 50% e 88% da área acumulativa do xilema embolizado (P<sub>12</sub>, P<sub>50</sub> e P<sub>88</sub>, respectivamente) e MSH<sub>50</sub> (MPa). Valores são referentes a média de ambos experimentos. .... 23
- Tabela 3.** Potencial de água no ponto de perda de turgor ( $\Psi_{PPT}$ ), potencial osmótico em turgescência ( $\Psi_{100}$ ), módulo de massa de elasticidade ( $\epsilon$ ), capacitância foliar em pleno turgor ( $C_{PT}$ ), capacitância foliar após ponto de perda de turgor ( $C_{APT}$ ), conteúdo saturado de água saturada (CSA) e massa foliar específica (MFE). .... 25
- Tabela 4.** Densidade de venação (DV), espessura da epiderme superior (EES), espessura da epiderme inferior (EEI), espessura do limbo foliar (LF), espaço intercelular (EI), espessura do parênquima paliçádico (PP), espessura do parênquima lacunoso (PL), razão PP/PL, e densidade estomática (DE). .... 27
- Tabela 5.** Razão entre a espessura da parede do xilema (t) e o diâmetro do lúmen do xilema (b) do pecíolo [(t/b) 2], diâmetro médio dos condutos do xilema do pecíolo (Dh\_médio), diâmetro máximo dos condutos do xilema do pecíolo (Dh\_máximo) e número de vasos do xilema do pecíolo (NV). .... 30
- Tabela 6.** Fotossíntese - A ( $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ) das folhas de eucalipto em diferentes dias após o plantio (DAP). Os dados são média  $\pm$  EP (n = 5 para experimento 1 e n = 4 para experimento 2). .... 32
- Tabela 7.** Concentração interna de CO<sub>2</sub> - C<sub>i</sub> ( $\text{mol CO}_2 \text{ mol}^{-1} \text{ ar}$ ) em diferentes dias após o plantio (DAP). Os dados são média  $\pm$  EP (n = 5 para experimento 1 e n = 4 para experimento 2). .... 32
- Tabela 8.** Condutância estomática - g<sub>s</sub> ( $\text{mol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ) em diferentes dias após o plantio (DAP). Os dados são média  $\pm$  EP (n = 5 para experimento 1 e n = 4 para experimento 2). .... 33
- Tabela 9.** Transpiração - E ( $\text{mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ) em diferentes dias após o plantio (DAP). Os dados são média  $\pm$  EP (n = 5 para experimento 1 e n = 4 para experimento 2). .... 33
- Tabela 10.** Eficiência no uso da água (EUA) ( $\mu\text{mol CO}_2 \text{ mol}^{-1} \text{ H}_2\text{O}$ ) em diferentes dias após o plantio (DAP). Os dados são média  $\pm$  EP (n = 5 para experimento 1 e n = 4 para experimento 2). .... 34

## LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

$A$  = taxa fotossintética líquida

$CSA$  = conteúdo saturado de água

$C_i$  = concentração interna foliar de  $CO_2$

$C_{PT}$  = capacitância foliar em pleno turgor

$C_{APT}$  = capacitância foliar após perda de turgor

$DE$  = densidade estomática

$Dh_{Máximo}$  = diâmetro hidráulico máximo dos vasos do xilema

$Dh_{Médio}$  = diâmetro hidráulico médio dos vasos do xilema

$DV$  = densidade de venação

$\epsilon$  = módulo de elasticidade

$E$  = transpiração foliar

$EEI$  = epiderme inferior

$EI$  = espaço intercelular

$EES$  = epiderme superior

$EUA$  = eficiência no uso da água

$g_s$  = condutância estomática

$K_{folha}$  = condutância hidráulica foliar

$K_{xilema}$  = condutividade hidráulica do xilema

$LF$  = limbo foliar

$MSC$  = massa seca do caule

$MSF$  = massa seca da folha

$MSH_{50}$  = Margem de segurança hidráulica

$MFE$  = massa foliar específica

$NV$  = número de vasos do xilema

$P_{12}$ ,  $P_{50}$  e  $P_{88}$  = potencial hídrico responsável por 12, 50 e 88 % da área cumulativa de embolismo, respectivamente

$PL$  = parênquima lacunoso

$PP$  = parênquima paliçádico

$PP/PL$  = razão entre o parênquima paliçádico e o parênquima lacunoso

$(t/b)^2$  = razão entre a espessura da parede do xilema ( $t$ ) e diâmetro do lúmen do xilema ( $b$ )

$\Psi_{PPT}$  = potencial hídrico de perda do turgor foliar

$\Psi_w$  = potencial hídrico foliar

$\Psi_{100}$  = potencial osmótico em turgescência

## SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO .....	13
2. MATERIAL E MÉTODOS.....	16
2.1 Condições experimentais .....	16
2.2 Avaliações.....	17
2.2.1 Condutividade hidráulica do xilema .....	17
2.2.3 Condutância hidráulica foliar .....	19
2.2.4 Vulnerabilidade foliar ao embolismo .....	19
2.2.5 Massa seca de folha e caule.....	20
2.2.6 Determinação de macro e micronutrientes.....	20
2.2.7 Curvas PV .....	20
2.2.8 Trocas gasosas.....	21
2.2.9 Características anatômicas .....	21
2.3 Análise de dados .....	22
3. RESULTADOS.....	23
3.1 O enxofre retarda o aparecimento de cavitação e aumenta a margem de segurança hidráulica nas plantas de eucalipto .....	23
3.2. A presença de enxofre contribui para reduzir a elasticidade da parede celular e potencial osmótico das plantas.....	26
3.3 A ausência de enxofre contribui para aumentar o tamponamento hídrico das plantas. ....	26
3.4 O cálcio contribui para reduzir a massa foliar específica das plantas.....	26
3.5 O A omissão de enxofre aumenta a espessura do parênquima lacunoso.....	26
3.6 A omissão do cálcio aumenta a espessura do parênquima paliçádico .....	27
3.7 O enxofre aumenta o diâmetro e reduz o número de vasos no pecíolo das plantas .....	29
3.8 O enxofre aumenta a taxa fotossintética das plantas .....	31
3.9 Cálcio e enxofre aumentam a condutância hidráulica foliar e condutividade xilemática das plantas de eucalipto.....	35
4. DISCUSSÃO.....	38
4.1 Atributos de relações hídricas postergam a ocorrência de embolismo em plantas de eucalipto.....	38
4.2 Efeito do cálcio e enxofre na espessura do parênquima lacunoso e paliçádico....	41
4.3 Efeito do cálcio e enxofre nas trocas gasosas das plantas .....	41
4.4 Efeito cálcio e enxofre no crescimento das plantas .....	42
4.5 Adubação com enxofre pode evitar a sementeira de ar nos vasos xilemáticos....	43

4.6 Cálcio e enxofre aumentam a condutância hidráulica da folha e condutividade do xilema das plantas .....	44
5. CONCLUSÃO .....	46
6. APÊNDICE .....	47
7. REFERÊNCIAS .....	56

## 1. INTRODUÇÃO

Durante a seca, a falha do sistema hidráulico é uma das principais causas da mortalidade de árvores (ALLEN et al., 2010; CARNICER et al., 2011). O transporte de água nas plantas ocorre através dos vasos xilemáticos e depende de pressões negativas (PRADO M. J, 2019). A restrição hídrica reduz os potenciais de água no solo, e, conseqüentemente, eleva a tensão nos condutos do xilema, aumentando a probabilidade de ocorrência de eventos de cavitação. A cavitação do xilema é caracterizada pela interrupção da coluna de água sob pressão negativa dos vasos (TYREE & SPERRY, 1989). Isso resulta na desconexão hidráulica da parte aérea e raízes das plantas (TYREE & SPERRY, 1989; VILAGROSA et al., 2012). Com a contínua redução do potencial hídrico, as bolhas difundem-se pelos vasos, ocasionando perda da condutância hidráulica (ADAMS et al., 2017) e morte das plantas (BRODRIBB & COCHARD, 2009; DAVIS et al., 2022).

A ausência dos principais nutrientes pode provocar diversas alterações metabólicas e morfológicas nas plantas, incluindo modificações nos componentes do sistema hidráulico (AMPONSAH IG et al., 2004). Essas mudanças favorecem a modificação da condutância estomática (AMPONSAH IG et al., 2004; GUEHL; FORT; FERHI, 1995; SCHOLZ F. G et al., 2007), condutância hidráulica das folhas (BUCCI et al., 2006a) raízes (LI et al., 2009; RADIN J. W; EIDENBOCK M. P, 1984) e caules (BUCCI et al., 2006b; HARVEY HP; VAN DEN DRIESSCHE R, 1997). A deficiência de fósforo (P) por exemplo, reduz acentuadamente a condutividade hidráulica da raiz de milho (*Zea mays*) e sorgo (*Sorghum vulgare Pers.*), uma vez que as raízes das plantas sob deficiência desse nutriente apresentam maior degradação das células corticais, o que reduz o transporte de água (SHANGGUAN et al. 2005; FAN et al., 2007). Por sua vez, a alta disponibilidade de nitrogênio (N) pode aumentar o diâmetro do conduto do xilema (HACKE et al., 2010), podendo elevar a condutância hidráulica dos ramos (HACKE et al., 2010). No entanto, quando não há mudança na densidade dos condutos, o excesso de N também pode aumentar a vulnerabilidade à embolia (HACKE et al., 2010; SPERLING et al., 1999, SPERLING et al., 1999). Além desses nutrientes, o potássio (K) desempenha um papel crucial no sistema hidráulico das plantas. A adubação com K favorece uma rápida recuperação das plantas após os primeiros eventos de chuva, conferindo-lhes alta plasticidade (CHAMBI-LEGOAS et al. 2023).

O cálcio (Ca) é um dos nutrientes mais absorvidos pela maioria das plantas (MARSCHNER, 2011) e tem grande participação na manutenção da membrana celular e estrutura da parede celular (AHANGER et al., 2014; AHANGER; AHMAD, 2019; PLIETH;

VOLLBEHR, 2012). nutriente Ca também melhora a síntese de pigmentos (SHABALA; SCHIMANSKI; KOUTOULIS, 2002) e regula a condutância estomática (KAYA et al., 2022; SHABALA; SCHIMANSKI; KOUTOULIS, 2002), além de desempenhar um importante papel como mensageiro secundário, contribuindo significativamente para a resiliência das plantas frente a estresses bióticos e abióticos (DEFALCO T. A; BENDER K.W; SNEDDEN W. A, 2010; HEPLER P. K., 2005; MCAINSH M. R; PITTMAN J. K, 2009; REDDY A.S, 2001). Em um dos primeiros estudos sobre o mecanismo de embolia do xilema induzida por estresse hídrico (SPERRY; TYREE, 1988b), os autores descobriram que o ácido oxálico, em conjunto com o cálcio (Ca), aumentou a vulnerabilidade à cavitação nos condutos do bordo-açucareiro (*Acer saccharum Marsh*), sugerindo que o Ca pode desempenhar um papel significativo nesse processo. Posteriormente, Navarro, Martínez e Carvajal, (2000), observaram que a presença do Ca aumentou a condutividade hidráulica das raízes de tomate e reduziu o efeito negativo da salinidade na absorção de água. Analisando o efeito do Ca sobre a vulnerabilidade à cavitação em *Fagus sylvatica*, Herbette & Cochard, (2010) também concluíram que a remoção desse nutriente da parede celular dos vasos aumenta a vulnerabilidade à cavitação do xilema das plantas, sem qualquer efeito na condutância hidráulica do xilema.

O enxofre (S) desempenha um papel crucial como componente de diversos metabólitos secundários, sendo essencial para várias funções fisiológicas nas plantas (AARABI et al., 2020; LEUSTEK; SAITO, 1999). Ele é um constituinte fundamental de aminoácidos como cisteína e metionina, que são essenciais à formação de proteínas, desempenhando papéis vitais nas plantas, incluindo a estrutura celular, o metabolismo e a regulação genética (LI; GAO; YANG, 2020). O S também desempenha um papel importante no metabolismo do N, (COURBET et al., 2019) e está presente em compostos como a glutatona, essencial para remoção de espécies reativas de oxigênio (ROS) (AHMAD et al., 2016; CHAN et al., 2013; XIA et al., 2018). Também está envolvido na biossíntese de fitohormônios como ABA, que participa da regulação do fechamento estomático (FATMA et al., 2016; KHAN; ASGHER; KHAN, 2014), além de ser indispensável para formação de vitaminas, enzimas, aminoácidos e proteínas, necessários para aumentar a resistência das plantas à seca (ZHAO et al., 2008).

Alguns autores relataram que após 4 dias de remoção de S da solução nutritiva das plantas de cevada (*Hordeum vulgare* L), houve uma redução de 20% na condutividade hidráulica radicular das plantas. Além disso, ao longo de 5 dias, houve uma redução de 33% na condutância estomática, 37% na transpiração e 18% na fotossíntese, em comparação aos valores de plantas controle, adubadas com S (KARMOKER et al., 1991).

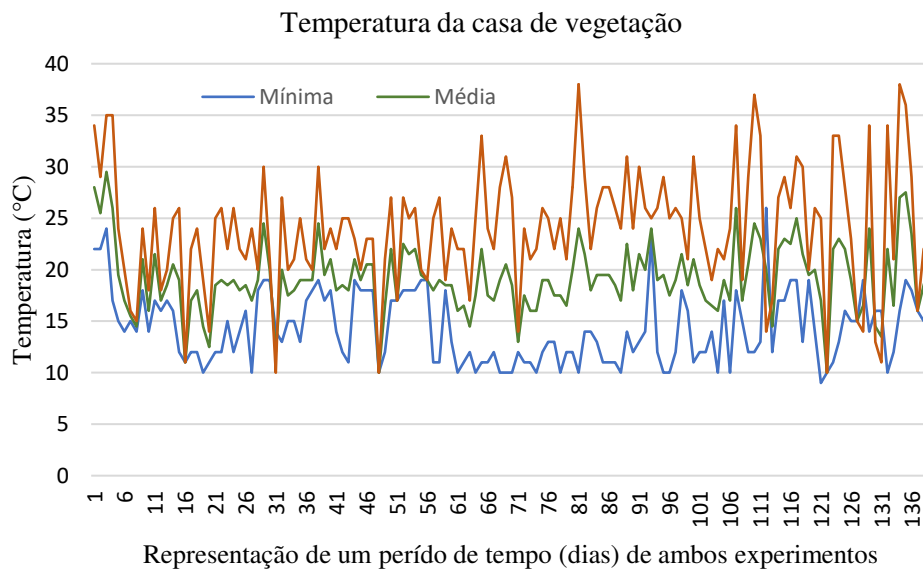
Compreender como ambos nutrientes (Ca e S) afetam a integridade e o funcionamento dos tecidos vegetais é essencial para esclarecer seu papel na resistência das plantas ao estresse hídrico. Investigar os mecanismos através dos quais esses nutrientes influenciam a absorção, translocação e redistribuição de água, bem como sua contribuição para a manutenção da integridade dos tecidos em condições de déficit hídrico também é fundamental para aprimorar as práticas de manejo nutricional e desenvolver estratégias mais eficazes para enfrentar condições ambientais adversas, como períodos de seca.

Até o momento, há poucos trabalhos que abordam a relação entre fertilização e segurança hidráulica das plantas, e, por conseguinte, sua capacidade de sobrevivência em ambientes com limitada disponibilidade hídrica. Este trabalho foi realizado com o objetivo de avaliar o efeito da omissão de Ca e S sobre a condutância hidráulica e vulnerabilidade ao embolismo em plantas de eucalipto.

## 2. MATERIAL E MÉTODOS

### 2.1 Condições experimentais

Foram conduzidos dois experimentos em casa de vegetação na Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, Brasil 20°45'29.18"S; 42°52'13.54"W. A temperatura média da casa de vegetação durante um período da condução dos experimentos foi de 23,5°C e as temperaturas máximas e mínimas foram de 38 e 9°C, respectivamente (Figura 1).



**Figura 1.** Temperatura da casa de vegetação durante condução dos experimentos.

O primeiro experimento foi conduzido entre outubro de 2021 a julho de 2022 e o segundo entre novembro de 2021 à agosto de 2022. O experimento 2 foi conduzido para validar e reforçar os resultados obtidos no experimento 1. Em ambos experimentos foram utilizadas mudas com aproximadamente 60 dias de idade do clone I144 (híbrido *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis*). As raízes das mudas foram lavadas e, em seguida, as plantas foram transferidas para vasos de 8 L (1 planta por vaso). Os vasos foram preenchidos com areia lavada e esterilizada, conforme descrito por EMBRAPA (2018). Os experimentos foram conduzidos em blocos ao acaso e combinados em arranjo fatorial 2x2, com e sem Ca e S. Os experimentos 1 e 2 foram conduzidos com 5 e 4 repetições, respectivamente.

As plantas foram adubadas utilizando-se solução com macro e micronutrientes (Tabela 1) e, os tratamentos foram aplicados imediatamente após o plantio das mudas. Durante os primeiros 40 dias, utilizou-se solução com força iônica equivalente a 50% da solução final.

Posteriormente, e até o final do experimento, a força iônica da solução foi equivalente a 100% (Tabela 1).

**Tabela 1.** Composição da solução nutritiva, correspondente a 100% da força iônica, utilizada em cada tratamento durante o crescimento das mudas de eucalipto.

Reagentes	Completa (+S +Ca)	Omissão de Ca (+S -Ca)	Omissão de S (-S +Ca)	Omissão de Ca e S (-S -Ca)
$\text{mmol L}^{-1}$				
KH <sub>2</sub> PO <sub>4</sub>	0,66	0,66	0,66	0,66
KNO <sub>3</sub>	3,34	3,34	3,34	3,34
NH <sub>4</sub> NO <sub>3</sub>	0	1,74	0	1,14
Mg (NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	0	0	0,6	0,6
Ca (NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	1,74	0	1,14	0
MgSO <sub>4</sub>	0,6	0,6	0	0
CaCl <sub>2</sub>	0,82	0	1,42	0
$\mu\text{mol L}^{-1}$				
MnCl <sub>2</sub>	7	7	7	7
H <sub>3</sub> BO <sub>3</sub>	19	19	19	19
ZnCl <sub>2</sub>	2	2	2	2
Na <sub>2</sub> MoO <sub>4</sub>	0,086	0,086	0,086	0,086
CuCl <sub>2</sub>	0,5	0,5	0,5	0,5
Fe EDTA	40	40	40	40

Solução de Clark, 1982 adaptado por Locatelli et al., 1984, com alterações nos valores de N, P e K.

Nos primeiros 40 dias, a solução foi aplicada semanalmente (50 mL/planta). Entre o 41° e 90° dia, a solução foi aplicada duas vezes por semana (70 mL/planta), e entre o 91° e o 120° dia, três vezes por semana (100 mL/planta). A partir do 121° dia e até o final dos experimentos, a aplicação era realizada quatro vezes por semana (100 mL/planta).

Todas as plantas foram irrigadas diariamente com água deionizada em volume suficiente para atingir a saturação da areia.

## 2.2 Avaliações

### 2.2.1 Condutividade hidráulica do xilema

A condutividade hidráulica do xilema ( $K_{\text{xilema}}$ ) foi determinada após 7 meses de instalação do experimento, utilizando-se hastes com aproximadamente 2 mm de diâmetro. Os

ramos de plantas bem hidratadas foram submersos em água e cortados com o auxílio de uma tesoura de poda. Em seguida, o material foi mantido submerso em água (durante 12 h) e coberto com saco plástico preto, para que os vasos do xilema estivessem completamente reidratados no início das medições, evitando a ocorrência de artefatos associados ao corte sob tensão (WHEELER et al., 2007). Após este período, com as hastes ainda submersas, ambas as extremidades das hastes foram cortadas. A condutividade hidráulica da haste foi determinada utilizando-se o método descrito por (SPERRY; TYREE, 1988a). As hastes foram mantidas sob água e conectadas, de um lado, a um sistema de mangueiras de silicone acopladas num reservatório de água Milli-Q, que foi mantido a temperatura ambiente ( $\cong 25\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), de onde a água fluía de uma fonte elevada (1,2 m de altura) fornecendo uma carga hidráulica de 0,01 Mpa. A outra extremidade da haste foi conectada à uma pipeta graduada de vidro de 0,2 mL. Assim que liberada do reservatório, a água foi perfundida através da haste e a taxa de fluxo foi calculada a partir da relação linear entre o tempo necessário para o avanço da coluna de água na graduação da pipeta e o volume preenchido na pipeta em função da condutividade do ramo. Após este processo, o comprimento dos ramos foi medido e um pequeno segmento da base e outro do ápice do ramo foram corados com Safranina a 1% em álcool 50% e fotografado usando-se uma câmera (Omax A3550S) acoplada a um estereomicroscópio (LabMotic-EM250, San Antônio, TX, USA). As imagens obtidas foram medidas com o software ImageJ (National Institute of Health, New York, NY, USA), e as taxas de fluxo foram normalizadas pelo comprimento do ramo e pela área de alburno. A condutividade hidráulica do xilema foi então calculada de acordo com a equação:

$$K_{xilema} = \left( \frac{F}{\frac{dP}{dx}} \right) / A_{alburno}$$

Onde:

$K_{xilema}$  (mmol m<sup>2</sup> m s<sup>-1</sup> Mpa<sup>-1</sup>)

F = vazão (mol s<sup>-1</sup>)

dP/dx = gradiente de pressão

$A_{alburno}$  (m<sup>2</sup>) = média da área da seção transversal do alburno da base e do ápice do ramo (TYREE; EWERS, 1991).

