

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA  
CÂMPUS DE JABOTICABAL**

**SILÍCIO NA MITIGAÇÃO DE ESTRESSE NUTRICIONAL DE  
FÓSFORO E DE DÉFICIT HÍDRICO EM MUDAS DE  
EUCALIPTO PROPAGADAS POR SEMENTES E POR  
MINIESTAQUIA**

**Eduarda Gonçalves Reis**

Engenheira Florestal

**2023**

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA  
CÂMPUS DE JABOTICABAL**

**SILÍCIO NA MITIGAÇÃO DE ESTRESSE NUTRICIONAL DE  
FÓSFORO E DE DÉFICIT HÍDRICO EM MUDAS DE EUCALIPTO  
PROPAGADAS POR SEMENTES E POR MINIESTASQUIA**

**Discente: Eduarda Gonçalves Reis**

**Orientador: Prof. Dr. Rinaldo Cesar de Paula  
Coorientador: Prof. Dr. Renato de Mello Prado**

Dissertação apresentada à Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias – UNESP, Campus de Jaboticabal, como parte das exigências para a obtenção do título de Mestra em Agronomia (Produção Vegetal).

**2023**

R375s

Reis, Eduarda Gonçalves

Silício na mitigação de estresse nutricional de fósforo e de déficit hídrico em mudas de eucalipto propagadas por sementes e por ministesquia / Eduarda Gonçalves Reis. -- Jaboticabal, 2023  
38 p. : tabs.

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista (Unesp),  
Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Jaboticabal

Orientador: Rinaldo Cesar de Paula

Coorientador: Renato de Mello Prado

1. Silvicultura. 2. Estresse hídrico. 3. Elemento benéfico. 4.  
Eucalyptus. 5. Corymbia citriodora. I. Título.

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp. Biblioteca da Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Jaboticabal. Dados fornecidos pelo autor(a).

Essa ficha não pode ser modificada.

**CERTIFICADO DE APROVAÇÃO**

**TÍTULO DA DISSERTAÇÃO:** SILÍCIO NA MITIGAÇÃO DE ESTRESSE NUTRICIONAL DE FÓSFORO E DE DÉFICIT HÍDRICO EM MUDAS E EUCALIPTO PROPAGADAS POR SEMENTES E POR MINISTESQUIA

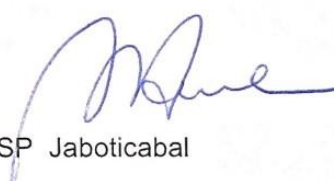
**AUTORA:** EDUARDA GONÇALVES REIS

**ORIENTADOR:** RINALDO CESAR DE PAULA

**COORIENTADOR:** RENATO DE MELLO PRADO

Aprovada como parte das exigências para obtenção do Título de Mestra em Agronomia (Produção Vegetal), pela Comissão Examinadora:

Prof. Dr. RINALDO CESAR DE PAULA (Participação Virtual)  
Departamento de Ciências da Produção Agrícola / FCAV UNESP Jaboticabal



Pesquisador Dr. PAULO HENRIQUE MÜLLER DA SILVA (Participação Virtual)  
Instituto de Pesquisa e Estudos Florestais (IPEF) / Piracicaba/SP



Prof. Dr. JONAS PEREIRA DE SOUZA JÚNIOR (Participação Virtual)  
Departamento de Ciências da Produção Agrícola / FCAV UNESP Jaboticabal



Documento assinado digitalmente  
JONAS PEREIRA DE SOUZA JUNIOR  
Data: 02/03/2023 09:13:01-0300  
Verifique em <https://verificador.iti.br>

Jaboticabal, 01 de março de 2023

## **DADOS CURRICULARES DA AUTORA**

**EDUARDA GONÇALVES REIS** - Nascida em Belém, Pará, Brasil em 15 de fevereiro de 1998, filha de Andréa da Silva Gonçalves e Lúcio Eduardo Solano Reis. Engenheira Florestal (2019) pela Universidade Federal Rural da Amazônia (UFRA) Câmpus Belém. Durante a graduação foi bolsista do programa de educação tutorial em Ciência do Solo (PET Solos). Em agosto de 2020, ingressou no curso de mestrado no Programa de pós-graduação em Agronomia (Produção Vegetal), da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” (UNESP), Câmpus Jaboticabal, sob orientação do Prof. Dr. Rinaldo de Cesar Paula e coorientação do Prof. Dr. Renato de Mello Prado.