### 2.2.3 Condutância hidráulica foliar

A condutância hidráulica foliar ( $K_{\text{folha}}$ ) foi realizada após 7 meses de instalação do experimento, utilizando-se folhas completamente expandidas, através do método de fluxo evaporativo (BRODRIBB & HOLBROOK, 2006; SACK et al., 2002). As folhas tiveram seus pecíolos cortados debaixo d'água, conectados a um sistema de medidor de vazão (equipado com um transdutor de pressão 30PSI – Honeywell International). Posteriormente, foram colocados sob  $1.000 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  PPFD e ar turbulento induzido por ventilador para aumentar a transpiração foliar. A variação de pressão, temperatura da água e temperatura da folha foram registradas com um datalogger de alta resolução (Campbell Scientific, modelo: CR1000). A taxa de transpiração ( $E$ ) foi derivada da tensão criada dentro do sistema acionado pela folha através de uma resistência conhecida e registrada seguindo a estabilidade máxima (após 30 min). As folhas foram então removidas do sistema, ensacadas por 10 min (para permitir o equilíbrio do  $\Psi_w$ ) e tiveram seu  $\Psi_w$  medido com uma câmara de pressão tipo Scholander (modelo 1000, PMS Instruments, Albany, NY, EUA). Em seguida, as folhas foram digitalizadas e sua área medidas usando o software Image J (National Institute of Health, Nova York, NY, EUA). O valor  $E$  foi normalizado pela área foliar e  $k_{\text{folha}}$  foi calculado de acordo com a equação:

$$K_{\text{folha}} = (-E)/\Psi_w$$

Onde:

$K_{\text{folha}}$  (mmol H<sub>2</sub>O m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup> MPa<sup>-1</sup>)

$E$  = fluxo de transpiração (mmol H<sub>2</sub>O m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>)

$\Psi_w$  = potencial hídrico foliar (MPa)

### 2.2.4 Vulnerabilidade foliar ao embolismo

A vulnerabilidade da folha ao embolismo foi mensurada no último mês de cada experimento (entre julho e agosto de 2022) por meio do método de vulnerabilidade óptica (BRODRIBB et al., 2016). Para isso, na tarde anterior à análise, uma planta por tratamento foi irrigada constantemente para manter a umidade local e permitir que a planta se reidratasse completamente durante a noite. Na manhã seguinte, as plantas tiveram suas raízes lavadas para retirada da areia e foram imediatamente colocadas em baldes com água.

A parte abaxial de uma folha, pertencente do terço médio da planta, ainda conectada à planta foi fixada com fita adesiva em um scanner (Clamp, V2). As plantas foram retiradas dos baldes com água e, para evitar rápida dessecação, as raízes e a parte aérea das plantas foram

cobertas com sacos plásticos (HARTILL et al., 2023). As plantas foram então submetidas à desidratação gradual em ambiente com temperatura e umidade relativa constantes ( $\cong 25^\circ \text{C}$  e 60% UR). Utilizando uma câmara de pressão do tipo Scholander (modelo 1000, PMS Instruments, Albany, NY, EUA), os potenciais hídricos foliares ( $\Psi_w$ ) foram medidos em intervalos de 2 a 3h, utilizando-se uma folha por medição.

As imagens foram obtidas a cada 5 min e este processo foi finalizado após 1 hora da observação do último evento de embolismo. A área da imagem incluía a nervura principal e pelo menos 10 nervuras secundárias e ao final dos eventos de embolismo as imagens foram analisadas utilizando o software ImageJ (Instituto Nacional de Health, New York, NY, EUA) seguindo as instruções de <http://www.opensourceov.org> e (BRODRIBB et al., 2016). Em seguida, o grau de embolismo foi calculado como área acumulativa do xilema embolizado e normalizado pela área total de embolia.

Modelos lineares foram ajustados para relacionar as medições periódicas do  $\Psi_w$  e do tempo de desidratação da planta. Posteriormente, os valores de  $\Psi_w$  foram plotados juntamente com a porcentagem de área embolizada cumulativa (%) para obtenção do  $\Psi_w$  correspondente a 12, 50 e 88% da área cumulativa embolizada ( $P_{12}$ ,  $P_{50}$  e  $P_{88}$ ), bem como, as margens de segurança hidráulica ( $MSH_{50}$ ), que foram calculadas para cada planta como a diferença entre o potencial hídrico no  $\Psi_{PPT}$  e o potencial hídrico no  $P_{50}$ .

#### 2.2.5 *Massa seca de folha e caule*

Posterior a análise de vulnerabilidade foliar ao embolismo, as plantas tiveram suas raízes cortadas e separou-se as folhas do caule. Em seguida, os tecidos foram secos em estufa com circulação de ar forçada, a  $65^\circ \text{C}$  por 72 h. Posteriormente, as amostras foram pesadas em balança analítica de precisão (0,001g).

#### 2.2.6 *Determinação de macro e micronutrientes*

A determinação dos teores de P, K, S, Ca, Mg, Mn, B, Cu e Fe foi realizada por espectrometria de emissão atômica com plasma indutivamente acoplado (ICP-AES) após digestão do material em mistura nitroperclórica. O teor de N pelo método Kjeldahl após digestão sulfúrica do material (CARMO et al., 2000; YASUHARA & NOKIHARA, 2001).

#### 2.2.7 *Curvas PV*

Para obter as curvas PV (pressão-volume), uma folha totalmente expandida do terço médio de cada planta foi coletada e colocada em sacos ziplock com atmosfera saturada, em

seguida, usando um scanner de mesa (LI-COR, 1996) mediu-se a área de cada folha. Posteriormente, os pecíolos das folhas foram submersos em água para hidratação completa, permanecendo por 12 h. Após esse período, cada folha foi pesada em balança analítica de precisão (0,001g) e seu  $\Psi_w$  foi medido imediatamente, utilizando uma câmara de pressão do tipo Scholander (modelo 1000, PMS Instruments, Albany, NY, EUA). Este procedimento foi realizado periodicamente durante a desidratação lenta e gradual das folhas em condições de bancada ( $\cong 25^\circ\text{C}$  e 60% UR). Essas medições foram repetidas até que a relação entre o inverso do potencial hídrico e o teor relativo de água se tornou estritamente linear. Ao final, as folhas foram secas em estufa a  $65^\circ\text{C}$  por 72 h. Curvas pressão volume foram construídas plotando o inverso de  $\Psi_w$  contra o teor relativo de água (TRA) (TYREE & HAMMEL, 1972). As seguintes variáveis foram obtidas para cada curva: potencial osmótico em turgescência plena ( $\Psi_{100}$ ), potencial hídrico no ponto de perda de turgor ( $\Psi_{PPT}$ ), capacitância da folha em pleno turgor ( $C_{PT}$ ) e após perda de turgor ( $C_{APT}$ ), módulo de elasticidade ( $\varepsilon$ ) e, conteúdo saturado de água (CSA) conforme protocolo descrito por Bartlett; Scoffoni; Sack (2012). A massa foliar específica (MFE) foi determinada como a relação entre a massa seca e a área foliar.

### 2.2.8 Trocas gasosas

A taxa fotossintética ( $A$ ), concentração interna de  $\text{CO}_2$  ( $C_i$ ), condutância estomática ( $g_s$ ) e transpiração ( $E$ ) foram determinados utilizando-se o medidor de trocas gasosas (LI-6400-18 RGB Light Source, LI-COR) em folhas completamente expandidas do terço médio das plantas, sob radiação fotossinteticamente ativa (RFA) artificial ( $1000 \mu\text{mol f\u00f3tons m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ) e  $400 \mu\text{mol mol}^{-1}$  de  $\text{CO}_2$ . Com valores de  $g_s$  foi determinado a eficiência no uso da água (EUA), sendo a relação entre fotossíntese e condutância estomática ( $A/g_s$ ).

### 2.2.9 Características anatômicas

Uma folha do terço médio de cada planta foi fixada em FAA<sub>50</sub> (JOHANSEN, 1940) durante 48 h, e, posteriormente armazenada em etanol aquoso 70% (v v<sup>-1</sup>). Uma parte do pecíolo foi imersa em metacrilato (Historesina - Leica Microsystems Nussloch, Heidelberg, Alemanha) de acordo com as recomendações do fabricante. Em seguida, foram cortadas secções com 5  $\mu\text{m}$  de espessura usando um micr\u00f3tomo rotativo de avan\u00e7o autom\u00e1tico (Leica 31 RM2155, Leica Microsystems Inc., Derfeld, USA), coradas com azul de toluidina (O'BRIEN & FEDER; MCCULLY, 1964) e montadas em resina sint\u00e9tica (Permout®). As lâminas foram fotografadas com um microsc\u00f3pio de luz (AX70 TRF, Olympus Optical, T\u00f3quio, Jap\u00e3o) equipado com uma c\u00e2mera fotogr\u00e1fica digital (Zeis AxioCan HRc, G\u00f6ttinger, Alemanha) e um

computador com o programa de captura de imagens Axio Vision. As imagens foram obtidas com ampliação de 4 x para as medições da densidade de venação (DV), 10 x para as espessuras dos tecidos que constituem o limbo foliar, características da nervura central e densidade estomática (DE) e de 40 x para o índice estomático (IE). As medições foram realizadas com o auxílio do programa Image ProPlus (versão 4.5, Media Cybernetics, Silver Spring, EUA). A DV, DE e as análises de diâmetro e número dos condutos do xilema do pecíolo foram feitas como descrito por MARTINS S C V et al. (2014) e o  $t/b^2 \times (10^{-3})$  conforme descrito por CARDOSO et al. (2018).

### *2.3 Análise de dados*

Todos os dados foram submetidos à análise de variância. Os testes de Shapiro-Wilk e Levene foram aplicados para avaliar a normalidade residual para homogeneidade de variâncias. Os tratamentos foram comparados pelo teste F ( $P < 0,05$ ). Todos os testes estatísticos foram realizados no R versão 4.2.2 (R CORE TEAM, 2022).

### 3. RESULTADOS

#### 3.1 O enxofre retarda o aparecimento de cavitação e aumenta a margem de segurança hidráulica nas plantas de eucalipto

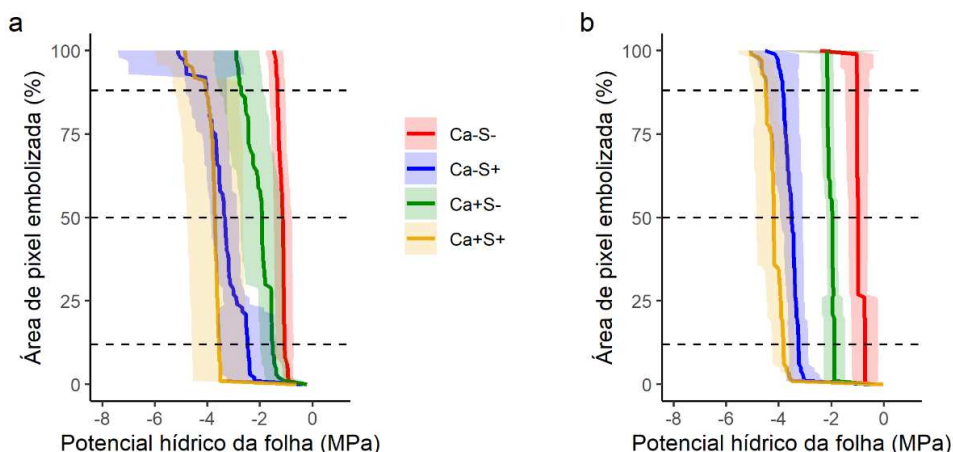
Os primeiros sinais de cavitação ( $P_{12}$ ) em plantas +S +Ca bem como +S -Ca ocorreram em potenciais mais baixos (mais negativos) ( $-3,7\pm 0,61$  MPa e  $-2,82\pm 0,55$  MPa, respectivamente, sem diferença estatística entre tratamentos (Tabela 2). Plantas adubadas com -S +Ca, bem como -S -Ca apresentaram um  $P_{12}$  em potenciais mais altos (menos negativos) ( $-1,24\pm 0,28$  MPa e  $-1,02\pm 0,31$  MPa, respectivamente) (Tabela 2), não apresentando diferença estatística entre tratamentos, (valores apresentados entre parêntesis são as médias dos dois experimentos – padrão adotado em todo o texto para os resultados similares).

**Tabela 2.** Potencial hídrico foliar (MPa) a 12%, 50% e 88% da área acumulativa do xilema embolizado ( $P_{12}$ ,  $P_{50}$  e  $P_{88}$ , respectivamente) e  $MSH_{50}$  (MPa). Valores são referentes a média de ambos experimentos.

Tratamento	$P_{12}$	$P_{50}$	$P_{88}$	$MSH_{50}$
	-----MPa-----			
+S +Ca	$-3,7\pm 0,61A$	$-3,93\pm 0,37A$	$-4,25\pm 0,58A$	1,92A
+S -Ca	$-2,82\pm 0,55A$	$-3,42\pm 0,67A$	$-3,96\pm 0,67A$	1,38A
-S +Ca	$-1,24\pm 0,38B$	$-1,38\pm 0,53B$	$-1,76\pm 0,85B$	-0,19B
-S -Ca	$-1,02\pm 0,31B$	$-1,02\pm 0,31B$	$-1,13\pm 0,33B$	-0,6B

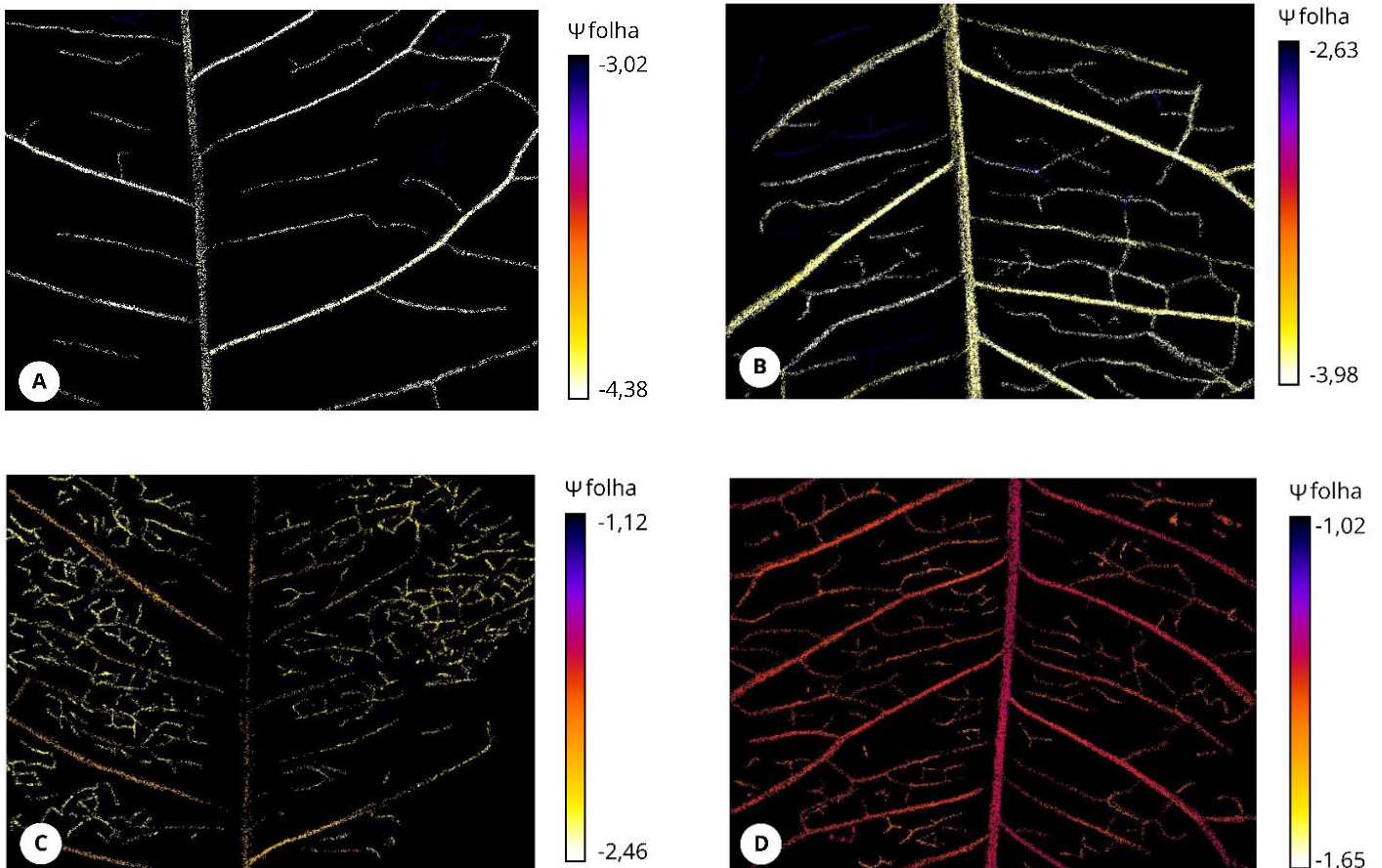
Letras diferentes nos tratamentos representam diferenças significativas de acordo com o teste F ( $P < 0,05$ ).

Em ambos experimentos, as curvas de vulnerabilidade à cavitação apresentaram comportamento sigmoideal (Figura 2).



**Figura 2.** Área acumulativa do xilema embolizado com a diminuição do potencial hídrico foliar em plantas de eucalipto submetidas a tratamentos com e sem Ca e S. As curvas representam dados médios (linha sólida)  $\pm$  DP (área sombreada). Linhas tracejadas representa os pontos de  $P_{12}$  (12% de embolismo),  $P_{50}$  (50% de embolismo) e  $P_{88}$  (88% de embolismo). (a) experimento 1 e (b) experimento 2.

Imagens representativas que descrevem a sequência de eventos de embolia observados nos tratamentos, podem ser visualizadas na Figura 3.



**Figura 3.** Imagens representando a sequência de eventos de embolia observados nos tratamentos S+ Ca+ (a), S+ Ca- (b), S- Ca+ (c), S- Ca- (d). Cada evento de embolia é marcado por uma cor diferente e corresponde ao  $\Psi_{\text{folha}}$ , de acordo com a escala apresentada. Os primeiros grandes sinais de embolismo foram observados nas nervuras principais, seguindo para nervuras secundárias.

O potencial de água na perda de turgor ( $\Psi_{PPT}$ ) é um indicador do  $\Psi_w$  em que ocorre 90% do fechamento estomático (CHRISTOFFERSEN et al., 2016), sendo muito utilizado em espécies lenhosas (CREEK et al., 2020; HOCHBERG et al., 2017; MARTIN-STPAUL; DELZON; COCHARD, 2017; TRUEBA et al., 2017). Nesse sentido, infere-se que plantas +S +Ca, bem como +Ca -S apresentaram maior fechamento estomático sob potenciais hídricos mais altos e, conseqüentemente, apresentam um  $MSH_{50}$  positiva (Tabela 2). Plantas -S +Ca, bem como -S -Ca provavelmente não apresentaram um alto fechamento estomático sob potenciais hídricos mais altos, apresentando um  $MSH_{50}$  negativa, com valores próximos a 0. Isso significa que essas plantas operaram no limiar entre o fechamento estomático e o  $P_{50}$

(Tabela 2). Isso demonstra que dentre os nutrientes avaliados, o S apresentou maior contribuição para reduzir riscos de vulnerabilidade à cavitação das plantas de eucalipto, conferindo maior segurança hidráulica às plantas.

**Tabela 3.** Potencial de água no ponto de perda de turgor ( $\Psi_{PPT}$ ), potencial osmótico em turgescência ( $\Psi_{100}$ ), módulo de massa de elasticidade ( $\epsilon$ ), capacitância foliar em pleno turgor ( $C_{PT}$ ), capacitância foliar após ponto de perda de turgor ( $C_{APT}$ ), conteúdo saturado de água saturada (CSA) e massa foliar específica (MFE).

<i>Experimento 1</i>				<i>Experimento 2</i>			
$\Psi_{PPT}$ (MPa)				$\Psi_{PPT}$ (MPa)			
	S+	S-	média		S+	S-	média
Ca+	-2,03±0,11	-1,44±0,04	-1,74±0,32A	Ca+	-2±0,1	-1,7±0,34	-1,84±0,28A
Ca-	-2,04±0,25	-1,58±0,15	-1,81±0,31A	Ca-	-2,05±0,45	-1,67±0,16	-1,86±0,37A
média	-2,04±0,19a	-1,51±0,13b		média	-2,02±0,3a	-1,68±0,25b	
$\Psi_{100}$ (MPa)				$\Psi_{100}$ (MPa)			
	S+	S-	média		S+	S-	média
Ca+	-1,54±0,07	-1,07±0,11	-1,3±0,26A	Ca+	-1,51±0,22	-1,05±0,15	-1,28±0,33A
Ca-	-1,57±0,35	-1,16±0,17	-1,37±0,33A	Ca-	-1,41±0,45	-1,25±0,22	-1,33±0,34A
média	-1,55±0,24a	-1,12±0,14b		média	-1,46±0,33a	-1,15±0,34b	
$\epsilon$ (MPa)				$\epsilon$ (MPa)			
	S+	S-	média		S+	S-	média
Ca+	11,73±0,68	8,74±2,11	10,23±2,16A	Ca+	12,65±2,44	11,31±4,43	11,98±3,39A
Ca-	13±3,95	9,54±1,29	11,27±3,31A	Ca-	12,47±3,44	7,15±2,06	9,81±3,86A
média	12,35±2,75a	9,14±1,75b		média	12,56±2,76a	9,23±3,89b	
$C_{PT}$ (mol m <sup>-2</sup> MPa <sup>-1</sup> )				$C_{PT}$ (mol m <sup>-2</sup> MPa <sup>-1</sup> )			
	S+	S-	média		S+	S-	média
Ca+	0,53±0,04	1,28±0,28	0,9±0,44A	Ca+	0,54±0,01	1,07±0,4	0,8±0,39A
Ca-	0,55±0,05	1,29±0,13	0,92±0,39A	Ca-	0,67±0,11	1,08±0,29	0,87±0,3A
média	0,55±0,04b	1,28±0,21a		média	0,6±0,09b	1,07±0,33a	
$C_{APT}$ (mol m <sup>-2</sup> MPa <sup>-1</sup> )				$C_{APT}$ (mol m <sup>-2</sup> MPa <sup>-1</sup> )			
	S+	S-	média		S+	S-	média
Ca+	1,3±0,19	3,04±1,67	2,17±1,44A	Ca+	1,45±0,25	3,61±0,88	2,53±1,3A
Ca-	1,75±1,35	2,92±1,09	2,16±1,31A	Ca-	1,77±1,4	2,22±0,89	2±1,1A
média	1,52±0,94b	2,97±1,33a		média	1,61±0,95b	2,92±1,1a	
CSA (g água g matéria seca <sup>-1</sup> )				CSA (g água g matéria seca <sup>-1</sup> )			
	S+	S-	média		S+	S-	média
Ca+	1,6±0,17	3,1±0,45	2,35±0,86A	Ca+	1,75±0,41	3,13±0,92	2,44±0,99A
Ca-	1,55±0,41	3,51±0,52	2,53±1,11A	Ca-	1,54±0,21	2,49±0,74	2,01±0,71A
média	1,57±0,3b	3,31±0,5a		média	1,65±0,32b	2,81±0,84a	
MFE (g m <sup>-2</sup> )				MFE (g m <sup>-2</sup> )			
	S+	S-	média		S+	S-	média
Ca+	91,78±4,73Ba	82,23±5,4Ab	87,01±6,93	Ca+	100,23±3,26	85,81±8,68	93,02±9,8B
Ca-	123,3±4,65Aa	85,03±4,4Ab	104,2±20,62	Ca-	131,68±12,87	95,94±10,12	113,8±22A
média	107,55±17,2	83,63±4,86		média	115,9±18,93a	90,88±10,2b	

Tratamentos com letras minúsculas iguais nas linhas e maiúsculas iguais na coluna não diferem entre si de acordo com o teste F (P <0,05).

### *3.2. A presença de enxofre contribui para reduzir a elasticidade da parede celular e potencial osmótico das plantas.*

Plantas suplementadas com S reduziram em 35% a elasticidade de sua parede celular (alto  $\epsilon$ ) e diminuíram em 32% o seu potencial osmótico ( $\Psi_{100}$ ), quando comparadas às plantas que não receberam fertilização com o nutriente (Tabela 3). Ambas características são estratégias que as plantas encontraram para lidar com a escassez atípica de água a nível celular. O acúmulo de compostos osmóticos é necessário para reduzir o  $\Psi_{PPT}$  – resultado citado anteriormente – enquanto a redução da elasticidade da parede celular auxilia na manutenção do turgor celular.

### *3.3 A ausência de enxofre contribui para aumentar o tamponamento hídrico das plantas.*

Plantas que não receberam S também investiram em estratégias para postergar a ocorrência da cavitação. Elas aumentaram em 105% sua capacitância foliar em pleno turgor ( $C_{PT}$ ) e em 88% sua capacitância após ponto de perda de turgor ( $C_{APT}$ ) (Tabela 4). Ambas características conferem maior tamponamento hídrico às plantas, fazendo com que elas percam uma menor quantidade de água durante altas variações no  $\Psi_w$ . Essas plantas aumentaram em 90% seu conteúdo saturado de água (CSA), quando comparadas às plantas que receberam S (Tabela 3).

### *3.4 O cálcio contribui para reduzir a massa foliar específica das plantas*

Com excessão da variável massa foliar específica (MFE), não houve diferença estatística para a presença ou ausência de Ca sob as variáveis analisadas da curva PV (Tabela 3). Plantas fertilizadas com o nutriente, reduziram em 22% sua MFE – dados referentes ao experimento 2, no qual não houve interação entre os tratamentos – (Tabela 3). Analisando a interação do experimento 1, percebemos que plantas com Ca, na ausência de S, reduziram 12% de sua MFE.

### *3.5 O A omissão de enxofre aumenta a espessura do parênquima lacunoso*

Analisando algumas características anatômicas, cujos dados estão representados na Tabela 4 (quantitativos) e Figura 4 (qualitativos), constatamos que na ausência do S, as plantas aumentaram em 39% a espessura de seu parênquima lacunoso (PL) (Tabela 4), quando comparadas às plantas que receberam o nutriente. Não houve diferença estatística para a presença ou ausência de S sobre a espessura do parênquima paliçádico (PP) das plantas (Tabela 4).

### 3.6 A omissão do cálcio aumenta a espessura do parênquima paliçádico

A omissão de Ca aumentou em 20% a espessura do parênquima paliçádico (PP) das plantas de eucalipto e não houve diferença estatística para a presença ou ausência do nutriente sobre a espessura do parênquima lacunoso (PL) das plantas (Tabela 4).

Plantas com S reduziram em 27% a espessura de seu limbo foliar (LF), quando comparadas as plantas que não receberam o nutriente (Tabela 4). Essas plantas também reduziram em 35% seu espaço intercelular (EI) – dados referentes ao experimento 2, no qual não houve interação entre os tratamentos – (Tabela 4). Já no experimento 1, plantas com S e Ca reduziram em 68% seu EI (Tabela 4).

Plantas com Ca aumentaram em 60% seu espaço intercelular – dados referentes ao experimento 2, onde não houve interação entre os tratamentos – (Tabela 4). Já no experimento 1, plantas com Ca e S aumentaram em 18% seu espaço intercelular.

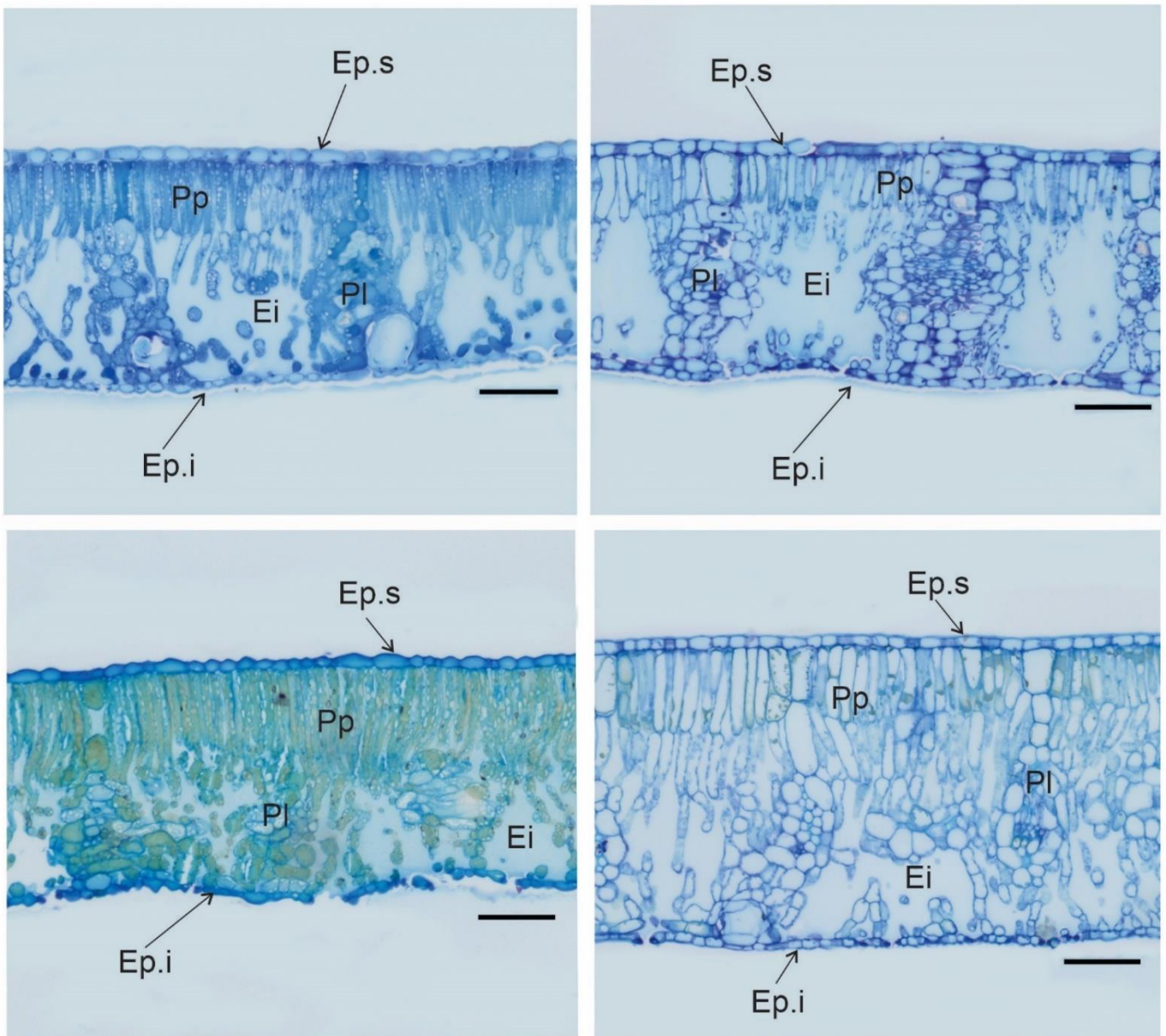
Não houve diferença estatística para nenhum dos tratamentos sob as variáveis espessura da epiderme superior (EES), espessura da epiderme inferior (EEI), densidade de venação (DV) e densidade estomática (DE).

**Tabela 4.** Densidade de venação (DV), espessura da epiderme superior (EES), espessura da epiderme inferior (EEI), espessura do limbo foliar (LF), espaço intercelular (EI), espessura do parênquima paliçádico (PP), espessura do parênquima lacunoso (PL), razão PP/PL, e densidade estomática (DE).

<i>Experimento 1</i>				<i>Experimento 2</i>			
DV (mm cm <sup>-2</sup> )				DV (mm cm <sup>-2</sup> )			
	S+	S-	média		S+	S-	média
Ca+	13,04±1,05	11,49±0,95	12,26±1,25A	Ca+	13,75±0,32	12,98±1,37	13,37±1,01A
Ca-	12,89±1,78	12,50±0,51	12,70±1,25A	Ca-	13,89±1,19	13,34±0,55	13,62±0,91A
média	12,96±1,38a	12,0±0,90a		média	13,82±0,81a	13,16±0,98a	
EES (µm)				EES (µm)			
	S+	S-	média		S+	S-	média
Ca+	16,64±1,17	18,14±1,97	17,39±1,72A	Ca+	14,92±2,92	18,06±0,65	16,49±2,58A
Ca-	17,91±2,10	16,38±1,51	17,15±1,90A	Ca-	16,88±1,01	16,43±1,55	16,66±1,23A
média	17,27±1,74a	17,26±1,89a		média	15,9±2,28a	17,25±1,4a	
EEI (µm)				EEI (µm)			
	S+	S-	média		S+	S-	média
Ca+	11,08±0,82	12,64±0,87	11,86±1,14A	Ca+	9,24±1,49Ab	12,14±0,58Aa	10,69±1,87
Ca-	12,37±1,29	12,29±1,31	12,33±1,23A	Ca-	11,27±1,37Aa	10,85±1,40Aa	11,06±1,3
média	11,73±1,23a	12,46±1,07a		média	10,25±1,71	11,49±1,21	
LF (µm)				LF (µm)			
	S+	S-	média		S+	S-	média
Ca+	258,6±31,22	350,87±51,5	304,73±63B	Ca+	278,44±22,13	368,35±8,42	323,39±50,5A
Ca-	308,73±22,70	379,11±37,4	343,9±47,2A	Ca-	312,32±38,36	374,37±25,84	343,35±45A
média	283,6±36,88b	364,9±45,03a		média	295,38±34,18b	371,36±18a	
EI (%)				EI (%)			
	S+	S-	média		S+	S-	média

Ca+	26±3,27Aa	22,19±2,85Ab	24,09±3,35	Ca+	18,95±1,62	24,66±4,18	21,8±4,24A
Ca-	15,48±1,26Bb	19,89±5,51Aa	17,68±2,57	Ca-	11,22±3,48	16,03±2,28	13,62±3,5B
média	20,74±5,1	21,04±3,9		média	15,08±4,84b	20,34±5,57a	
PP (µm)				PP (µm)			
	S+	S-	média		S+	S-	média
Ca+	85,28±7,21	91,25±8,13	88,26±7,89B	Ca+	82,96±6,74	92,63±7,58	87,79±8,41B
Ca-	107,48±12,97	105,71±14	106,6±12,7A	Ca-	105,34±26,44	101,63±8,91	103,49±18,7A
média	96,38±15,3a	98,48±13,2a		média	94,15±21,49a	97,13±9,05a	
PL (µm)				PL (µm)			
	S+	S-	média		S+	S-	média
Ca+	155,72±26,1	229,98±43,79	192,8±51,8A	Ca+	175,17±19,17	251,76±7,01	213,47±4A
Ca-	184,98±29,52	245,35±37,72	215,16±45A	Ca-	185,68±9,43	247,77±26,7	216,73±3A
média	170,35±30,4b	237,66±39,37a		média	180,43±15,07b	249,7±18,2a	
Razão PP/PL				Razão PP/PL			
	S+	S-	média		S+	S-	média
Ca+	0,56±0,07	0,40±0,06	0,48±0,1A	Ca+	0,47±0,05	0,36±0,03	0,42±0,07A
Ca-	0,60±0,13	0,44±0,09	0,52±0,13A	Ca-	0,56±0,11	0,41±0,06	0,48±0,11A
média	0,58±0,10a	0,42±0,07b		média	0,52±0,09a	0,39±0,05b	
DE (n° mm <sup>-2</sup> )				DE (n° mm <sup>-2</sup> )			
	S+	S-	média		S+	S-	média
Ca+	217,39±16,4	220,86±22,3	219,1±18,5A	Ca+	219,55±33,66	223,61±65,15	221,58±48A
Ca-	215±18	200,57±38,6	207,8±29,3A	Ca-	195,51±36,24	216,94±52,16	206,22±43A
média	216,20±16,3a	210,71±31,6a		média	207,53±34,8a	220,27±54,7a	

Tratamentos com letras minúsculas iguais nas linhas e maiúsculas iguais na coluna não diferem entre si de acordo com o teste F (P <0,05).



**Figura 4.** Avaliação de características foliares de plantas de eucalipto suplementadas com Ca e S. Seção transversal do limbo foliar de plantas de eucalipto, submetidas aos tratamentos +Ca+S (a); +Ca-S (B); -Ca+S (C) e -Ca-S (d). Ep.s: epiderme superior; Ep.i: epiderme inferior; Pp: parênquima paliçádico; Pl: parênquima lacunoso; Ei: espaço intercelular. Escala = 100  $\mu$ m.

### 3.7 O enxofre aumenta o diâmetro e reduz o número de vasos no pecíolo das plantas

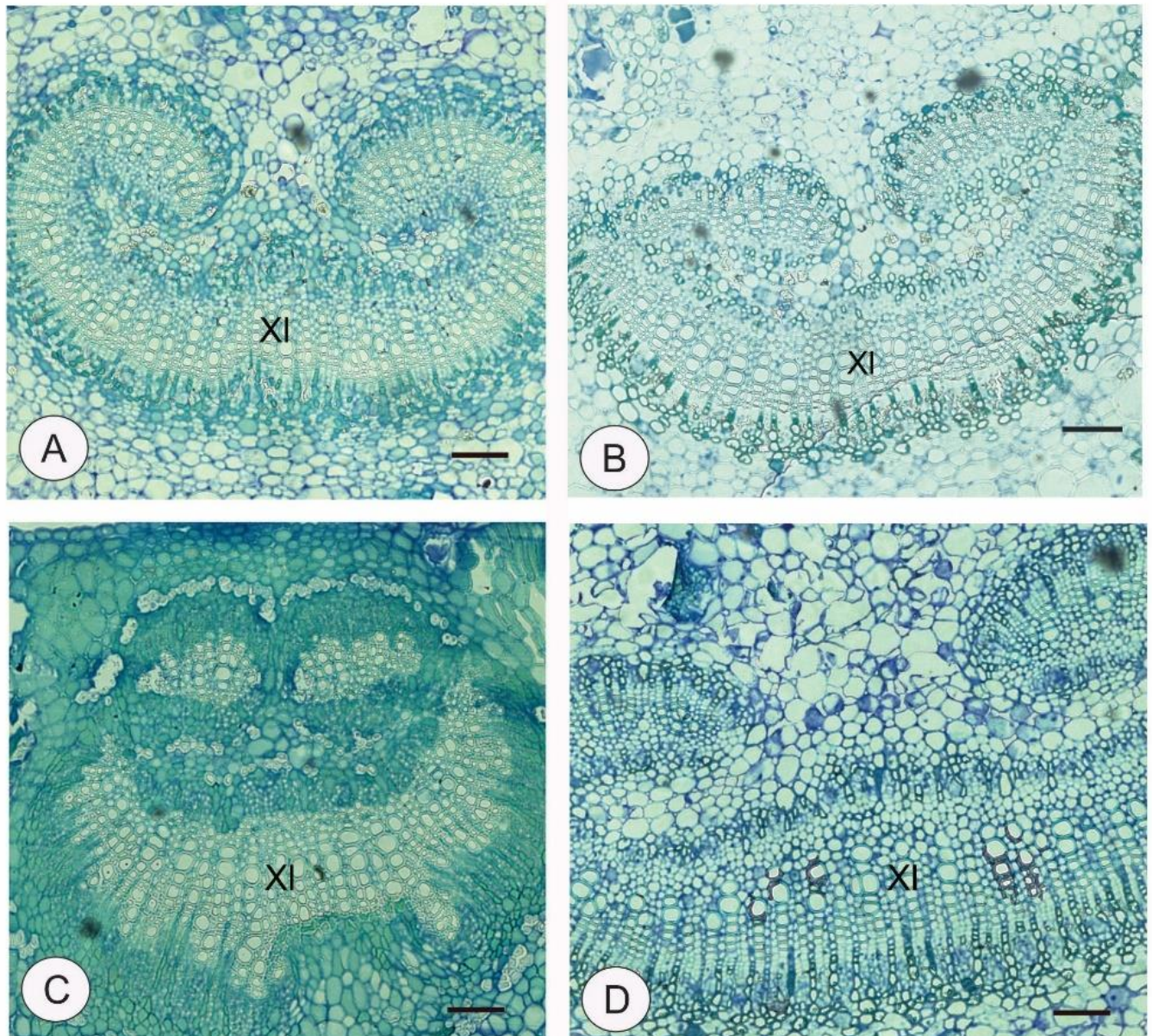
Analisando outras características anatômicas, cujos dados estão representados na Tabela 5 (quantitativos) e Figura 5 (qualitativos), percebemos que plantas com S aumentaram em 32% o diâmetro médio de seus condutos xilemáticos do pecíolo (Dh\_médio) e reduziram em 48% o número de vasos do xilema do pecíolo (NV), quando comparadas com plantas que não receberam o nutriente (Tabela 5).

Não houve diferença estatística para nenhum dos tratamentos sob as variáveis: razão entre a espessura da parede do xilema (t) e o diâmetro do lúmen do xilema (b) do pecíolo  $T/b^2(10^{-3})$  e diâmetro máximo dos condutos do xilema do pecíolo (Dh\_máximo) (Tabela 5). A presença ou ausência de Ca também não influenciou significativamente as variáveis Dh\_médio e NV.

**Tabela 5.** Razão entre a espessura da parede do xilema (t) e o diâmetro do lúmen do xilema (b) do pecíolo  $[(t/b)^2]$ , diâmetro médio dos condutos do xilema do pecíolo (Dh\_médio), diâmetro máximo dos condutos do xilema do pecíolo (Dh\_máximo) e número de vasos do xilema do pecíolo (NV).

<i>Experimento 1</i>				<i>Experimento 2</i>			
T/b <sup>2</sup> x (10 <sup>-3</sup> )				T/b <sup>2</sup> x (10 <sup>-3</sup> )			
	S+	S-	média		S+	S-	média
Ca+	10,24±3,87	9,41±1,09	9,82±2,72A	Ca+	11,42±1,71	9,55±2,86	10,48±2,4A
Ca-	7,76±1,91	9,17±1,98	8,46±1,98A	Ca-	7,78±0,6	8,21±3,06	7,99±2,05A
média	9,01±3,16a	9,28±1,51a		média	9,6±2,28a	8,88±2,83a	
Dh_médio (µm)				Dh_médio (µm)			
	S+	S-	média		S+	S-	média
Ca+	9,85±2,55	6,82±0,47	8,34±2,35A	Ca+	10,31±3,29	7,53±1,09	7,67±0,74A
Ca-	8,97±1,2	6,75±0,97	7,86±1,55A	Ca-	8,3±0,35	7,04±0,33	8,92±2,71A
média	9,41±1,94a	6,79±0,72b		média	9,3±2,41a	7,29±0,79b	
Dh_máximo (µm)				Dh_máximo (µm)			
	S+	S-	média		S+	S-	média
Ca+	19,5±3,42	19,07±2,14	19,28±2,69A	Ca+	22,44±7,69	17,64±0,94	20,04±5,68A
Ca-	19,11±2	18,12±2,51	18,61±2,2A	Ca-	18,74±3,2	17,4±2,14	18,07±2,62A
média	19,3±2,65a	18,6±2,25a		média	20,59±5,8a	17,52±1,53a	
NV				NV			
	S+	S-	média		S+	S-	média
Ca+	280,25±50,7	393,8±62,5	337,02±80,4A	Ca+	261,25±71,31	367±133,1	314,1±113,8A
Ca-	239,6±85,8	376,3±70,6	307,9±103,3A	Ca-	216,92±51,66	346,8±120,9	281,8±110,6A
média	259,9±69,8b	385,02±63,6a		média	239,08±62,32b	356,87±118,2	

Tratamentos com letras minúsculas iguais nas linhas e maiúsculas iguais na coluna não diferem entre si de acordo com o teste F (P < 0,05).