À minha vó paterna, Maria da Conceição (*in memoriam*), que sempre acreditou em mim, foi uma luz em minha vida e um exemplo de amor e união, sempre lembrarei de todo seu apoio.

**Dedico**

## AGRADECIMENTOS

À Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias da Unesp, Câmpus de Jaboticabal, pela oportunidade de realizar o Mestrado e pela infraestrutura oferecida, e aos professores, por contribuírem com excelência para minha formação acadêmica.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo fornecimento da bolsa de estudos durante todo o curso de Mestrado.

Ao meu orientador Prof. Dr. Rinaldo de Cesar Paula, e ao meu coorientador Prof. Dr. Renato de Mello Prado, pelas contribuições e conhecimentos compartilhados durante a pós-graduação, por todo o apoio e ensinamentos acadêmicos e profissionais que me foram repassados.

Aos meus pais, Andréa e Lúcio, que mesmo longe estiveram ao meu lado durante este período e sempre me apoiaram nas realizações dos meus sonhos e também ao meu padrasto Fabiano e minha madrasta Sandra, aos meus irmãos Henrique e Manuella e as minhas avós Maria de Jesus e Maria da Conceição (*in memoriam*), que me inspiram a ser melhor a cada dia.

Aos amigos da UNESP, que fiz ao longo dessa caminhada, como a Arianis, Clebson, Gabrielly, Jamile, João, Kássia, Kleve, Laura, Marcilene, Mariana Bomfim, Mariana Dias, Maiqui, Vanessa e Victor, que de forma direta ou indireta, me ajudaram durante esta fase.

Agradeço aos colegas de laboratório, em especial a Bruna, que em diversos momentos me auxiliou de maneira importante na fase dos experimentos do mestrado.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

## SUMÁRIO

	<b>Página</b>
<b>RESUMO</b> .....	iii
<b>ABSTRACT</b> .....	iv
<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	1
<b>2. REVISÃO DE LITERATURA</b> .....	3
2.1. O papel do Fósforo (P) na nutrição de eucalipto .....	3
2.2. A deficiência hídrica e seus efeitos na cultura do eucalipto .....	4
2.3. O papel do Silício (Si) na nutrição de plantas .....	5
<b>3. MATERIAL E MÉTODOS</b> .....	6
3.1 Experimentos 1 e 2 .....	6
3.1.1 Condições de crescimento e material vegetal .....	6
3.1.2 Tratamentos e delineamento experimental .....	7
3.1.3 Avaliações .....	9
3.1.3.1 Altura e diâmetro .....	9
3.1.3.2 Eficiência do Fotossistema II .....	9
3.1.3.3 Índice de extravasamento de eletrólitos .....	9
3.1.3.4 Matéria seca .....	10
3.1.3.5 Determinação de P e Si .....	10
3.1.4 Análises estatísticas .....	10
3.2 Experimentos 3 e 4 .....	11
3.2.1 Avaliações .....	12
3.2.1.1 Altura, diâmetro, número de folhas e área foliar .....	12
3.2.1.2 Matéria seca .....	12
3.2.2 Análises estatísticas .....	13
<b>4 RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	13
4.1 Experimentos 1 e 2 - Formação de Mudanças .....	13
4.1.1 Altura e diâmetro .....	13
4.1.2 Eficiência do Fotossistema II .....	16
4.1.3 Índice de extravasamento de eletrólitos .....	17
4.1.4 Matéria seca .....	19

4.1.5 Acúmulo de silício (Si) .....	22
4.1.6 Acúmulo de fósforo (P) .....	23
4.2 Experimentos 3 e 4 - Desempenho de plantas de eucalipto sob deficiência hídrica em vasos .....	25
<b>5 CONCLUSÕES</b> .....	32
<b>6 REFERÊNCIAS</b> .....	33

## SILÍCIO NA MITIGAÇÃO DE ESTRESSE NUTRICIONAL DE FÓSFORO E DE DÉFICIT HÍDRICO EM MUDAS DE EUCALIPTO PROPAGADAS POR SEMENTES E POR MINISTESQUIA