**Figura 5.** Corte transversal da folha de eucalipto com detalhe na região da nervura central, submetidos aos tratamentos +Ca+S (a); +Ca-S (B); -Ca+S (C) e -Ca-S (d). Xi: xilema. Escala de A a D: 50 $\mu$ m.

### 3.8 O enxofre aumenta a taxa fotossintética das plantas

Plantas com S apresentaram maior taxa fotossintética ( $13 \pm 2,8 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ), quando comparadas com plantas que não receberam o nutriente ( $6,7 \pm 2,1 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ), o que representa um aumento de 94 % – dados referentes às medições nas quais não houveram interação entre os tratamentos – (Tabela 6).

Em alguns períodos de avaliação (114, 148 e 258 DAP – experimento 1; 207 DAP – experimento 2), plantas sob ausência de Ca, apresentaram maiores valores de A ( $11,82 \pm 4,0 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ), quando comparadas com plantas que receberam a fertilização com o

nutriente ( $8,42 \pm 3,5 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ), representando um aumento de 40 % – dados referentes às medições nas quais não houveram interação entre os tratamentos – (Tabela 6).

**Tabela 6.** Fotossíntese - A ( $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ) das folhas de eucalipto em diferentes dias após o plantio (DAP). Os dados são média  $\pm$  EP (n = 5 para experimento 1 e n = 4 para experimento 2).

<i>Experimento 1</i>				<i>Experimento 2</i>			
114 DAP				115 DAP			
	S+	S-	média		S+	S-	média
Ca+	10,98 $\pm$ 2,46	4,64 $\pm$ 0,74	7,81 $\pm$ 3,57B	Ca+	10,44 $\pm$ 2,82	4,75 $\pm$ 0,82	7,6 $\pm$ 3,6A
Ca-	12,47 $\pm$ 2,18	9,63 $\pm$ 1,17	11,06 $\pm$ 2,22A	Ca-	10,7 $\pm$ 1,15	4,45 $\pm$ 2,56	7,57 $\pm$ 3,8A
média	11,73 $\pm$ 2,32a	7,14 $\pm$ 2,78b		média	10,57 $\pm$ 1,99a	4,6 $\pm$ 1,76b	
148 DAP				171 DAP			
	S+	S-	média		S+	S-	média
Ca+	14,75 $\pm$ 2,26	6,16 $\pm$ 2,72	10,46 $\pm$ 5,1B	Ca+	16,43 $\pm$ 2,47	6,56 $\pm$ 1,74	11,49 $\pm$ 5,63A
Ca-	18,49 $\pm$ 3,1	9,09 $\pm$ 1,1	13,79 $\pm$ 5,41A	Ca-	13,26 $\pm$ 1,69	7,81 $\pm$ 4,01	10,54 $\pm$ 4,07A
média	16,62 $\pm$ 3,22a	7,62 $\pm$ 2,5b		média	14,85 $\pm$ 2,58a	7,19 $\pm$ 2,9b	
184 DAP				207 DAP			
	S+	S-	média		S+	S-	média
Ca+	16,29 $\pm$ 1,65Ba	5,12 $\pm$ 1,23Ab	10,71 $\pm$ 6,04	Ca+	10,51 $\pm$ 2,71	5,41 $\pm$ 1,66	7,96 $\pm$ 3,42B
Ca-	20,64 $\pm$ 2,31Aa	5,45 $\pm$ 0,37Ab	13,04 $\pm$ 8,15	Ca-	15,16 $\pm$ 2	7,17 $\pm$ 1,35	11,72 $\pm$ 4,55A
média	18,47 $\pm$ 2,97	5,29 $\pm$ 0,87		média	12,84 $\pm$ 3,32a	6,84 $\pm$ 1,7b	
258 DAP				242 DAP			
	S+	S-	média		S+	S-	média
Ca+	9,26 $\pm$ 1,35	5,71 $\pm$ 0,34	7,46 $\pm$ 2,08B	Ca+	11,24 $\pm$ 0,73Aa	2,8 $\pm$ 0,62Ab	7,02 $\pm$ 4,55
Ca-	13,52 $\pm$ 3,68	7,94 $\pm$ 0,28	10,73 $\pm$ 3,83A	Ca-	8,56 $\pm$ 2,21Ba	4,79 $\pm$ 1,68Ab	6,68 $\pm$ 2,71
média	11,39 $\pm$ 3,44a	6,83 $\pm$ 1,21b		média	9,9 $\pm$ 2,09	3,8 $\pm$ 1,58	

Letras diferentes maiúsculas na coluna e minúsculas na linha representam diferenças de acordo com o teste F (P < 0,05).

Plantas com S reduziram sua concentração de  $C_i$  ( $308,09 \pm 22,4 \text{ mol CO}_2 \text{ mol}^{-1} \text{ ar}$ ), quando comparadas com plantas que não receberam fertilização com o nutriente ( $365,56 \pm 10,2 \text{ mol CO}_2 \text{ mol}^{-1} \text{ ar}$ ), o que representa uma redução de 19% – dados referentes as medições onde não houve interação entre os tratamentos – (Tabela 7). Plantas com ou sem Ca não apresentaram diferença estatística para esta variável (Tabela 7).

**Tabela 7.** Concentração interna de  $\text{CO}_2$  -  $C_i$  ( $\text{mol CO}_2 \text{ mol}^{-1} \text{ ar}$ ) em diferentes dias após o plantio (DAP). Os dados são média  $\pm$  EP (n = 5 para experimento 1 e n = 4 para experimento 2).

<i>Experimento 1</i>				<i>Experimento 2</i>			
114 DAP				115 DAP			
	S+	S-	média		S+	S-	média
Ca+	308,3 $\pm$ 40Ab	353,6 $\pm$ 20,3Aa	330,9 $\pm$ 38,06	Ca+	303,04 $\pm$ 6,76	355,65 $\pm$ 9,29	329,3 $\pm$ 29,1A
Ca-	315,6 $\pm$ 27Ab	329,3 $\pm$ 33,5Ba	322,45 $\pm$ 29,6	Ca-	281,5 $\pm$ 18,38	349,17 $\pm$ 11,2	315,3 $\pm$ 38,8B
média	311,96 $\pm$ 32,2	341,47 $\pm$ 29,1		média	292,2 $\pm$ 17,2b	352,4 $\pm$ 10,1a	
148 DAP				171 DAP			
	S+	S-	média		S+	S-	média
Ca+	248,9 $\pm$ 53Bb	363,5 $\pm$ 11,9Aa	306,19 $\pm$ 70,4	Ca+	303,06 $\pm$ 20,6	364,68 $\pm$ 7,25	333,87 $\pm$ 36A
Ca-	311,4 $\pm$ 7,7Aa	347,9 $\pm$ 8,61Aa	322,45 $\pm$ 29,6	Ca-	216,34 $\pm$ 12,9	353,87 $\pm$ 5,78	335,1 $\pm$ 22,1A
média	280,17 $\pm$ 48,5	355,69 $\pm$ 12,8		média	309,7 $\pm$ 17,4b	359,2 $\pm$ 8,38a	

184 DAP				207 DAP			
	S+	S-	média		S+	S-	média
Ca+	325,71±4,75	369,4±6,86	347,55±23A	Ca+	300,62±20,2	376,43±5,1	338,52±47A
Ca-	310,17±10,7	362±10,31	336,08±29B	Ca-	314,73±20,5	360,4±7,25	337,56±28A
média	317,9±11,3b	365,7±9,1a		média	307,7±20,3b	368,4±10,3a	
258 DAP				242 DAP			
	S+	S-	média		S+	S-	média
Ca+	313,66±28,4	372,7±2,5	343,1±36,4A	Ca+	295,66±23	388,87±9,3	342,26±52A
Ca-	316,31±39	367,62±7,3	341,9±37,8A	Ca-	315,81±47,7	366,17±17	340,9±42,7A
média	315±32,2b	370,2±5,8a		média	305,72±36,3b	377,5±17,5a	

Letras diferentes maiúsculas na coluna e minúsculas na linha representam diferenças de acordo com o teste F ( $P < 0,05$ ).

De maneira geral, não houve diferença estatística entre os tratamentos para a variável  $g_s$  (Tabela 8) e  $E$  (Tabela 9).

**Tabela 8.** Condutância estomática -  $g_s$  (mol H<sub>2</sub>O m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>) em diferentes dias após o plantio (DAP). Os dados são média ± EP (n = 5 para experimento 1 e n = 4 para experimento 2).

<i>Experimento 1</i>				<i>Experimento 2</i>			
114 DAP				115 DAP			
	S+	S-	média		S+	S-	média
Ca+	0,31±0,16	0,3±0,13	0,31±0,31A	Ca+	0,21±0,05	0,31±0,14	0,26±0,1A
Ca-	0,34±0,14	0,43±0,18	0,38±0,15A	Ca-	0,17±0,06	0,27±0,11	0,22±0,09A
média	0,32±0,14a	0,36±0,15a		média	0,2±0,05a	0,29±0,11a	
148 DAP				171 DAP			
	S+	S-	média		S+	S-	média
Ca+	0,21±0,23	0,44±0,03	0,32±0,19A	Ca+	0,4±0,11	0,48±0,05	0,44±0,08A
Ca-	0,49±0,13	0,47±0,12	0,47±0,11A	Ca-	0,35±0,09	0,4±0,16	0,37±0,12A
média	0,35±0,23a	0,45±0,08a		média	0,37±0,09a	0,43±0,12a	
184 DAP				207 DAP			
	S+	S-	média		S+	S-	média
Ca+	0,47±0,06	0,44±0,05	0,46±0,05A	Ca+	0,22±0,1Ba	0,48±0,06Aa	0,35±0,15
Ca-	0,5±0,07	0,44±0,11	0,47±0,08A	Ca-	0,38±0,14Ab	0,44±0,06Aa	0,44±0,09
média	0,49±0,05a	0,44±0,07a		média	0,31±0,14	0,46±0,006	
258 DAP				242 DAP			
	S+	S-	média		S+	S-	média
Ca+	0,25±0,1	0,68±0,06	0,47±0,24A	Ca+	0,2±0,06	0,46±0,23	0,32±0,2A
Ca-	0,3±0,04	0,66±0,12	0,48±0,2A	Ca-	0,24±0,16	0,4±0,17	0,33±0,17A
média	0,27±0,08b	0,67±0,08a		média	0,22±0,11a	0,42±0,19a	

Letras diferentes maiúsculas na coluna e minúsculas na linha representam diferenças de acordo com o teste F ( $P < 0,05$ ).

**Tabela 9.** Transpiração -  $E$  (mmol H<sub>2</sub>O m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>) em diferentes dias após o plantio (DAP). Os dados são média ± EP (n = 5 para experimento 1 e n = 4 para experimento 2).

<i>Experimento 1</i>				<i>Experimento 2</i>			
114 DAP				115 DAP			
	S+	S-	média		S+	S-	média
Ca+	4,68±0,92	4,74±0,73	4,71±0,78A	Ca+	3,97±0,97	4,9±2,14	4,43±1,61A
Ca-	6,14±1,61	5,45±2,11	5,79±2,38A	Ca-	3,65±1,18	4,55±0,89	4,1±1,07A
média	5,41±1,45a	5,09±1,53a		média	3,8±1,01a	4,72±1,52a	

148 DAP				171 DAP			
	S+	S-	média		S+	S-	média
Ca+	2,68±2,39Bb	4,91±0,68Aa	3,79±2,03	Ca+	3,71±0,7	4,1±0,28	3,91±0,53A
Ca-	5,41±0,86Aa	5,17±0,93Aa	5,29±0,85	Ca-	3,43±0,53	3,63±1	3,53±0,74A
média	4,05±2,22	5,04±0,77		média	3,57±0,59a	3,86±0,72a	
184 DAP				207 DAP			
	S+	S-	média		S+	S-	média
Ca+	5,31±0,99	5,1±0,83	5,2±0,86A	Ca+	2,14±0,86	3,7±0,71	2,92±1,1A
Ca-	5,57±1,03	5,3±1,24	5,44±1,08A	Ca-	3,34±1,06	3,66±0,55	3,5±0,8A
média	5,44±0,96a	5,2±0,99a		média	2,74±1,1b	3,68±0,58a	
258 DAP				242 DAP			
	S+	S-	média		S+	S-	média
Ca+	3,26±0,8	6,49±1,96	4,84±2,21A	Ca+	2,18±0,15	3,12±1,23	2,65±0,95A
Ca-	4,44±0,83	6,85±1,38	5,64±1,66A	Ca-	2,13±0,93	3,22±0,47	2,66±0,89A
média	3,85±0,98b	6,67±1,61a		média	2,15±0,61b	3,17±0,86a	

Letras diferentes maiúsculas na coluna e minúsculas na linha representam diferenças de acordo com o teste F ( $P < 0,05$ ).

Plantas com S obtiveram uma eficiência no uso da água (EUA) 55% maior quando comparadas às plantas que não receberam o nutriente – dados referentes as medições onde não houve interação entre os tratamentos – (Tabela 10), e o Ca não influenciou esta variável (Tabela 10).

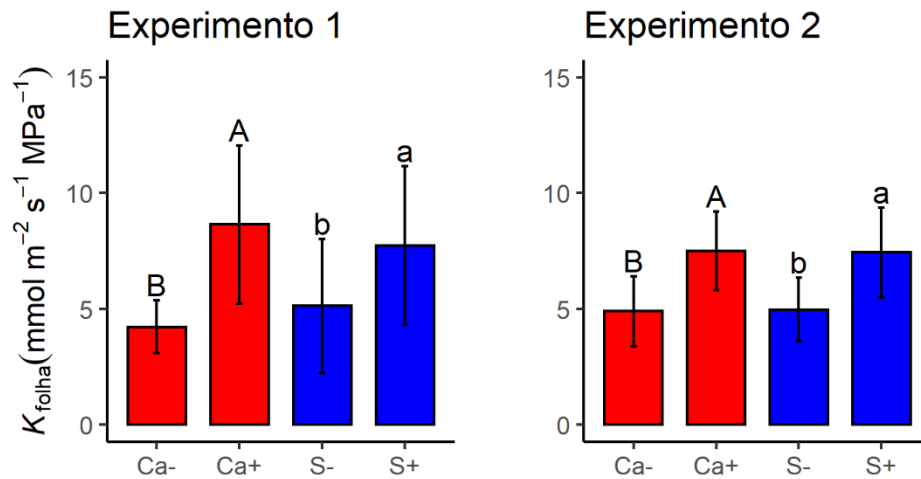
**Tabela 10.** Eficiência no uso da água (EUA) ( $\mu\text{mol CO}_2 \text{ mol}^{-1} \text{ H}_2\text{O}$ ) em diferentes dias após o plantio (DAP). Os dados são média  $\pm$  EP ( $n = 5$  para experimento 1 e  $n = 4$  para experimento 2).

<i>Experimento 1</i>				<i>Experimento 2</i>			
114 DAP				115 DAP			
	S+	S-	média		S+	S-	média
Ca+	43,77±23,03	18,28±9	31,1±21,3A	Ca+	49,03±4,53	17,61±6,1	33,3±17,5A
Ca-	40,7±13,28	26,9±13,6	33,8±14,6A	Ca-	68,67±20,54	16,53±6,24	42,6±32,2A
média	42,25±17,8a	22,6±12b		média	58,85±17,3a	17,07±5,7b	
148 DAP				171 DAP			
	S+	S-	média		S+	S-	média
Ca+	56,12±18,5Aa	13,89±5,8Ab	35±25,76	Ca+	43,6±11,8	13,82±3,64	28,7±17,8A
Ca-	38,97±5,6Ba	21,21±4,8Ab	30,09±10,6	Ca-	40±8,51	19,57±1,67	29,8±12,3A
média	47,5±15,78	17,5±6,39		média	41,8±9,75a	16,7±4,04b	
184 DAP				207 DAP			
	S+	S-	média		S+	S-	média
Ca+	34,662±4,13	11,65±2,9	23,14±12,6A	Ca+	52,7±16,3	11,14±0,71	31,9±24,7A
Ca-	42,07±6,12	12,91±2,8	27,49±16A	Ca-	42,52±14,4	16,8±4,71	29,7±16,9A
média	38,35±6,3a	12,28±1b		média	47,61±15,3a	13,97±4,6b	
258 DAP				242 DAP			
	S+	S-	média		S+	S-	média
Ca+	42,73±18,9	8,46±1,04	25,6±22,04A	Ca+	60,44±22,8	4,84±0,96	32,6±30,2A
Ca-	47±19,12	12,36±1,9	29,68±22,3A	Ca-	52,37±32,6	14,49±9,35	33,4±30A
média	44,86±18,07a	10,4±2,5b		média	56,4±26,46a	9,66±8,02b	

Letras diferentes maiúsculas na coluna e minúsculas na linha representam diferenças de acordo com o teste F ( $P < 0,05$ ).

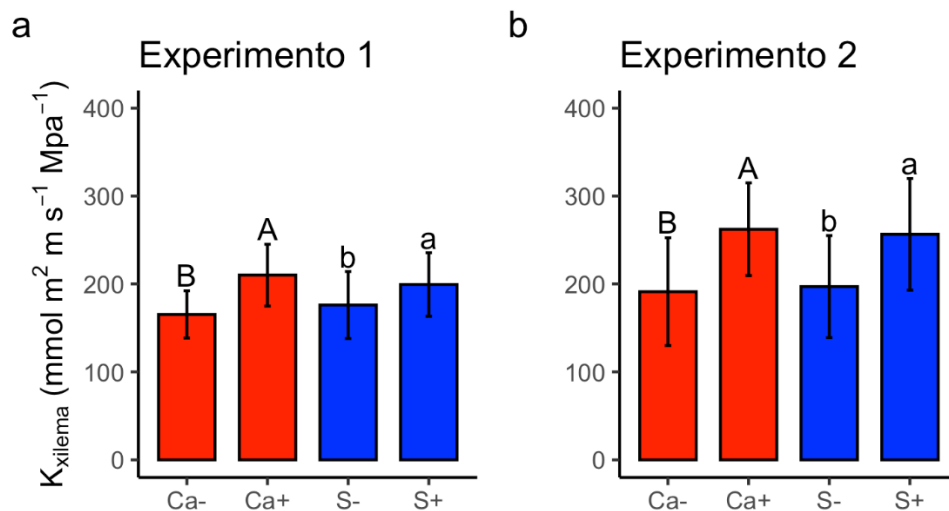
### 3.9 Cálcio e enxofre aumentam a condutância hidráulica foliar e condutividade xilemática das plantas de eucalipto

Maiores valores de  $K_{\text{folha}}$  foram observados em tratamentos com Ca e S. Plantas adubadas com S e Ca aumentaram, respectivamente, 50% e 77% sua condutância hidráulica das folhas (Figura 6).



**Figura 6.** Condutância hidráulica de folhas de Eucalipto na presença ou não de Ca e S. Letras maiúsculas denotam diferença significativa entre os tratamentos que receberam ou não o elemento Ca e letras minúsculas denotam diferença estatística entre tratamentos que receberam ou não o elemento S de acordo com o teste F ( $P < 0,05$ ). Os dados são média  $\pm$  EP ( $n = 5$  para experimento 1 e  $n = 4$  para experimento 2).

Semelhante ao observado para  $K_{\text{folha}}$ , embora em menor magnitude, o  $K_{\text{xilema}}$  também foi favorecido pela presença de ambos nutrientes. Plantas com S aumentaram em 22% seu  $K_{\text{xilema}}$  (Figura 7), enquanto que plantas com Ca aumentaram em 32% (Figura 7).



**Figura 7.** Condutividade hidráulica do xilema de Eucalipto na presença ou não de Ca e S. Letras maiúsculas denotam diferença significativa entre os tratamentos que receberam ou não o elemento Ca e letras minúsculas denotam diferença estatística entre tratamentos que receberam ou não o elemento S de acordo com o teste F ( $P < 0,05$ ). Os dados são média  $\pm$  EP ( $n = 5$  para experimento 1 e  $n = 4$  para experimento 2).

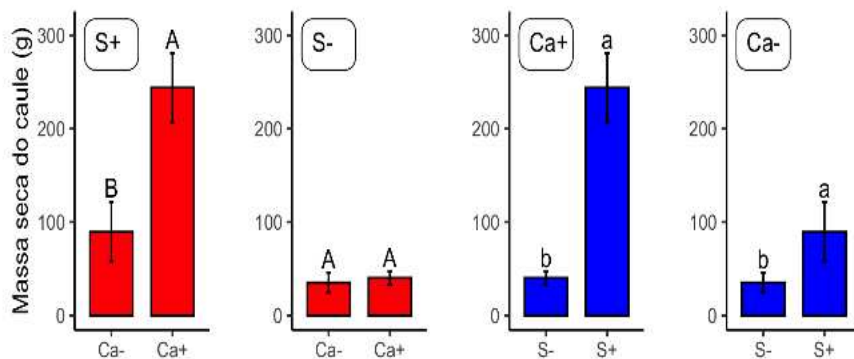
A fertilização com ambos nutrientes (Ca e S) contribuiu para aumentos na massa seca do caule (MSC) das plantas de eucalipto (Figura 8).