**RESUMO** – A suficiência em fósforo (P) é essencial para a produção de mudas de eucalipto com reflexos no crescimento inicial no campo, mas em deficiência ou excesso, o P pode causar danos biológicos nas plantas. Uma estratégia para atenuar o estresse nutricional de P em mudas de eucalipto é o fornecimento do silício (Si). Esse estudo objetivou avaliar o efeito da nutrição com P associada à aplicação ou não de Si na formação de mudas de duas espécies de eucalipto e no desenvolvimento posterior em vasos sob duas condições hídricas. Quatro experimentos foram conduzidos. Os dois primeiros experimentos consistiram na formação de mudas em tubetes de 50 ml, sendo um com mudas propagadas por miniestaquia de *Eucalyptus grandis* X *E. urophylla*, e outro com mudas seminais de *Corymbia citriodora*. Esses experimentos foram conduzidos em delineamento de blocos ao acaso, em esquema fatorial 3 x 2 (3 concentrações de P: 0,1; 1,0 e 10 mmol L<sup>-1</sup> de P, correspondentes a 10%, 100% e 1000% de P com base na solução de Hoagland e Arnon, com ou sem a aplicação de 2 mmol L<sup>-1</sup> Si) com 5 repetições de 6 mudas. Os outros dois experimentos foram conduzidos com mudas de *C. citriodora* e de *E. grandis* X *E. urophylla* provenientes dos tratamentos de 10 e 100% das concentrações de P dos experimentos anteriores, na presença e ausência de Si, submetidas a dois níveis de disponibilidade hídrica no solo (30 e 60% da capacidade de retenção de água no solo – CRA). Esses experimentos foram conduzidos em vasos preenchidos com 8,5 Kg de solo. O delineamento experimental foi em blocos ao acaso, com seis repetições, em esquema fatorial 2 x 2 x 2 (mudas formadas com 10 e 100% da concentração de P x com ou sem adição de 2 mmol.L<sup>-1</sup> Si x 30% ou 60% da CRA). Para os dois primeiros experimentos de formação de mudas observou-se que: o aumento da concentração de P promoveu maior matéria seca da parte aérea, enquanto o fornecimento de Si aumentou a produção da matéria seca de raiz para *C. citriodora*; para o híbrido as plantas com fornecimento de Si aumentou a matéria seca das raízes e apresentou maior relação raiz-parte aérea; o fornecimento de Si promoveu aumento no acúmulo do elemento em todos os tratamentos, para a parte aérea o aumento da concentração de P aumentou o acúmulo de Si para *C. citriodora*; o Si é um elemento benéfico que ajuda a mitigar os efeitos da deficiência de P durante a formação de mudas de eucalipto. Nos experimentos desenvolvidos em vasos observou-se que: as plantas de *C. citriodora* e de *E. grandis* X *E. urophylla* foram prejudicadas pela deficiência hídrica, independentemente da dose de P e, ou Si na formação das mudas; o efeito positivo da adubação com P é dependente da boa disponibilidade hídrica, tendo favorecido o crescimento apenas quando não houve deficiência hídrica; a aplicação de Si, em geral, não afetou o desenvolvimento das plantas, mas em *C. citriodora* a aplicação de Si sob adequada disponibilidade hídrica favoreceu o acúmulo de matéria seca nas raízes.

**Palavras-chave:** Silvicultura, Elemento benéfico, *Eucalyptus*, *Corymbia citriodora*, estresse hídrico.

## **SILICON IN THE MITIGATION OF PHOSPHORUS NUTRITIONAL STRESS AND WATER DEFICIT IN EUCALYPTUS SEEDLINGS PROPAGATED BY SEEDS AND BY MINICUTTING**