Plantas com S e Ca, elevaram em 111% sua MSC, quando comparadas às plantas com S e ausência de Ca (Figura 8).

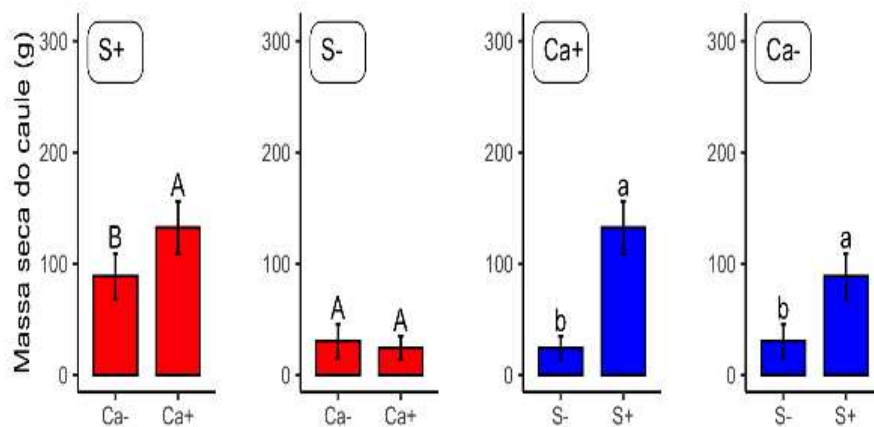
Plantas com Ca e S, elevaram em 482% sua MSC, quando comparadas com plantas com Ca e ausência de S (Figura 8).

Na ausência do Ca, a fertilização com S contribuiu para aumentar em 170% a MSC das plantas de eucalipto. Todos os resultados citados de MSC são médias de ambos experimentos.

#### Experimento 1



#### Experimento 2



**Figura 8.** Massa seca do caule de Eucalipto na presença ou não de Ca e S. Letras maiúsculas denotam diferença significativa entre os tratamentos que receberam ou não o elemento Ca e letras minúsculas denotam diferença estatística entre tratamentos que receberam ou não o elemento S de acordo com o teste F ( $P < 0,05$ ). Os dados são média  $\pm$  EP ( $n = 5$  para experimento 1 e  $n = 4$  para experimento 2).

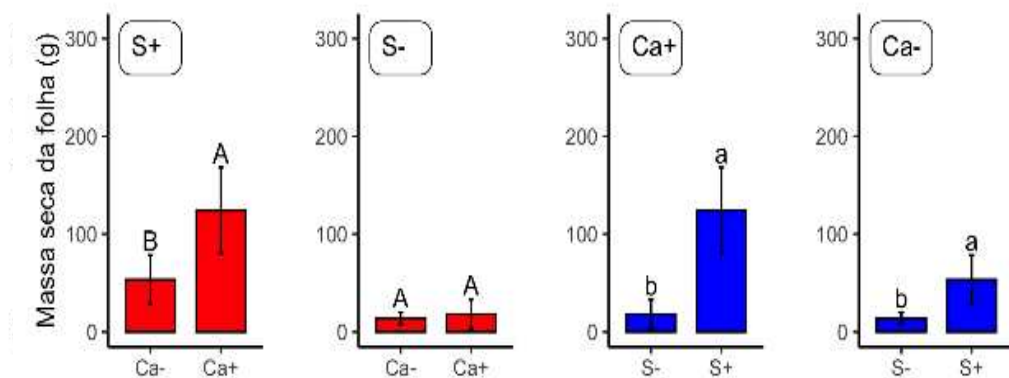
Assim como foi observado para MSC, ambos nutrientes (Ca e S) contribuíram para aumentos significativos na massa seca da folha (MSF) das plantas de eucalipto (Figura 9).

Plantas com S e Ca, elevaram em 287% sua MSF, quando comparadas às plantas com S e ausência de Ca (Figura 9).

Plantas com S e Ca aumentaram em 1.176% sua MSF, quando comparado às plantas com Ca e ausência de S (Figura 9).

Fato interessante é que a omissão do Ca ou S, independente da presença do complementar, não promoveu alterações significativas na MSF (Figura 9). Todos os resultados citados de MSF são médias dos dois experimentos avaliados.

#### Experimento 2



**Figura 9.** Massa seca da folha de Eucalipto na presença ou não de Ca e S. Letras maiúsculas denotam diferença significativa entre os tratamentos que receberam ou não o elemento Ca e letras minúsculas denotam diferença estatística entre tratamentos que receberam ou não o elemento S de acordo com o teste F ( $P < 0,05$ ). Os dados são média  $\pm$  EP ( $n = 5$  para experimento 1 e  $n = 4$  para experimento 2).

## 4. DISCUSSÃO

Neste trabalho avaliou-se o efeito da omissão de Ca e S sobre a condutância hidráulica e vulnerabilidade à cavitação em plantas de eucalipto. A omissão desses nutrientes e consequente redução de sua absorção alterou fortemente o sistema hidráulico das plantas e, consequentemente, o transporte de água e nutrientes.

### 4.1 Atributos de relações hídricas postergam a ocorrência de embolismo em plantas de eucalipto.

Plantas com S apresentaram valores positivos de  $MSH_{50}$  (Tabela 2) e na ausência desse nutriente, as plantas apresentaram valores negativos de  $MSH_{50}$  (Tabela 2). O  $P_{50}$  é uma medida do  $\Psi_w$  no qual 50% dos vasos condutores da planta, e nesse caso, condutos foliares, perdem sua capacidade de transporte de água devido a ocorrência de eventos de embolismo (BLACKMAN; BRODRIBB; JORDAN, 2010; CHOAT et al., 2012). A  $MSH_{50}$  refere-se a diferença entre o  $\Psi_w$  no qual os estômatos começam a fechar para evitar a perda excessiva de água ( $\Psi_{PPT}$ ) e o  $\Psi_w$  do  $P_{50}$  (CHOAT et al., 2012). Uma  $MSH_{50}$  positiva indica que houve maior fechamento estomático antes do  $P_{50}$ , o que garante maior capacidade de proteção contra o embolismo no xilema (MARTIN-STPAUL; DELZON; COCHARD, 2017). Por outro lado, uma  $MSH_{50}$  negativa indica baixa capacidade de controle estomático em resposta ao estresse hídrico (OLIVEIRA et al., 2023). No entanto, há relatos de que várias espécies podem operar com margens de segurança negativas, o que indica uma predisposição a altos níveis de embolia (JOHNSON et al., 2011; TAN et al., 2020).

O  $P_{50}$  foliar encontrado neste estudo para plantas adubadas com +S +Ca, bem como +S -Ca (Tabela 2) foi muito semelhante aos valores de  $P_{50}$  (-3,4 a -4,1 MPa) de *E. camaldulensis* relatados em outros trabalhos (PEREIRA et al., 2016; ZEPPEL MJB, 2019) bem como, semelhantes também ao valor de  $P_{50}$  (-3,35 Mpa) (*E. grandis* x *E. urophylla*) relatado por Oliveira et al. (2022). Esses dados corroboram com evidências anteriores de que o fechamento estomático posterga as perdas de condutividade hidráulica que podem levar as plantas à morte (CHOAT et al., 2012; MARTIN-STPAUL; DELZON; COCHARD, 2017), e, no caso deste trabalho, essa característica foi mais evidente na presença de S.

O  $P_{50}$  encontrado em plantas com -S +Ca e -S -Ca (Tabela 2), está muito abaixo dos valores de  $P_{50}$  encontrados em uma série de espécies lenhosas (CARDOSO; BATZ; MCADAM, 2020; LAMARQUE et al., 2018; OLIVEIRA et al., 2022; RODRIGUEZ-DOMINGUEZ et al., 2018) reforçando a ideia de que na ausência de S, a fertilização com Ca

não contribuiu significativamente para a garantia de uma boa  $MSH_{50}$ , o que poderia dificultar a sobrevivência dessas plantas em ambientes com limitação hídrica.

Até o momento, são raros os trabalhos que abordam a relação entre fertilização e segurança hidráulica das plantas, e, por conseguinte, sua capacidade de sobrevivência em ambientes com limitada disponibilidade hídrica. Estudos frequentemente investigam a margem de segurança hidráulica entre diferentes espécies (HAJEK et al., 2022; MEINZER et al., 2009) ou fazem a comparação entre coníferas x angiospermas (JOHNSON et al., 2012, 2016; YAN et al., 2020). Portanto, este trabalho contribui para melhoria do entendimento do efeito de nutrientes sobre  $MSH_{50}$ .

O enxofre exerce diversas funções essenciais no crescimento das plantas. Sua contribuição para garantir uma alta  $MSH_{50}$  deve estar principalmente relacionada à sua participação na produção de compostos que aumentam a integridade dos tecidos vegetais. Ele é responsável pela síntese de compostos antioxidantes, como glutatona e ácido ascórbico, que ajudam a proteger as células vegetais contra os danos causados pelos radicais livres (AHANGER; AHMAD, 2019). Vale destacar, que ao preservar a integridade das células, esses compostos auxiliam indiretamente para manter o fluxo de água nos condutos xilemáticos.

O S também é um constituinte de aminoácidos sulfurados, como a cisteína e a metionina, que são fundamentais na síntese de proteínas estruturais (VITTI; OTTO; SAVIETO, 2015). Essas proteínas desempenham um papel crucial na formação e manutenção da estrutura das células e tecidos vegetais, incluindo os elementos do xilema responsáveis pelo transporte de água (ESTELA et al., 2016).

Outros mecanismos desenvolvidos por plantas com S que podem ter contribuído para prevenção de danos em seu sistema hidráulico foi a redução de 35% da elasticidade de sua parede celular (alto  $\epsilon$ ) e consequentemente, a redução de 32% do seu potencial osmótico ( $\Psi_{100}$ ), (Tabela 3). Uma das estratégias que as plantas encontram para lidar com a escassez atípica de água a nível celular é reduzir  $\Psi_{PPT}$  – resultado também citado anteriormente – através do acúmulo de compostos osmoticamente ativos na célula ou redução da elasticidade das paredes celulares para manter o turgor (YAN; XINGHUI; WEIMIN, 2001).

De modo geral, a redução da elasticidade da parede celular está associada ao ajuste osmótico, que envolve o acúmulo de solutos na célula em resposta a quedas no potencial hídrico celular (MARÍN-DE LA ROSA et al., 2019). Como consequência, o potencial osmótico da célula reduz, atraindo solutos para o interior celular com objetivo de manter a pressão de turgor (BLUM, 2017; HESSINI et al., 2019). Portanto, podemos inferir que plantas com S obtiveram

maior produção desses compostos, contribuindo para um maior ajuste osmótico da planta. O ajuste osmótico mantém a condutância estomática e a fotossíntese em potenciais mais baixos, atrasa a senescência e morte das folhas, melhora o crescimento das raízes e aumenta absorção de água durante situações de déficit hídrico (TURNER, 1986).

Como mencionado anteriormente, provavelmente, plantas que não receberam S não fecharam seus estômatos antes do  $P_{50}$  (Tabela 2), apresentando uma  $MSH_{50}$  negativa (Tabela 2). No entanto, essas plantas ainda precisam investir em outras estratégias (que não o fechamento estomático) para postergar a ocorrência da cavitação e conseqüentemente, sua morte. Nossa hipótese é que suas estratégias de sobrevivência sejam baseadas em variações de amortecimento do  $\Psi_w$  através de uma alta capacitância foliar em pleno turgor ( $C_{PT}$ ) e alta capacitância foliar após perda de turgor ( $C_{APT}$ ). Plantas que não receberam a fertilização com S aumentaram em 105 e 88% sua  $C_{PT}$  e  $C_{APT}$ , respectivamente, quando comparadas com plantas que receberam a fertilização com o referido nutriente, aliado a isso, aumentaram em 90% seu CSA (Tabela 3). A capacitância representa a quantidade de água armazenada que uma planta pode liberar para seus tecidos em decorrência de determinada mudança de potencial hídrico (SPERRY et al., 2008; ZHANG F. P et al., 2018). Ela está envolvida na regulação do status e tamponamento hídrico (MATHENY et al., 2015; XIONG et al., 2017) retardando a diminuição do  $\Psi_w$  (XIONG et al., 2017) e auxiliando na tolerância à dessecação (HÖLTTÄ et al., 2009). Nesse sentido, em decorrência de uma alta capacitância, plantas que não receberam fertilização com S foram mais tamponadas e, portanto, perderam uma menor quantidade de água com as altas variações no  $\Psi_w$ , enquanto plantas com S perdem maiores quantidade de água.

A  $C_{PT}$  é altamente influenciada pela maior elasticidade da parede celular (HUO et al., 2022). Plantas sob ausência de S aumentaram em 35% a elasticidade de sua parede celular, o que explica a razão pela qual essas plantas apresentaram maior  $C_{PT}$ . Já a alta  $C_{APT}$  é influenciada pelo maior acúmulo de água celular (HUO et al., 2022). E nesse caso, podemos observar que plantas sob ausência de S aumentaram em 90% seu conteúdo saturado de água (CSA), o que também explica a maior  $C_{APT}$  dessas plantas.

Resultado parecido foi encontrado por Huo et al. (2022), que observaram que a maior capacidade hidráulica das espécies indica uma maior capacidade de armazenamento de água e um maior efeito de amortecimento durante períodos de seca.

#### *4.2 Efeito do cálcio e enxofre na espessura do parênquima lacunoso e paliçádico.*

A presença ou ausência de S não influenciou significativamente na espessura do parênquima paliçádico (PP) das plantas de eucalipto. No entanto, a ausência desse nutriente aumentou em 39% a espessura do parênquima lacunoso (PL) das plantas (Tabela 5).

O PL é menos denso quando comparado ao PP (BOSABALIDIS & KOFIDIS, 2002). Portanto, quando se tem uma maior proporção de PL nas plantas, diminui-se a concentração de PP. Essa maior proporção de PL nas plantas sob ausência de S, que pode ser observada na Tabela 4, contribuiu para reduzir a razão PP/PL em 3,75 vezes. O PP apresenta células altas com formato colunar e pouco espaço intercelular, o que possibilita a distribuição da luz mais eficientemente para o interior da folha. Em contrapartida, o PL tem por características células de formato irregular e maior presença de espaços intercelulares que absorvem com mais eficiência a luz difusa (FERREIRA et al., 2015). Plantas cultivadas na ausência de S também aumentaram a porcentagem de seus espaços intercelulares (Tabela 4).

A presença ou ausência de Ca não influenciou significativamente no PL das plantas de eucalipto, mas a ausência do nutriente, aumentou em 19% seu PP (Tabela 4), e, por ser mais denso, esse aumento na concentração de PP pode ter contribuído para aumentar a MFE das plantas (Tabela 3). A falta de Ca estimula a expansão celular devido ao aumento da fluidez da membrana celular (CHEBLI Y & GEITMANN A, 2017).

O Ca é um nutriente importante na manutenção da estabilidade da parede celular em função da sua associação com as substâncias pécticas, ligando-se covalentemente às pectinas (ácido poligalacturônico) (YAMAMOTO et al., 2011). A degradação da pectina pela ação enzimática da poligalacturonase (PG) e da pectinametilsterase (PME) é drasticamente inibida pelo Ca. A hidrólise de grupos metil éster, catalisada por essa enzima, produz uma pectina com menor grau de metilação (ligação com grupo metila), que sofre clivagem (desagregação) pela PG (MARSCHNER, 1995; SALUNKHE; BOLIN; REDDY, 1991).

#### *4.3 Efeito do cálcio e enxofre nas trocas gasosas das plantas*

Plantas adubadas com S aumentaram em 94% sua taxa fotossintética ( $A$ ) e em 55% sua eficiência no uso da água (EUA), quando comparadas às plantas que não receberam a fertilização com o nutriente (Tabela 6 e 10). Maior EUA significa que as plantas produziram maiores taxas fotossintéticas associado a baixa alteração de  $g_s$  e  $E$  (MA et al., 2004). Portanto, uma elevada EUA torna-se primordial para garantir um bom desempenho das plantas e passa a ser um indicativo para monitorar o estabelecimento das plantas no campo (FUNK &

VITOUSEK, 2007; LI; WU; YOU, 2008; SANTOS J. R; CARVALHO GONÇALVES; FELDPAUSCH, 2006). Nesse sentido, plantas com S teriam maiores condições de sobreviverem em um ambiente com limitada disponibilidade hídrica postergando a ocorrência de embolismos em seus condutos hidráulicos.

Em alguns períodos de avaliação, a omissão de Ca aumentou em 40% a A das plantas comparativamente àquelas que receberam o nutriente (Tabela 6). Por apresentar baixa mobilidade no floema, o Ca dificilmente é remobilizado dos tecidos velhos para os jovens. Portanto, os sintomas de deficiência associados a esse nutriente são geralmente observados nas folhas mais jovens (TANG & LUAN, 2017). As medições de taxa fotossintética foram realizadas em folhas do terço médio da copa, seguindo o padrão exercido em muitos trabalhos (AMARANTE et al., 2007; MEDEIROS, 2019).

Realizando novas mensurações da taxa fotossintética em plantas de eucalipto sob deficiência de Ca, percebemos que nas folhas do terço médio das plantas os resultados de A condizem com os observados neste trabalho. No entanto, ao medirmos a taxa fotossintética em folhas mais novas, mais deficientes em Ca, constatamos redução da taxa fotossintética das plantas (dados não apresentados), validando nossa hipótese.

#### *4.4 Efeito cálcio e enxofre no crescimento das plantas*

A presença de Ca e S contribuiu para aumentos significativos na massa seca do caule (MSC) e folha (MSF) das plantas de eucalipto (Figura 8 e 9, respectivamente). Esse aumento de matéria seca está relacionado com as diversas funções de ambos nutrientes no metabolismo vegetal. O S participa da síntese de aminoácidos, formação de vitaminas, enzimas e coenzimas (VITTI; OTTO; SAVIETO, 2015). Esses aminoácidos são fundamentais para a construção de proteínas, que desempenham papéis estruturais e são cruciais para várias vias metabólicas nas plantas (SMATANOVÁ; RICHTER; HLUŠEK, 2004). O Ca está envolvido na regulação do crescimento celular, na espessura e na remodelação da parede celular, além de contribuir para o desenvolvimento dos tecidos vegetais (HEPLER; WINSHIP, 2015; KUDLA J; BATISTIC O; HASHIMOTO K, 2010). Sua deficiência pode levar a uma redução no desenvolvimento das plantas e aporte de biomassa (BANG et al., 2021). Em estudos realizados por Martinez et al., 2020, constatou-se que a ausência de Ca resultou em uma diminuição de 19% na matéria seca de plantas de tomate.

A omissão de Ca e S comprometeu a absorção de outros nutrientes essenciais (Tabela A5, A6, A7 e A8). Considerando as funções previamente mencionadas na literatura para esses

elementos, essa deficiência teve consequências significativas no crescimento das plantas, bem como na produção de MSC e MSF.

Neste trabalho, são apresentadas evidências de que o Ca e S (principalmente S), tem forte efeito na condutância hidráulica e vulnerabilidade à cavitação em plantas de eucalipto. Esses resultados permitem ampliar a compreensão dos efeitos desses nutrientes no crescimento das plantas. Adicionalmente, os efeitos positivos de ambos nutrientes na absorção de outros nutrientes essenciais (Tabela A5, A6, A7 e A8), já discutidos na literatura, também influenciam alterações hidráulicas nas plantas e ajudam a melhor compreender a dinâmica de água e nutrientes no sistema solo-planta.

#### *4.5 Adubação com enxofre pode evitar a sementeira de ar nos vasos xilemáticos*

Pesquisas relatam que a maior resistência hidráulica do xilema ocorre em razão de um maior número de condutos com menores diâmetros para uma determinada área de condução (BLACKMAN; BRODRIBB; JORDAN, 2010; LENS et al., 2011), e espécies com vasos de maior calibre seriam mais vulneráveis à cavitação (CAI; TYREE, 2010; WHEELER et al., 2005). No entanto, essa afirmação ainda é incerta e pode não ser significativa dependendo das espécies analisadas (HACKE & SPERRY, 2001).

Plantas com S e Ca, bem como apenas S (tratamentos mais resistentes a cavitação) apresentaram maior valor de  $D_h$  médio e um menor número de condutos (Tabela 5). Tais resultados são condizentes com (BARIGAH et al., 2021; OLIVEIRA et al., 2022), que estudando espécies de eucalipto, também verificaram que plantas com vasos estreitos cavitam primeiro.

Também há evidências consideráveis de que uma das causas da cavitação é a falha das pontuações entre os condutos xilemáticos (SPERRY et al., 2006; VENTURAS et al., 2017). Essas pontuações evitam que o ar existente em condutos já embolizados sejam transferidos para condutos funcionais, reduzindo a “semeadura de ar” (SPERRY; HACKE; PITTERMANN, 2006). Consequentemente, a relação entre segurança e eficiência hidráulica também dependerá do funcionamento destas pontuações.

Um estudo realizado com *E. globulus*, *E. viminalis* e *E. camaldulensis*, demonstrou que elementos de vaso com maiores diâmetros possuem pontuações de tamanho reduzido (FERNÁNDEZ et al., 2019). Essa característica se correlaciona com aumentos na resistência à cavitação, já que além das pontuações conectarem condutos adjacentes para permitir o fluxo de água, também atuam como válvulas de segurança capilar para bloquear a propagação de ar de condutos embolizados (VENTURAS; SPERRY; HACKE, 2017b). Os poros em escala

nanométrica na membrana são geralmente suficientes para reter a interface ar-água e evitar que o ar se propague facilmente entre os conduítes (VENTURAS; SPERRY; HACKE, 2017b). Sem as membranas de pontuações, uma única lesão no sistema vascular poderia interromper completamente o transporte de água antecipando a morte das árvores (VENTURAS; SPERRY; HACKE, 2017b). Outra forma das plantas adquirirem maior segurança hidráulica é através da produção de condutos mais densos (WHEELER et al., 2005). Nossos resultados mostram que a densidade média dos condutos não apresentou diferença estatística (Tabela 5), e, portanto, pode não ser a responsável pela resistência à cavitação em plantas de eucalipto. Estas plantas podem estar alcançando maior segurança ao reduzir a área e o tamanhos das pontuações por conduto. Embora a planta não possa controlar a pressão de cavitação em um único conduto, ela pode controlar o tamanho de suas pontuações. A compensação com a diminuição da eficiência do transporte resulta da maior resistência por ter menos área total de pontuações (WHEELER et al., 2005).

#### *4.6 Cálcio e enxofre aumentam a condutância hidráulica da folha e condutividade do xilema das plantas*

A fertilização com S elevou em 50% os valores de  $K_{\text{folha}}$  (Figura 6) e 22% os valores de  $K_{\text{xilema}}$  (Figura 7) das plantas de eucalipto. Enquanto a fertilização com Ca elevou em 32% dos valores de  $K_{\text{folha}}$  (Figura 6) e em 77% os valores de  $K_{\text{xilema}}$  (Figura 7)

A  $K_{\text{folha}}$  representa e quantifica a capacidade de transporte de água na planta (AASAMAA; SÖBER; RAHI, 2001; DOMECH et al., 2009), logo, o declínio de  $k_{\text{folha}}$  tem uma influência importante na produtividade das plantas; no movimento da água através de toda a planta e nas respostas à seca (SCOFFONI & SACK, 2017).

Em condições ideais de disponibilidade de água no solo, um eficiente  $K_{\text{xilema}}$  possibilita um rápido e eficiente transporte de água das raízes para as folhas, compensando a perda de água devido à transpiração foliar (SANTIAGO et al., 2004). Isso resulta na manutenção de um alto potencial hídrico nas folhas ao longo do dia, o que ajuda a minimizar a restrição estomática nas trocas gasosas, especialmente durante períodos de alta demanda transpiratória. Conseqüentemente, aumenta a assimilação diária de carbono pelas plantas e contribui para a preservação do turgor celular, beneficiando a expansão das células vegetais e o crescimento das árvores (WOODRUFF; BOND; MEINZER, 2004; ZHANG; CAO, 2009). Portanto, um suprimento eficaz de água para as partes superiores da copa pode atenuar as elevadas tensões no xilema das plantas e favorecer para maiores taxas fotossintéticas e crescimento vegetativo.

Plantas com S e Ca apresentaram boas concentrações dos demais nutrientes (Tabela A5, A6, A7 e A8), que por sua vez, desempenham um papel fundamental na regulação da condutância hidráulica das plantas, influenciando diretamente a capacidade das plantas transportarem água e nutrientes através dos vasos xilemáticos.

Poucas pesquisas abordam a influência da fertilização na melhoria das variáveis  $K_{xilema}$  e  $K_{folha}$ . Muitos desses estudos concentram-se nos efeitos de diferentes genótipos (AVILA et al., 2020; YE et al., 2021), variações na concentração de  $CO_2$  (AVILA et al., 2020) ou até mesmo do estresse hídrico (RODRÍGUEZ-GAMIR et al., 2019) sobre essas variáveis.

Nossas descobertas indicam que o suprimento de S e Ca tem papel central no estabelecimento de plantas em áreas com escassez de água. Ao fornecer S e Ca, o S excepcionalmente, induz uma série de adaptações morfológicas, fisiológicas e anatômicas nas plantas (citados anteriormente), fundamentais para garantir maior resistência à cavitação dessas plantas, principalmente em locais de limitada disponibilidade hídrica, resultando em um aumento significativo na produtividade agrícola.

## 5. CONCLUSÃO

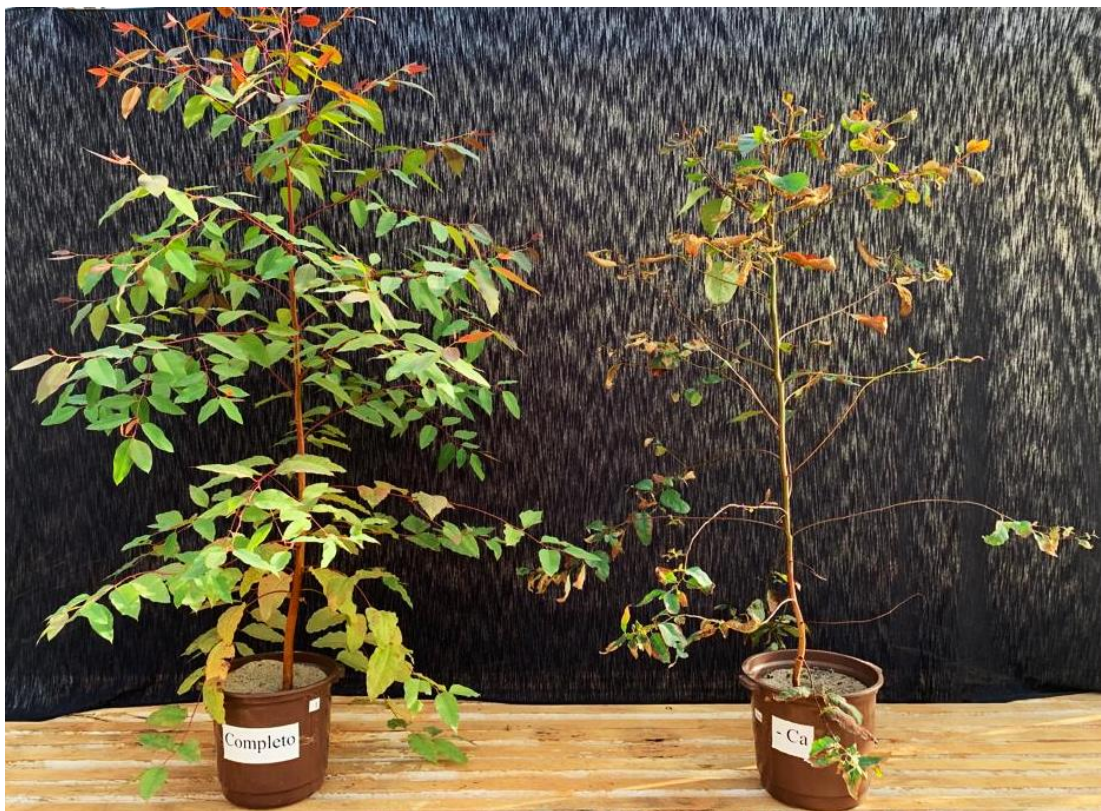
Tomados em conjunto, os resultados deste trabalho demonstram que o fornecimento de Ca e S (principalmente) está associado à melhoria da condutância hidráulica e redução da vulnerabilidade ao embolismo em plantas de eucalipto. Plantas fertilizadas com S investiram em um conjunto de características destinadas a retardar o desenvolvimento de altas tensões no xilema e, em última análise, a ocorrência de eventos de embolia. Plantas deficientes em S investiram em uma maior capacitância foliar para postegar a ocorrência do embolismo. A compreensão dos mecanismos pelos quais esses nutrientes influenciam as respostas de plantas ao estresse hídrico permite desenvolver novas estratégias de manejo racional de nutrientes e de mitigação dos efeitos negativos das mudanças climáticas, entre as quais, a ocorrência de secas mais frequentes.

## 6. APÊNDICE

Fotos de ambos experimentos 6 meses após plantio.



**Figura A1.** Experimento 1 - da esquerda para a direita (Ca+ S+; S+ Ca-; S- Ca+; S- Ca-).



**Figura A2.** Experimento 1 - da esquerda para a direita (Ca+ S+; S+ Ca-).



**Figura A3.** Experimento 1 - da esquerda para a direita (Ca+ S+; S- Ca+).



**Figura A4.** Experimento 1 - da esquerda para a direita (Ca+ S+; S- Ca-).



**Figura A5.** Experimento 2 - da esquerda para a direita (Ca+ S+; S+ Ca-; S- Ca+; S- Ca-).



**Figura A6.** Experimento 2 - da esquerda para a direita (Ca+ S+; S+ Ca-).



**Figura A7.** Experimento 2 - da esquerda para a direita (Ca+ S+; S- Ca).

**Tabela A1.** Teores de macronutrientes ( $\text{g kg}^{-1}$ ) no lenho do eucalipto.

<i>Experimento 1</i>				<i>Experimento 2</i>			
N ( $\text{g kg}^{-1}$ )				N ( $\text{g kg}^{-1}$ )			
	S+	S-	média		S+	S-	média
Ca+	4,48±0,44Bb	12,62±0,56Ba	8,55± 4,31	Ca+	3,44± 0,4Bb	12,2±0,12Aa	7,82± 4,72
Ca-	15,06±2,57Aa	14,64±0,57Aa	4,85± 1,77	Ca-	9,56±2,44Ab	13,89±1,74Aa	11,73± 3,03
média	9,77± 5,83	13,63± 1,19		média	6,5± 3,6	13,05± 1,55	
P ( $\text{g kg}^{-1}$ )				P ( $\text{g kg}^{-1}$ )			
	S+	S-	média		S+	S-	média
Ca+	0,96±0,08Bb	1,5±0,12Ab	1,23±0,29	Ca+	1,11±0,07	1,77±0,35	1,44±0,42A
Ca-	1,42±0,11Aa	1,56±0,13Aa	1,49±0,13	Ca-	1,45±0,37	1,84±0,31	1,64±0,38A
média	1,19±0,26	1,53±0,12		média	1,28±0,3b	1,81±0,31a	
K ( $\text{g kg}^{-1}$ )				K ( $\text{g kg}^{-1}$ )			
	S+	S-	média		S+	S-	média
Ca+	4,48±0,29Ba	3,03±0,17Ab	3,75±0,8	Ca+	5,14±0,32Ba	2,95±0,41Ab	4,05±1,22
Ca-	7,47±1,44Aa	3,52±0,45Ab	5,49±2,3	Ca-	7,45±1,12Aa	3,51±0,24Ab	5,48±2,23
média	5,97±1,85	3,27±0,41		média	6,3±1,45	3,23±0,43	
Ca ( $\text{g kg}^{-1}$ )				Ca ( $\text{g kg}^{-1}$ )			
	S+	S-	média		S+	S-	média
Ca+	4,08±0,62Aa	5,95±0,89Ab	5,02±1,22	Ca+	4,48±0,49Ab	7,13±0,6Aa	5,8±1,5
Ca-	0,15±0,03Ba	0,5±0,29Ba	0,32±0,2	Ca-	0,18±0,04Ba	0,59±0,25Ba	0,38±0,2
média	2,12±2,1	3,22±2,94		média	2,33±2,31	3,86±3,52	
Mg ( $\text{g kg}^{-1}$ )				Mg ( $\text{g kg}^{-1}$ )			
	S+	S-	média		S+	S-	média
Ca+	6,82±0,7	9,59±1,0	8,2±1,69B	Ca+	6,62±0,74A	10,05±0,92B	8,34±1,99
Ca-	8,11±0,93	11,76±0,9	9,9±2,11A	Ca-	8,2±1,46A	15,78±3,82A	11,99±4,85
média	7,46±1,05b	10,67±1,45a		média	7,41±1,36	12,91±3,99	
S ( $\text{g kg}^{-1}$ )				S ( $\text{g kg}^{-1}$ )			
	S+	S-	média		S+	S-	média
Ca+	0,22±0,01Ba	0,08±0,006Ab	0,3±0,2	Ca+	0,18± 0,02Ba	0,08± 0,008Ab	0,13± 0,05
Ca-	0,5±0,06Aa	0,1±0,006Ab	0,15±0,07	Ca-	0,35± 0,09Aa	0,1± 0,007Ab	0,22± 0,14
média	0,362±0,15	0,09±0,009		média	0,26±0,11	0,095±0,01	

Tratamentos com letras minúsculas iguais nas linhas e maiúsculas iguais na coluna não diferem entre si de acordo com o teste F ( $P < 0,05$ ).

**Tabela A2.** Teores de micronutrientes ( $\text{mg kg}^{-1}$ ) no lenho do eucalipto.

B ( $\text{mg kg}^{-1}$ )				B ( $\text{mg kg}^{-1}$ )			
	S+	S-	média		S+	S-	média
Ca+	10,04±0,38Ba	11,3±0,5Bb	10,69±0,82	Ca+	10,06±0,35	11,24±0,6	10,65±0,79B
Ca-	14,1±1,09Ab	12,83±0,51Aa	13,46±1,04	Ca-	11,82±1,14	12,9±0,96	12,36±1,13A
média	12,07±2,27	12,08±0,94		média	10,94±1,22b	12,07±1,16a	
Cu ( $\text{mg kg}^{-1}$ )				Cu ( $\text{mg kg}^{-1}$ )			
	S+	S-	média		S+	S-	média
Ca+	3,28±0,23	2,89±0,18	3,09±0,28B	Ca+	4,34±0,64	3,86±1,32	4,1±0,99A
Ca-	4,07±1,03	4,63±1,65	4,35±1,33A	Ca-	5,36±1,83	4,65±1,54	5,01±1,61A
média	3,68±0,81a	3,76±1,44a		média	4,85±1,38a	4,25±1,39a	
Mn ( $\text{mg kg}^{-1}$ )				Mn ( $\text{mg kg}^{-1}$ )			
	S+	S-	média		S+	S-	média
Ca+	36,7±5,95Bb	180,1±10,7Ba	108,4±76	Ca+	57,99±10,31	209,6±27,6	174,08±83,3B
Ca-	111,64±28Aa	333,46±59Ab	222,5±124	Ca-	98,49±26,5	381,2±129	239,8±174A
média	74,19±43,9	256,78±90,17		média	78,24±28,5b	295,46±126a	
Zn ( $\text{mg kg}^{-1}$ )				Zn ( $\text{mg kg}^{-1}$ )			
	S+	S-	média		S+	S-	média

Ca+	2,5±0,73	9,24±0,22	5,87±3,59B	Ca+	2,61±0,86	10,66±3,28	6,64±4,83B
Ca-	7,3±1,5	14,79±2,23	11,05±4,33A	Ca-	6,28±1,12	17,36±3,52	11,82±6,4A
média	4,9±2,76b	12,02±3,2a		média	4,452±2,16b	14,01±4,77a	
Mo (mg kg <sup>-1</sup> )				Mo (mg kg <sup>-1</sup> )			
	S+	S-	média		S+	S-	média
Ca+	0,34±0,09	6,22±1,64	3,28±3,28	Ca+	0,45±0,1	5,48±0,25	2,97±2,69
Ca-	1,14±0,42	3,6±1,02	2,37±1,49	Ca-	0,86±0,21	4,51±1,34	2,68±2,14
média	0,74±0,5	4,91±1,89		média	0,65±0,26	5±1,03	

Tratamentos com letras minúsculas iguais nas linhas e maiúsculas iguais na coluna não deferem entre si de acordo com o teste F (P <0,05).

**Tabela A3.** Teores de macronutrientes (g kg<sup>-1</sup>) nas folhas do eucalipto.

<i>Experimento 1</i>				<i>Experimento 2</i>			
N (g kg <sup>-1</sup> )				N (g kg <sup>-1</sup> )			
	S+	S-	média		S+	S-	média
Ca+	10,84±1,25Bb	22,21±3,51Aa	22,18±3	Ca+	11,22±0,34	19,35±5,15	15,29±5,5A
Ca-	19,66±5,91Aa	22,15±3Aa	20,90±4,61	Ca-	19,48±2,87	22,28±8,76	20,88±6,22A
média	15,25±6,15	22,18±3,08		média	15,35±4,8a	20,82±6,83a	
P (g kg <sup>-1</sup> )				P (g kg <sup>-1</sup> )			
	S+	S-	média		S+	S-	média
Ca+	0,57±0,02	2,56±0,33	1,57±1,07A	Ca+	0,67±0,02	2,92±1,05	1,8±1,38A
Ca-	0,88±0,36	2,24±0,7	1,56±0,88A	Ca-	0,83±0,19	2,58±1,13	1,7±1,19A
média	0,73±0,29b	2,4±0,5a		média	0,75±0,15b	2,75±1,03a	
K (g kg <sup>-1</sup> )				K (g kg <sup>-1</sup> )			
	S+	S-	média		S+	S-	média
Ca+	6,4±1,08Bb	17,02±2,53Aa	11,71±5,89	Ca+	7,77±0,52	17,66±2,47	12,72±5,53A
Ca-	11,44±3,48Ab	15,49±1,08Aa	13,47±3,23	Ca-	10,25±1,34	18,07±2,12	14,16±4,5A
média	8,92±3,6	16,26±2		média	9,01±1,62b	17,86±2,14a	
Ca (g kg <sup>-1</sup> )				Ca (g kg <sup>-1</sup> )			
	S+	S-	média		S+	S-	média
Ca+	3,4±0,45	4,2±0,84	3,8±0,7A	Ca+	3,06±0,22Ab	5,23±0,02Aa	4,14±1,16
Ca-	0,22±0,04	0,52±0,21	0,4±0,2B	Ca-	0,35±0,05Bb	1,11±0,26Ba	0,73±0,44
média	1,81±1,69b	2,39±1,99a		média	1,7±1,45	3,17±2,2	
Mg (g kg <sup>-1</sup> )				Mg (g kg <sup>-1</sup> )			
	S+	S-	média		S+	S-	média
Ca+	8,8±0,93	12,95±1,32	0,87±2,44B	Ca+	7,26±0,66	15,38±1,82	11,32±4,52B
Ca-	13,99±2,81	17,06±2,25	15,53±2,9A	Ca-	11,73±1,98	17,85±2,35	14,79±3,83A
média	11,39±3,37b	15,01±2,78a		média	9,5±2,75b	16,61±2,35a	
S (g kg <sup>-1</sup> )				S (g kg <sup>-1</sup> )			
	S+	S-	média		S+	S-	média
Ca+	0,55±0,04	0,25±0,06	0,4±0,16B	Ca+	0,56±0,03Ba	0,3±0,04Ab	0,43±0,14
Ca-	0,87±0,16	0,36±0,15	0,62±0,3A	Ca-	0,84±0,06Aa	0,33±0,04Ab	0,58±0,27
média	0,71±0,2a	0,31±0,12b		média	0,7±0,15	0,31±0,04	

Tratamentos com letras minúsculas iguais nas linhas e maiúsculas iguais na coluna não deferem entre si de acordo com o teste F (P <0,05).

**Tabela A4.** Teores de micronutrientes (mg kg<sup>-1</sup>) nas folhas do eucalipto.

B (mg kg <sup>-1</sup> )				B (mg kg <sup>-1</sup> )			
	S+	S-	média		S+	S-	média
Ca+	23,66±2,95Bb	54,62±9,22Aa	39,14±17,54	Ca+	23,01±1,14Bb	41,76±3,57Aa	32,38±10,32
Ca-	46,79±8,1Aa	55,7±10,4Aa	51,25±9,96	Ca-	46,37±10,07Aa	49,35±7,71Aa	47,86±8,45
média	35,22±13,48	55,16±9,28		média	34,69±14,14	45,56±6,88	
Cu (mg kg <sup>-1</sup> )				Cu (mg kg <sup>-1</sup> )			
	S+	S-	média		S+	S-	média
Ca+	4,13±0,23	5,25±1,02	4,69±0,97B	Ca+	3,6±0,7Bb	4,92±0,7Ba	4,3±0,96

Ca- média	6,68±1,69 5,4±1,79b	8,13±0,7 6,69±1,72a	7,4±1,44A	Ca- média	7,18±0,9Aa 5,4±2	6,15±0,67Aa 5,54±0,9	6,67±0,92
Mn (mg kg <sup>-1</sup> )				Mn (mg kg <sup>-1</sup> )			
	S+	S-	média		S+	S-	média
Ca+	69,33±16,04	651,18±111,2	360,26±315A	Ca+	105,5±21,1	581,78±78	343,6±260A
Ca- média	177,5±49,9 123,4±66,8b	541,4±205,3 596,33±166a	359,5±238A	Ca- média	168±29,5 136,78±41b	656,6±165 619,2±126a	412,34±283A
Zn (mg kg <sup>-1</sup> )				Zn (mg kg <sup>-1</sup> )			
	S+	S-	média		S+	S-	média
Ca+	11,7±2,42	13,8±2,35	12,7±2,51A	Ca+	12,36±2,83	16,9±3,29	14,65±3,75A
Ca- média	12,76±3,31 12,23±2,7a	12,78±1,76 13,29±2,03a	12,7±2,5A	Ca- média	11,23±2,17 11,8±2,41b	14±2,94 15,47±3,29a	12,6±2,81A
Mo (mg kg <sup>-1</sup> )				Mo (mg kg <sup>-1</sup> )			
	S+	S-	média		S+	S-	média
Ca+	0,56±0,12Bb	5,2±2,64Aa	2,88±3,01	Ca+	0,96±0,08	3,19±1,15	2,08±1,41A
Ca- média	2,96±1,29Aa 1,76±1,53	3,5±1,89Aa 4,35±2,34	3,23±1,55	Ca- média	3,21±1,01 2,08±1,37a	3,83±2,13 3,51±1,62a	3,52±1,58A

Tratamentos com letras minúsculas iguais nas linhas e maiúsculas iguais na coluna não diferem entre si de acordo com o teste F (P <0,05).