**ABSTRACT** - Phosphorus (P) sufficiency is essential for the production of eucalyptus seedlings, with effects on initial growth in the field, but in deficiency or excess, P can cause biological damage to plants. A strategy to attenuate the nutritional stress of P in eucalyptus seedlings is the supply of silicon (Si). This study aimed to evaluate the effect of nutrition with P associated with or without application of Si on the formation of seedlings of two eucalyptus species and in subsequent development in pots under two water conditions. Four experiments were attended. The first and second experiments consisted of the formation of seedlings in 50 ml tubes, one with seedlings propagated by minicuttings of *Eucalyptus grandis* X *E. urophylla*, and the other with seminal seedlings of *Corymbia citriodora*. These experiments were carried out in a randomized block design, in a 3 x 2 factorial scheme (3 concentrations of P: 0.1; 1.0 and 10 mmol L<sup>-1</sup> of P, corresponding to 10%, 100% and 1000% of P based on Hoagland and Arnon's solution, with or without the application of 2 mmol L<sup>-1</sup> Si) with 5 replications of 6 seedlings. The experiments 3 and 4 were carried out with seedlings of *C. citriodora* and *E. grandis* X *E. urophylla* from the treatments of 10 and 100% of the P concentrations of the previous experiments, in the presence and absence of Si, submitted to two levels of availability soil water retention (30 and 60% of the soil water retention capacity – WRC). These experiments were conducted in pots filled with 8.5 kg of soil. The experimental design was randomized blocks, with six replications, in a 2 x 2 x 2 factorial scheme (seedlings formed with 10 and 100% of the P x concentration with or without the addition of 2 mmol.L<sup>-1</sup> Si x 30% or 60% of the WRC). For the two seedling formation experiments (experiment 1 and 2), it was observed that: the increase in P concentration promoted greater shoot dry matter, while the supply of Si increased root dry matter production for *C. citriodora*; for the hybrid, plants with Si supply showed higher root dry matter production and higher root-shoot ratio; the supply of Si promoted an increase in the accumulation of the element in all treatments, for the aerial part the increase in the concentration of P increased the accumulation of Si for *C. citriodora*; Si is a beneficial element that helps mitigate the effects of P deficiency during the formation of eucalyptus seedlings. In the experiments carried out in vases (experimente 3 and 4), it was observed that: the plants of *C. citriodora* and *E. grandis* X *E. urophylla* were harmed by water deficiency, regardless of the dose of P e, or Si in the formation of seedlings; the positive effect of fertilization with P is dependent on good water availability, favoring growth only when there was no water deficit; the application of Si, in general, did not affect the development of the plants, but in *C. citriodora* the application of Si under adequate water availability favored the accumulation of dry matter in the roots.

**Keywords** – Forestry, Beneficial element, *Eucalyptus*, *Corymbia citriodora*, hydric stress.

## 1. INTRODUÇÃO

As florestas comerciais de eucaliptos no Brasil ocupavam, no ano de 2021, 7,53 milhões de hectares, ou seja, 75,8% da área total com florestas plantadas com fins comerciais no país (IBÁ, 2022). O país se destaca no cenário mundial como maior exportador de celulose, assim, as plantações de eucalipto desempenham um papel importante na economia. As plantas de eucalipto incluem espécies dos gêneros *Eucalyptus* L'Hérit., *Corymbia* Hill e Johnson e *Angophora* Cav., sendo que os dois últimos, antes referidos anteriormente como subgêneros do primeiro, tornaram-se gêneros com base em estudos moleculares e de filogenia (Grattapaglia & Kirst 2008). A preferência pelo plantio de eucalipto se deve à boa capacidade de adaptação e produtividade dessas espécies quando manejadas adequadamente, além da possibilidade de diversificação de uso da madeira e da extração de óleos essenciais a partir das folhas de algumas espécies (IPEF, 2009).

O crescente consumo por madeira e seus derivados tem levado à expansão das áreas plantadas com florestas comerciais e, conseqüentemente, o aumento da produção de mudas. Todavia, existem desafios relacionados à renovação ou ampliação de novas áreas de plantio, dado que o aumento da produtividade pode afetar diretamente a qualidade dos solos, pois as rotações sucessivas ocasionam exportações dos nutrientes (Soares, 2019), caso não haja um monitoramento nutricional adequado nessas áreas. Para aumentar a capacidade produtiva da cultura do eucalipto é importante dar ênfase na fase de implantação, que depende diretamente da qualidade das mudas as quais devem ser vigorosas e resistentes aos estresses por época do plantio para propiciar boa sobrevivência e desenvolvimento inicial em campo (Rocha et al., 2013). Assim, uma nutrição adequada das mudas é imprescindível para o pleno estabelecimento das florestas.