**Tabela A5.** Conteúdo de macronutrientes (g planta<sup>-1</sup>) nas folhas do eucalipto.

<i>Experimento 1</i>				<i>Experimento 2</i>			
N (g planta <sup>-1</sup> )				N (g planta <sup>-1</sup> )			
	S+	S-	média		S+	S-	média
Ca+	2,57±0,56Aa	0,22±0,03Ab	1,4±1,29	Ca+	1,24±0,49	0,35±0,26	0,8±0,6A
Ca- média	0,67±0,32Ba 1,62±1,09	0,24±0,06Aa 0,23±0,05	0,46±0,31	Ca- média	1,21±0,2 1,23±0,35a	0,32±0,23 0,33±0,23b	0,76±0,51A
P (g planta <sup>-1</sup> )				P (g planta <sup>-1</sup> )			
	S+	S-	média		S+	S-	média
Ca+	0,13±0,02Aa	0,02±0,004Ab	0,08±0,06	Ca+	0,07±0,02	0,04±0,02	0,04±0,01A
Ca- média	0,03±0,01Ba 0,08±0,05	0,02±0,003Aa 0,02±0,003	0,02±0,01	Ca- média	0,05±0,01 0,06±0,02a	0,03±0,01 0,03±0,02b	0,05±0,03A
K (g planta <sup>-1</sup> )				K (g planta <sup>-1</sup> )			
	S+	S-	média		S+	S-	média
Ca+	1,49±0,23Aa	0,17±0,03Ab	0,83±0,7	Ca+	0,87±0,35	0,32±0,29	0,44±0,23A
Ca- média	0,39±0,19Ba 0,94±0,61	0,17±0,06Ab 0,17±0,05	0,28±0,18	Ca- média	0,63±0,1 0,75±0,27a	0,24±0,11 0,28±0,21b	0,6±0,41A
Ca (g planta <sup>-1</sup> )				Ca (g planta <sup>-1</sup> )			
	S+	S-	média		S+	S-	média
Ca+	0,8±0,13Aa	0,04±0,01Ab	0,42±0,4	Ca+	0,34±0,15Aa	0,09±0,07Ab	0,22±0,17
Ca- média	0,009±0,007Ba 0,4±0,4	0,006±0,001Aa 0,02±0,02	0,007±0,005	Ca- média	0,02±0,009Ba 0,18±0,2	0,01±0,009Aa 0,05±0,06	0,01±0,009
Mg (g planta <sup>-1</sup> )				Mg (g planta <sup>-1</sup> )			
	S+	S-	média		S+	S-	média
Ca+	2,09±0,46A	0,13±0,02A	1,11±1,08	Ca+	0,82±0,37	0,28±0,23	0,55±0,4
Ca- média	0,53±0,34B 1,31±0,9	0,19±0,06A 0,16±0,05	0,36±0,29	Ca- média	0,75±0,26 0,79±0,3	0,2±0,1 0,26±0,17	0,49±0,33
S (g planta <sup>-1</sup> )				S (g planta <sup>-1</sup> )			
	S+	S-	média		S+	S-	média
Ca+	2,09±0,46Aa	0,13±0,02Ab	1,11±1,08	Ca+	0,82±0,37	0,28±0,23	0,55±0,4A
Ca- média	0,53±0,34Ba 1,31±0,9	0,19±0,06Aa 0,16±0,05	0,36±0,29	Ca- média	0,75±0,26 0,79±0,3ab	0,24±0,1 0,26±0,17	0,49±0,33A

Tratamentos com letras minúsculas iguais nas linhas e maiúsculas iguais na coluna não diferem entre si de acordo com o teste F (P <0,05).

**Tabela A6.** Conteúdo de micronutrientes (mg planta<sup>-1</sup>) nas folhas do eucalipto.

B (mg planta <sup>-1</sup> )				B (mg planta <sup>-1</sup> )			
	S+	S-	média		S+	S-	média
Ca+	5,58±1,04Aa	0,54±0,07Ab	3,06±2,74	Ca+	2,56±0,97	0,72±0,54	1,64±1,22A
Ca-	1,79±1,25Ba	0,61±0,14Ab	1,2±1,04	Ca-	2,8±0,31	0,7±0,34	1,75±1,16A
média	3,69±2,27	0,58±0,11		média	2,68±0,68a	0,71±0,42b	
Cu (mg planta <sup>-1</sup> )				Cu (mg planta <sup>-1</sup> )			
	S+	S-	média		S+	S-	média
Ca+	0,98±0,24Aa	0,05±0,006Ab	0,51±0,5	Ca+	0,41±0,2	0,08±0,05	0,24±0,22A
Ca-	0,26±0,2Ba	0,09±0,03Aa	0,17±0,16	Ca-	0,44±0,06	0,08±0,04	0,26±0,19A
média	0,62±0,43	0,07±0,03		média	0,42±0,14a	0,08±0,04b	
Mn (mg planta <sup>-1</sup> )				Mn (mg planta <sup>-1</sup> )			
	S+	S-	média		S+	S-	média
Ca+	16,22±3,7Aa	6,51±0,9Ab	11,36±5,7	Ca+	12,59±7,02	10,15±7,28	11,37±6,75A
Ca-	6,29±3,46Ba	5,81±1,82Aa	6,05±2,62	Ca-	10,24±0,51	9,11±4,9	9,67±3,28A
média	11,25±6,23	6,16±1,41		média	11,41±4,78a	9,63±5,77a	
Zn (mg planta <sup>-1</sup> )				Zn (mg planta <sup>-1</sup> )			
	S+	S-	média		S+	S-	média
Ca+	2,72±0,4Aa	0,13±0,01Ab	1,43±1,39	Ca+	1,45±0,85	0,29±0,21	0,87±0,8A
Ca-	0,5±0,36Ba	0,14±0,03Aa	0,32±0,3	Ca-	0,7±0,18	0,19±0,11	0,45±0,3A
média	1,61±1,2	0,14±0,02		média	1,07±0,69a	0,24±0,16a	
Mo (mg planta <sup>-1</sup> )				Mo (mg planta <sup>-1</sup> )			
	S+	S-	média		S+	S-	média
Ca+	0,13±0,03	0,05±0,02	0,09±0,05A	Ca+	0,1±0,03Ba	0,04±0,03Ab	0,07±0,04
Ca-	0,09±0,05	0,03±0,02	0,06±0,04B	Ca-	0,18±0,03Aa	0,06±0,04Ab	0,12±0,07
média	0,11±0,04a	0,04±0,02b		média	0,14±0,05	0,05±0,03	

Tratamentos com letras minúsculas iguais nas linhas e maiúsculas iguais na coluna não diferem entre si de acordo com o teste F (P < 0,05).

**Tabela A7.** Conteúdo de macronutrientes (g planta<sup>-1</sup>) no lenho do eucalipto.

<i>Experimento 1</i>				<i>Experimento 2</i>			
N (g planta <sup>-1</sup> )				N (g planta <sup>-1</sup> )			
	S+	S-	média		S+	S-	média
Ca+	1,09±0,2	0,53±0,05	0,8±0,32A	Ca+	0,45±0,02	0,77±0,21	0,37±0,11B
Ca-	1,3±0,34	0,51±0,16	0,9±0,48A	Ca-	0,29±0,11	0,44±0,24	0,6±0,27A
média	1,2±0,28a	0,52±0,11b		média	0,61±0,22a	0,36±0,19b	
P (g planta <sup>-1</sup> )				P (g planta <sup>-1</sup> )			
	S+	S-	média		S+	S-	média
Ca+	0,23±0,05Aa	0,06±0,007Ab	0,15±0,09	Ca+	0,14±0,01Aa	0,04±0,02Ab	0,09±0,05
Ca-	0,12±0,04Ba	0,05±0,02Ab	0,09±0,04	Ca-	0,11±0,008Ba	0,05±0,02Ab	0,08±0,03
média	0,18±0,07	0,06±0,01		média	0,13±0,02	0,04±0,02	
K (g planta <sup>-1</sup> )				K (g planta <sup>-1</sup> )			
	S+	S-	média		S+	S-	média
Ca+	1,09±0,17Aa	0,12±0,01Ab	0,61±0,52	Ca+	0,69±0,15	0,07±0,02	0,38±0,35A
Ca-	0,67±0,28Ba	0,12±0,03Ab	0,39±0,34	Ca-	0,61±0,14	0,1±0,05	0,36±0,28A
média	0,88±0,31	0,12±0,02		média	0,65±0,14a	0,08±0,04b	
Ca (g planta <sup>-1</sup> )				Ca (g planta <sup>-1</sup> )			
	S+	S-	média		S+	S-	média
Ca+	0,99±0,18Aa	0,24±0,02Ab	0,61±0,41	Ca+	0,61±0,16Aa	0,16±0,05Ab	0,39±0,009
Ca-	0,01±0,003Ba	0,01±0,007Ba	0,01±0,005	Ca-	0,01±0,006Ba	0,01±0,01Ba	0,01±0,009
média	0,5±0,5	0,13±0,12		média	0,31±0,23	0,09±0,08	
Mg (g planta <sup>-1</sup> )				Mg (g planta <sup>-1</sup> )			

	S+	S-	média		S+	S-	média
Ca+	1,65±0,28Aa	0,41±0,07Ab	1,03±0,68	Ca+	0,9±0,25Aa	0,24±0,12Ab	0,57±0,39
Ca-	0,72±0,25Ba	0,41±0,14Ab	0,57±0,25	Ca-	0,67±0,16Ba	0,51±0,33Ba	0,59±0,25
média	1,19±0,55	0,41±0,11		média	0,78±0,23	0,38±0,27	
S (g planta <sup>-1</sup> )				S (g planta <sup>-1</sup> )			
	S+	S-	média		S+	S-	média
Ca+	0,05±0,008	0,003±0,0001	0,02±0,02A	Ca+	0,025±0,007	0,002±0,0008	0,01±0,01A
Ca-	0,04±0,01	0,003±0,001	0,02±0,02A	Ca-	0,028±0,008	0,003±0,001	0,01±0,01A
média	0,049±0,01a	0,003±0,0007b		média	0,02±0,007a	0,002±0,001b	

Tratamentos com letras minúsculas iguais nas linhas e maiúsculas iguais na coluna não diferem entre si de acordo com o teste F (P <0,05).

**Tabela A8.** Conteúdo de micronutrientes (mg planta<sup>-1</sup>) no lenho do eucalipto.

B (mg planta <sup>-1</sup> )				B (mg planta <sup>-1</sup> )			
	S+	S-	média		S+	S-	média
Ca+	2,44±0,36Aa	0,48±0,05Ab	1,46±1,06	Ca+	1,34±0,19Aa	0,27±0,09Ab	0,81±0,59
Ca-	1,25±0,41Ba	0,45±0,13Ab	0,85±0,51	Ca-	0,96±0,16Ba	0,39±0,18Ab	0,67±0,34
média	1,85±0,72	0,46±0,09		média	1,15±0,26	0,33±0,15	
Cu (mg planta <sup>-1</sup> )				Cu (mg planta <sup>-1</sup> )			
	S+	S-	média		S+	S-	média
Ca+	0,8±0,13Aa	0,12±0,004Ab	0,46±0,37	Ca+	0,58±0,14Aa	0,1±0,08Ab	0,34±0,28
Ca-	0,36±0,13Ba	0,16±0,06Ab	0,26±0,14	Ca-	0,41±0,06Ba	0,14±0,06Ab	0,27±0,15
média	0,58±0,26	0,14±0,04		média	0,5±0,14	0,12±0,07	
Mn (mg planta <sup>-1</sup> )				Mn (mg planta <sup>-1</sup> )			
	S+	S-	média		S+	S-	média
Ca+	8,9±1,71	7,55±0,55	8,22±1,39B	Ca+	7,55±0,45	4,95±1,54	6,25±1,74A
Ca-	9,39±1,75	11,53±3,48	10,46±2,83A	Ca-	8±2,42	12,91±9,88	10,4±7,16A
média	9,15±1,65a	9,54±3,15a		média	7,78±1,63a	8,93±7,8a	
Zn (mg planta <sup>-1</sup> )				Zn (mg planta <sup>-1</sup> )			
	S+	S-	média		S+	S-	média
Ca+	0,59±0,15	0,39±0,03	0,49±0,15A	Ca+	0,36±0,15	0,28±0,2	0,32±0,17A
Ca-	0,63±0,2	0,52±0,21	0,58±0,2A	Ca-	0,49±0,02	0,55±0,32	0,52±0,21B
média	0,61±0,17a	0,45±0,16b		média	0,43±0,12a	0,41±0,29a	
Mo (mg planta <sup>-1</sup> )				Mo (mg planta <sup>-1</sup> )			
	S+	S-	média		S+	S-	média
Ca+	0,08±0,02Ab	0,26±0,06Aa	0,17±0,1	Ca+	0,05±0,004	0,13±0,05	0,09±0,05A
Ca-	0,09±0,01Aa	0,13±0,07Ba	0,11±0,05	Ca-	0,06±0,01	0,14±0,09	0,1±0,07A
média	0,08±0,02	0,19±0,09		média	0,06±0,01b	0,14±0,07a	

Tratamentos com letras minúsculas iguais nas linhas e maiúsculas iguais na coluna não diferem entre si de acordo com o teste F (P <0,05).

## 7. REFERÊNCIAS

- AARABI, F. et al. **Coordinating Sulfur Pools under Sulfate Deprivation**. *Trends in Plant Science* Elsevier Ltd, 1 dez. 2020.
- AASAMAA, K.; SÖBER, A.; RAHI, M. Leaf anatomical characteristics associated with shoot hydraulic conductance, stomatal conductance and stomatal sensitivity to changes of leaf water status in temperate deciduous trees. *Functional Plant Biology*, v. 28, n. 8, p. 765–774, 2001.
- ADAMS, H. D. et al. A multi-species synthesis of physiological mechanisms in drought-induced tree mortality. *Nature ecology & evolution*, v. 1, n. 9, p. 1285–1291, 2017.
- AHANGER, M. A. et al. Drought Tolerance: Role of Organic Osmolytes, Growth Regulators, and Mineral Nutrients. Em: AHMAD, P.; WANI, M. (Eds.). **Physiological Mechanisms and Adaptation Strategies in Plants Under Changing Environment**. Springer ed. New York: [s.n.].
- AHANGER, M. A.; AHMAD, P. Role of mineral nutrients in abiotic stress tolerance: Revisiting the associated signaling mechanisms. Em: **Plant Signaling Molecules: Role and Regulation under Stressful Environments**. [s.l.] Elsevier, 2019. p. 269–285.
- AHMAD, N. et al. Drought stress in maize causes differential acclimation responses of glutathione and sulfur metabolism in leaves and roots. *BMC Plant Biol*, v. 16, n. 247, 2016.
- ALLEN, C. D. et al. A global overview of drought and heat-induced tree mortality reveals emerging climate change risks for forests. *Forest Ecology and Management*, v. 259, n. 4, p. 660–684, 2010.
- AMARANTE, C. V. T. et al. Radiação, fotossíntese, rendimento e qualidade de frutos em macieiras “Royal Gala” cobertas com telas antigranizo. *Pesq. agropec. bras*, v. 42, n. 7, p. 925–931, 2007.
- AMPONSAH IG et al. Growth response and sapwood hydraulic properties of young lodgepole pine following repeated fertilization. *Tree Physiol*, v. 24, p. 1099–1108, 2004.
- ANDRÉS, Z. et al. Control of vacuolar dynamics and regulation of stomatal aperture by tonoplast potassium uptake. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, v. 111, n. 17, 29 abr. 2014.
- AVILA, R. T. et al. Coffee plants respond to drought and elevated [CO<sub>2</sub>] through changes in stomatal function, plant hydraulic conductance, and aquaporin expression. *Environmental and Experimental Botany*, v. 177, 1 set. 2020.
- BANG, T. C. et al. **The molecular–physiological functions of mineral macronutrients and their consequences for deficiency symptoms in plants**. *New Phytologist* Blackwell Publishing Ltd, 1 mar. 2021.
- BARIGAH, T. S. et al. Narrow vessels cavitate first during a simulated drought in *Eucalyptus camaldulensis*. *Physiologia Plantarum*, v. 173, n. 4, p. 2081–2090, 2021.

- BARTLETT, M. K.; SCOFFONI, C.; SACK, L. The determinants of leaf turgor loss point and prediction of drought tolerance of species and biomes: A global meta-analysis. **Ecology Letters**, v. 15, n. 5, p. 393–405, maio 2012.
- BLACKMAN, C. J.; BRODRIBB, T. J.; JORDAN, G. J. Leaf hydraulic vulnerability is related to conduit dimensions and drought resistance across a diverse range of woody angiosperms. **New Phytologist**, v. 188, n. 4, p. 1113–1123, dez. 2010.
- BLUM, A. Osmotic adjustment is a prime drought stress adaptive engine in support of plant production. **Plant, cell & environment**, v. 40, n. 1, p. 4–10, 2017.
- BOSABALIDIS, A. M.; KOFIDIS, G. Comparative effects of drought stress on leaf anatomy of two olive cultivars. **Plant Science**, v. 163, p. 375–379, 2002.
- BRODRIBB T. J et al. Visual quantification of embolism reveals leaf vulnerability to hydraulic failure. **New Phytol**, v. 209, p. 1403–1409, 2016.
- BRODRIBB, T. J.; COCHARD, H. Hydraulic failure defines the recovery and point of death in water-stressed conifers. **Plant Physiology**, v. 149, n. 1, p. 575–584, 2009.
- BRODRIBB, T. J.; HOLBROOK, N. M. Declining hydraulic efficiency as transpiring leaves desiccate: two types of response. **Plant, Cell & Environment**, v. 29, n. 12, p. 2205–2215, 2006.
- BUCCI, S. J. et al. Nutrient availability constrains the hydraulic architecture and water relations of savannah trees. **Plant, Cell and Environment**, v. 29, n. 12, p. 2153–2167, 2006a.
- BUCCI, S. J. et al. Nutrient availability constrains the hydraulic architecture and water relations of savannah trees. **Plant, Cell and Environment**, v. 29, n. 12, p. 2153–2167, dez. 2006b.
- BUCKLEY, T. N. The contributions of apoplastic, symplastic and gas phase pathways for water transport outside the bundle sheath in leaves. **Plant, Cell and Environment**, v. 38, n. 1, p. 7–22, 1 jan. 2015.
- CAI, J.; TYREE, M. T. The impact of vessel size on vulnerability curves: Data and models for within-species variability in saplings of aspen, *Populus tremuloides* Michx. **Plant, Cell and Environment**, v. 33, n. 7, p. 1059–1069, jul. 2010.
- CAKMAK, I.; YAZICI, A. **Magnesium: A forgotten element in crop production**. [s.l: s.n.]. Disponível em: <<https://www.researchgate.net/publication/291869977>>.
- CARDOSO, A. A. et al. Coordinated plasticity maintains hydraulic safety in sunflower leaves. **Plant Cell and Environment**, v. 41, n. 11, p. 2567–2576, 1 nov. 2018.
- CARDOSO, A. A.; BATZ, T. A.; MCADAM, S. A. Xylem embolism resistance determines leaf mortality during drought in *Persea americana*. **Plant Physiology**, v. 182, n. 1, p. 547–554, 2020.
- CARMO, C. A. F. S. et al. Métodos de análise de tecidos vegetais Utilizados na embrapa solos. **Circular técnica**, p. 41p, 2000.

- CARNICER, J. et al. Widespread crown condition decline, food web disruption, and amplified tree mortality with increased climate change-type drought. **Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America**, v. 108, n. 4, p. 1474–1478, 25 jan. 2011.
- CHAMBI-LEGOAS, R. et al. Potassium fertilization enhances xylem plasticity and growth recovery of *Eucalyptus grandis* trees in response to drastic changes in water availability. **Forest Ecology and Management**, v. 528, p. 120656, 2023.
- CHAN, K. X. et al. **Balancing metabolites in drought: The sulfur assimilation conundrum**. **Trends in Plant Science**, jan. 2013.
- CHEBLI Y; GEITMANN A. Cellular growth in plants requires regulation of cell wall biochemistry. **Curr Opin Cell Biol**, v. 44, p. 28–35, 2017.
- CHOAT, B. et al. Global convergence in the vulnerability of forests to drought. **Nature**, v. 491, n. 7426, p. 752–755, 29 nov. 2012.
- CHRISTOFFERSEN, B. O. et al. Linking hydraulic traits to tropical forest function in a size-structured and trait-driven model (TFS v.1-Hydro). **Geoscientific Model Development**, v. 9, n. 11, p. 4227–4255, 24 nov. 2016.
- COURBET, G. et al. **Disentangling the complexity and diversity of crosstalk between sulfur and other mineral nutrients in cultivated plants**. **Journal of Experimental Botany** Oxford University Press, , 19 ago. 2019.
- CREEK, D. et al. Xylem embolism in leaves does not occur with open stomata: Evidence from direct observations using the optical visualization technique. **Journal of Experimental Botany**, v. 71, n. 3, p. 1151–1159, 23 jan. 2020.
- DAVIS, S. D. et al. Shoot dieback during prolonged drought in *Ceanothus* (Rhamnaceae) chaparral of California: a possible case of hydraulic failure. **American Journal of Botany**, v. 89, n. 5, p. 220–228, 2022.
- DEFALCO T.A; BENDER K.W; SNEDDEN W.A. Breaking the code: Ca<sup>2+</sup> sensors in plant signalling. **Biochem. J**, v. 425, p. 27–40, 2010.
- DOMEC, J. C. et al. Decoupling the influence of leaf and root hydraulic conductances on stomatal conductance and its sensitivity to vapour pressure deficit as soil dries in a drained loblolly pine plantation. **Plant, Cell and Environment**, v. 32, n. 8, p. 980–991, ago. 2009.
- EMBRAPA. **Comunicado Técnico**. Limpeza de Areia para Experimentos em Nutrição de Plantas. **Anais...**2018.
- ESTELA, R. et al. **Plant Cell wall degrading and remodeling proteins: Current perspectives**. [s.l: s.n.]. Disponível em: <<http://www.cottoninc.com/Cotton-Nonwoven-Technical-Guide>>.

- FAN, M. et al. Aerenchyma Formed Under Phosphorus Deficiency Contributes to the Reduced Root Hydraulic Conductivity in Maize Roots. **Journal of Integrative Plant Biology**, v. 49, n. 5, p. 598–604, 2007.
- FATMA, M. et al. Nitric oxide alleviates salt stress inhibited photosynthetic performance by interacting with sulfur assimilation in mustard. **Frontiers in Plant Science**, v. 7, n. APR2016, 25 abr. 2016.
- FERNÁNDEZ, M. E. et al. New insights into wood anatomy and function relationships: How Eucalyptus challenges what we already know. **Forest Ecology and Management**, v. 454, 15 dez. 2019.
- FERREIRA, C. S. et al. Leaf anatomy of eleven dominant woody species in the savannas of Roraima. **Acta Amazonica**, v. 45, n. 4, p. 337–346, 1 out. 2015.
- FUNK, J. L.; VITOUSEK, P. M. Resource-use efficiency and plant invasion in low-resource systems. **Nature**, v. 446, n. 7139, p. 1079–1081, 2007.
- GUEHL, J.; FORT, C.; FERHI, A. Differential response of leaf conductance, carbon isotope discrimination and water-use efficiency to nitrogen deficiency in maritime pine and pedunculate oak plants. **New Phytologist**, v. 131, n. 2, p. 149–157, 1995.
- GUILLEMOT, J. et al. Increased hydraulic constraints in Eucalyptus plantations fertilized with potassium. **Plant Cell and Environment**, v. 44, n. 9, p. 2938–2950, 1 set. 2021.
- HACKE, U. G. et al. Influence of nitrogen fertilization on xylem traits and aquaporin expression in stems of hybrid poplar. **Tree Physiology**, v. 30, n. 8, p. 1016–1025, 2010.
- HACKE, U. G.; SPERRY, J. S. Functional and ecological xylem anatomy. **Perspectives in Plant Ecology**, v. 4, n. 2, p. 97–115, 2001.
- HAJEK, P. et al. Mutually inclusive mechanisms of drought-induced tree mortality. **Global Change Biology**, v. 28, n. 10, p. 3365–3378, 1 maio 2022.
- HARTILL, G. E. et al. Cold temperature and aridity shape the evolution of drought tolerance traits in Tasmanian species of Eucalyptus. **Tree Physiology**, v. 43, n. 9, p. 1493–1500, 1 set. 2023.
- HARVEY HP; VAN DEN DRIESSCHE R. Nutrition, xylem cavitation and drought resistance in hybrid poplar. **Tree Physiol**, v. 17, p. 647–654, 1997.
- HEPLER P. K. Calcium: A central regulator of plant growth and development. **Plant Cell**, v. 17, p. 2142–2155, 2005.
- HEPLER, P. K.; WINSHIP, L. J. The pollen tube clear zone: clues to the mechanism of polarized growth. **J Integr Plant Biol**, v. 57, p. 79–92, 2015.
- HERBETTE, S.; COCHARD, H. Calcium is a major determinant of xylem vulnerability to cavitation. **Plant Physiology**, v. 153, n. 4, p. 1932–1939, 2010.

- HESSINI, K. et al. Interactive effects of salinity and nitrogen forms on plant growth, photosynthesis and osmotic adjustment in maize. **Plant Physiology and Biochemistry**, v. 139, p. 171–178, 1 jun. 2019.
- HOCHBERG, U. et al. Stomatal closure, basal leaf embolism, and shedding protect the hydraulic integrity of grape stems. **Plant Physiology**, v. 174, n. 2, p. 764–775, 1 jun. 2017.
- HUO, J. et al. Hydraulic trade-off and coordination strategies mediated by leaf functional traits of desert shrubs. **Frontiers in Plant Science**, v. 13, 31 out. 2022.
- JAVED, T. et al. **Recent Advances in Agronomic and Physio-Molecular Approaches for Improving Nitrogen Use Efficiency in Crop Plants**. **Frontiers in Plant Science** Frontiers Media S.A., 29 abr. 2022.
- JOHANSEN, D. A. **Plant microtechnique**. Inc: London: [s.n.].
- JOHNSON, D. M. et al. Hydraulic patterns and safety margins, from stem to stomata, in three eastern US tree species. **Tree Physiology**, v. 31, n. 6, p. 659–668, jun. 2011.
- JOHNSON, D. M. et al. **Hydraulic safety margins and embolism reversal in stems and leaves: Why are conifers and angiosperms so different?** **Plant Science**, out. 2012.
- JOHNSON, D. M. et al. A test of the hydraulic vulnerability segmentation hypothesis in angiosperm and conifer tree species. **Tree Physiology**, v. 36, n. 8, p. 983–993, 1 ago. 2016.
- KARMOKER, J. L. et al. Sulphate deprivation depresses the transport of nitrogen to the xylem and the hydraulic conductivity of barley (*Hordeum vulgare* L.) roots. **Planta**, v. 185, p. 269–278, 1991.
- KAYA, C. et al. Influence of foliar-applied calcium nitrate on strawberry plants grown under salt-stressed conditions. **Australian journal of experimental agriculture**, v. 42, n. 5, p. 631–636, 2022.
- KHAN, M. I. R.; ASGHER, M.; KHAN, N. A. Alleviation of salt-induced photosynthesis and growth inhibition by salicylic acid involves glycinebetaine and ethylene in mungbean (*Vigna radiata* L.). **Plant Physiology and Biochemistry**, v. 80, p. 67–74, 2014.
- KHARDIA, N.; NAGAR, H.; SHARMA, S. The Agriculture Magazine. Em: **The Agriculture Magazine**. [s.l: s.n.]. v. 1p. 66–68.
- KUDLA J; BATISTIC O; HASHIMOTO K. Calcium signals: the lead currency of plant information processing. **Plant Cell**, v. 22, p. 541–563, 2010.
- LAMARQUE, L. J. et al. An inconvenient truth about xylem resistance to embolism in the model species for refilling *Laurus nobilis* L. **Annals of Forest Science**, v. 75, n. 3, p. 1–15, 2018.
- LENS, F. et al. Testing hypotheses that link wood anatomy to cavitation resistance and hydraulic conductivity in the genus *Acer*. **New Phytologist**, v. 190, n. 3, p. 709–723, maio 2011.

- LEUSTEK, T.; SAITO, K. Update on Biochemistry Sulfate Transport and Assimilation in Plants 1. **Plant Physiology**, v. 120, p. 637–643, 1999.
- LI, F.; WU, N.; YOU, C. Growth, biomass partitioning, and water-use efficiency of a leguminous shrub (*Bauhinia faberi* var. *microphylla*) in response to various water availabilities. **New Forests**, v. 36, p. 53–65, 2008.
- LI, Q.; GAO, Y.; YANG, A. **Sulfur homeostasis in plants**. **International Journal of Molecular Sciences** MDPI AG, , 1 dez. 2020.
- LI, Y. S. et al. Phosphorus deficiency-induced reduction in root hydraulic conductivity in *Medicago falcata* is associated with ethylene production. **Environmental and Experimental Botany**, v. 67, n. 1, p. 172–177, nov. 2009.
- LI-COR. LI 3100 area meter instruction manual. Em: **Lincoln: LICOR**. [s.l: s.n.]. p. 34p.
- MA, C. C. et al. Photosynthesis, transpiration and water use efficiency of *Caragana microphylla*, *C. intermedia* and *C. korshinskii*. **Photosynthetica**, v. 42, n. 1, p. 65–70, 2004.
- MARÍN-DE LA ROSA, N. et al. Drought resistance is mediated by divergent strategies in closely related Brassicaceae. **New Phytologist**, v. 223, n. 2, p. 783–797, 1 jul. 2019.
- MARSCHNER, H. **Mineral nutrition of higher plants**. London: Academic ed. [s.l: s.n.].
- MARSCHNER, H. **Mineral Nutrition of Higher Plants**. 3. ed. [s.l: s.n.].
- MARTINEZ, H. E. P. et al. Leaf and stem anatomy of cherry tomato under calcium and magnesium deficiencies. **Brazilian Archives of Biology and Technology**, v. 63, 2020.
- MARTINS S C V et al. Understanding the low photosynthetic rates of sun and shade coffee leaves: bridging the gap on the relative roles of hydraulic, diffusive and biochemical constraints to photosynthesis. **PLoS One**, v. 9, n. 4, p. 1–10, 2014.
- MARTIN-STPAUL, N.; DELZON, S.; COCHARD, H. **Plant resistance to drought depends on timely stomatal closure**. **Ecology Letters** Blackwell Publishing Ltd, , 1 nov. 2017.
- MCAINSH M. R; PITTMAN J. K. Shaping the calcium signature. **New Phytol**, v. 181, p. 275–294, 2009.
- MEDEIROS, E. C. **Ecofisiologia de duas espécies lenhosas da caatinga ocorrentes em inselbergs**. Dissertação—[s.l.] Universidade federal da paraíba, 2019.
- MEINZER, F. C. et al. Xylem hydraulic safety margins in woody plants: Coordination of stomatal control of xylem tension with hydraulic capacitance. **Functional Ecology**, v. 23, n. 5, p. 922–930, out. 2009.
- MELLO PRADO, R. Phosphorus. Em: SPRINGER, C. (Ed.). **Mineral nutrition of tropical plants**. [s.l: s.n.]. v. 1p. 113–131.

- NAVARRO, J. M.; MARTÍNEZ, V.; CARVAJAL, M. **Ammonium, bicarbonate and calcium effects on tomato plants grown under saline conditions** *Plant Science*. [s.l: s.n.]. Disponível em: <www.elsevier.com/locate/plantsci>.
- O'BRIEN, T. P.; FEDER, N.; MCCULLY, M. E. Polyehromatic Staining of Plant Cell Walls by Toluidine Blue O. **Protoplasma**, v. 59, p. 368–373, 1964.
- OLIVEIRA, R. T. DE et al. HYDRAULIC TRAITS OF Jacaranda copaia (AUBL.) D. DON. (BIGNONIACEAE) IN THE SOUTHWEST AMAZON. **Revista Arvore**, v. 47, 2023.
- OLIVEIRA, L. A. et al. Exploring leaf hydraulic traits to predict drought tolerance of Eucalyptus clones. **Tree Physiol**, v. 42, n. 9, p. 1750–1761, 2022.
- PEREIRA, L. et al. Plant pneumatics: Stem air flow is related to embolism - new perspectives on methods in plant hydraulics. **New Phytologist**, v. 211, n. 1, p. 357–370, 1 jul. 2016.
- PLIETH, C.; VOLLBEHR, S. Calcium promotes activity and confers heat stability on plant peroxidases. **Plant Sig. Beh**, v. 7, n. 6, p. 650–660, 2012.
- POIRIER, Y.; BUCHER, M. Phosphate Transport and Homeostasis in Arabidopsis. **The Arabidopsis Book**, v. 1, p. e0024, jan. 2002.
- PRADO M. J. **Parâmetros hidráulicos e fotossintéticos de espécie lenhosa do cerrado matogrossense**. Cuiabá -MT: Física Ambiental, 2019.
- R CORE TEAM. **R: A language and environment for statistical computing**. R Foundation for Statistical Computing Vienna, Austria, 2022.
- RADIN JW; EIDENBOCK MP. Hydraulic conductance as a factor limiting leaf expansion in phosphorus deficient cotton plants. **Plant Physiol**, v. 89, p. 264–268, 1984.
- REDDY A.S. Calcium: Silver bullet in signaling. **Plant Sci**, v. 160, p. 381–404, 2001.
- RODRIGUEZ-DOMINGUEZ, C. M. et al. Mapping xylem failure in disparate organs of whole plants reveals extreme resistance in olive roots. **New Phytologist**, v. 3, p. 1025–1035, 2018.
- RODRÍGUEZ-GAMIR, J. et al. Aquaporin regulation in roots controls plant hydraulic conductance, stomatal conductance, and leaf water potential in Pinus radiata under water stress. **Plant Cell and Environment**, v. 42, n. 2, p. 717–729, 1 fev. 2019.
- SACK, L. et al. The hydraulic conductance of the angiosperm leaf lamina: a comparison of three measurement methods. **Journal of Experimental Botany**, v. 53, n. 378, p. 2177–2184, 2002.
- SALUNKHE, D. K.; BOLIN, H. R.; REDDY, N. R. **Storage, processing and nutritional quality of fruits and vegetables**. [s.l: s.n.].
- SANTIAGO, L. S. et al. Leaf photosynthetic traits scale with hydraulic conductivity and wood density in Panamanian forest canopy trees. **Oecologia**, v. 140, n. 4, p. 543–550, ago. 2004.

SANTOS JR, U. M.; CARVALHO GONÇALVES, J. F.; FELDPAUSCH, T. R. Growth, leaf nutrient concentration and photosynthetic nutrient use efficiency in tropical tree species planted in degraded areas in central Amazonia. **Forest ecology and management**, v. 226, n. 1–3, p. 229–309, 2006.

SCHOLZ FG et al. Removal of nutrient limitations by long-term fertilization decreases nocturnal water loss in savanna trees. **Tree Physiol**, v. 27, p. 551–559, 2007.

SCOFFONI, C.; SACK, L. The causes and consequences of leaf hydraulic decline with dehydration. **Journal of Experimental Botany**, v. 68, n. 16, p. 4479–4496, 20 jul. 2017.

SHABALA, S.; SCHIMANSKI, L. J.; KOUTOULIS, A. Heterogeneity in bean leaf mesophyll tissue and ion flux profiles: Leaf electrophysiological characteristics correlate with the anatomical structure. **Annals of Botany**, v. 89, n. 2, p. 221–226, 2002.

SHANGGUAN, Z. P. et al. Effects of phosphorus nutrient on the hydraulic conductivity of sorghum (*Sorghum vulgare* Pers.) seedling roots under water deficiency. **Journal of Integrative Plant Biology**, v. 47, n. 4, p. 421–427, 2005.

SMATANOVÁ, M.; RICHTER, R.; HLUŠEK, J. Spinach and pepper response to nitrogen and sulphur fertilization. **Plant, Soil and Environment**, v. 50, n. 7, p. 303–308, 2004.

SPERLING, O. et al. Excessive nitrogen impairs hydraulics, limits photosynthesis, and alters the metabolic composition of almond trees. **Plant Physiology and Biochemistry**, v. 143, p. 265–274, 1999.

SPERRY, J. S.; HACKE, U. G.; PITTERMANN, J. **Size and function in conifer tracheids and angiosperm vessels. American Journal of Botany**, 2006.

SPERRY, J. S.; TYREE, M. T. Mechanism of water stress-induced xylem embolism. **Plant Physiology**, v. 88, n. 3, p. 581–587, 1988a.

SPERRY, J. S.; TYREE, M. T. Mechanism of Water Stress-Induced Xylem Embolism. **Plant Physiology**, v. 88, n. 3, p. 581–587, 1 nov. 1988b.

TAN, F. SEN et al. Hydraulic safety margins of co-occurring woody plants in a tropical karst forest experiencing frequent extreme droughts. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 292–293, 15 out. 2020.

TANG, R. J.; LUAN, S. **Regulation of calcium and magnesium homeostasis in plants: from transporters to signaling network. Current Opinion in Plant Biology** Elsevier Ltd, , 1 out. 2017.

TRUEBA, S. et al. Vulnerability to xylem embolism as a major correlate of the environmental distribution of rain forest species on a tropical island. **Plant Cell and Environment**, v. 40, n. 2, p. 277–289, 1 fev. 2017.

TURNER, N. C. **Adaptation to Water Deficits: A Changing Perspective** Aust. J. Plant Physiol. [s.l: s.n.].

- TYREE, M.; SPERRY, J. Vulnerability of xylem to cavitation and embolism. **Ann. Rev. Plant Biol.**, v. 40, p. 19–36, 1989.
- TYREE, M. T.; EWERS, F. W. The hydraulic architecture of trees and other woody plants. **New Phytologist**, v. 119, n. 3, p. 345–360, 1991.
- TYREE, M. T.; HAMMEL, H. T. The measurement of the turgor pressure and the water relations of plants by the pressure-bomb technique. **Journal of experimental Botany**, v. 23, n. 1, p. 267–282, 1972.
- TYREE, M. T.; ZIMMERMANN M. H. **Xylem Structure and the Ascent of Sap**. 2° ed. Berlim, Heidelberg: [s.n.].
- VALADARES, G. M.; LANDAU, E. C.; MAIA, N. L. M. Evolução da produção de eucalipto (*Eucalyptus* spp. e outros gêneros, Myrtaceae). Em: **Dinâmica da produção agropecuária e da paisagem natural no Brasil nas últimas décadas: produtos de origem animal e da silvicultura**. Brasília, DF: Embrapa: [s.n.]. v. 3p. 1435–1500.
- VENTURAS, M. D.; SPERRY, J. S.; HACKE, U. G. **Plant xylem hydraulics: What we understand, current research, and future challenges**. **Journal of Integrative Plant Biology** Blackwell Publishing Ltd, 1 jun. 2017a.
- VENTURAS, M. D.; SPERRY, J. S.; HACKE, U. G. Plant xylem hydraulics: What we understand, current research, and future challenges. **Journal of Integrative Plant Biology**, v. 59, n. 6, p. 356–389, 1 jun. 2017b.
- VILAGROSA, A. et al. Xylem cavitation and embolism in plants living in water-limited ecosystems. Em: SPRINGER BERLIN HEIDELBERG (Ed.). **Plant responses to drought stress: From morphological to molecular features**. Berlin, Heidelberg: [s.n.]. p. 63–109.
- WHEELER, E. A.; BAAS, P.; RODGERS, S. Variations in dieot wood anatomy: a global analysis based on the Insidewood database. **Iawa Journal**, v. 28, n. 3, p. 229–258, 2007.
- WHEELER, J. K. et al. Inter-vessel pitting and cavitation in woody Rosaceae and other vessel led plants: A basis for a safety versus efficiency trade-off in xylem transport. **Plant, Cell and Environment**, v. 28, n. 6, p. 800–812, jun. 2005.
- WOODRUFF, D. R.; BOND, B. J.; MEINZER, F. C. Does turgor limit growth in tall trees? **Plant, Cell and Environment**, v. 27, n. 2, p. 229–236, fev. 2004.
- XIA, Z. et al. Overexpression of the maize sulfite oxidase increases sulfate and GSH levels and enhances drought tolerance in transgenic tobacco. **Frontiers in Plant Science**, v. 9, 12 mar. 2018.
- YAMAMOTO, E. L. M. et al. Função do cálcio na degradação da parede celular vegetal de frutos. **Revista verde de agroecologia e desenvolvimento sustentável**, v. 6, n. 2, p. 6, 2011.
- YAN, C. L. et al. Leaf hydraulic safety margin and safety-efficiency trade-off across angiosperm woody species: Leaf hydraulics across global species. **Biology Letters**, v. 16, n. 11, 1 nov. 2020.

YAN, L.; XINGHUI, L.; WEIMIN, Z. The Effect of Magnesium Deficiency on Photosynthesis of Longan (*Dimocarpus longana Lour.*). **Acta Horticulturae Sinica**, v. 28, n. 2101–106, 2001.

YASUHARA, T.; NOKIHARA, K. High-throughput analysis of total nitrogen content that replaces the classic Kjeldahl method. **Journal of agricultural and food chemistry**, v. 49, p. 4581–4583, 2001.

YE, M. et al. High Leaf Vein Density Promotes Leaf Gas Exchange by Enhancing Leaf Hydraulic Conductance in *Oryza sativa* L. Plants. **Frontiers in Plant Science**, v. 12, 25 out. 2021.

ZEPPEL MJB, A. W. A. H. H. P. C. A. R. R. E. D. T. D. P. SW. Embolism recovery strategies and nocturnal water loss across species influenced by biogeographic origin. **Ecol Evol**, v. 9, p. 5348–5361, 2019.

ZHANG, J. L.; CAO, K. F. Stem hydraulics mediates leaf water status, carbon gain, nutrient use efficiencies and plant growth rates across dipterocarp species. **Functional Ecology**, v. 23, n. 4, p. 658–667, ago. 2009.

ZHAO, FANG-JIE; TAUSZ, MICHAEL; DE KOK, LUIT J. Role of Sulfur for Plant Production in Agricultural and Natural Ecosystems. *Sulfur Metabolism in Phototropic Organisms* (pp.417-435) Dordrecht: Springer Netherlands, 2008. p. 417-435.