Dessa forma, o sucesso dos cultivos florestais irá depender de diversos fatores, sendo a disponibilidade de água e de nutrientes uns dos principais, pois impactam diretamente na produtividade dos sistemas. O fósforo (P) é o nutriente que mais limita o crescimento das mudas de eucalipto em sua fase inicial (Graciano et al., 2006), sua aplicação adequada pode elevar a sobrevivência de mudas em campo em até 30% (Rocha et al., 2013). Esse nutriente apresenta funções estruturais e no metabolismo

da planta, em especial na atividade enzimática, fazendo parte do composto mais importante para armazenar e transportar energia (trifosfato de adenosina - ATP) e participando da fotossíntese (Faquin, 2005). A escassez desse elemento pode comprometer a formação e desenvolvimento das raízes (Schawambach et al., 2005) e, também, a atividade fotossintética (Güsewell, 2005), promovendo sintomas visuais nas plantas de eucalipto como coloração verde-escuro nas folhas mais velhas seguido de arroxamento e pontos necróticos (Silveira et al., 2002).

O desequilíbrio nutricional em plantas compromete a eficiência na utilização de nutrientes e água, prejudica a atividade fotossintética e aumenta a suscetibilidade à pragas e doenças. O fornecimento de silício (Si) pode amenizar esses e outros problemas advindos do desequilíbrio nutricional (Mello et al., 2016). Mesmo não sendo considerado um nutriente essencial às plantas, os benefícios da aplicação de Si têm sido constatados em diferentes culturas e, ou situações de estresses abióticos, como aqueles causados por seca, sais (Coskun et al., 2016) e por desequilíbrio nutricional (Kostic et al., 2017; Minden et al. 2021; Neu et al. 2017; Souza Junior et al., 2021).

Na cultura do trigo, por exemplo, o Si foi capaz de aliviar o estresse causado pela deficiência de P (Kostic et al., 2017) e aumentar a eficiência do uso de N e P (Neu et al., 2017). Em *Holcus lanatus* cultivado sob baixa disponibilidade de N e P, houve efeitos positivos do Si, especialmente, sob deficiência de P (Minden et al., 2021); e em mudas de eucalipto, o Si diminuiu os efeitos da deficiência ou toxicidade, causados por  $N-NH_4^+$  (Souza Junior et al., 2021). Ainda, os mecanismos de ação desse elemento têm relação com a redução do estresse oxidativo das células e tem efeito na biossíntese de compostos fenólicos, melhorando a fotossíntese e absorção de nutrientes (Cooke e Leishman, 2016).

Um outro estresse comum no momento do plantio das mudas de eucalipto no campo é o déficit hídrico. Estudos recentes indicam que as mudanças climáticas tendem a uma variação da precipitação e intensificação do déficit hídrico no mundo todo (Santos et al., 2017). Assim, essas mudanças geram um grande desafio para os plantios pois a restrição hídrica irá afetar diretamente o crescimento e a sobrevivência das mudas no campo. A adubação adequada e a aplicação do silício podem atenuar esse estresse pois atuam na manutenção do potencial hídrico foliar (Pei et al., 2010) e na redução do estresse oxidativo ao diminuir extravasamento de eletrólitos (Gong et

al., 2005) e também na transpiração das plantas (Farooq e Dietz, 2015), podendo assim aumentar a eficiência da fotossíntese. No entanto, esses benefícios do Si na atenuação do déficit hídrico durante o crescimento inicial do eucalipto são pouco conhecidos.

Há carência de informações sobre o efeito do Si na formação de mudas de eucalipto sob condição adequada ou de desequilíbrio nutricional mediado por P. Com isto, é oportuno avaliar se o Si proporciona melhor crescimento na fase inicial em mudas de eucalipto, mesmo na deficiência e, ou toxicidade de P. Ainda, se o Si fornecido na fase de formação de mudas, sob suficiência ou deficiência de P, mitiga os efeitos da deficiência hídrica após plantio em campo.

Assim, esse estudo objetivou avaliar o efeito da nutrição com fósforo associada à aplicação ou não de Si no crescimento e desenvolvimento de mudas de um híbrido de *Eucalyptus grandis* X *E. urophylla* e de *Corymbia citriodora* (Hook.) K.D.Hill & L. A. S. Johnson, bem como o crescimento dessas mudas pós-plantio sob deficiência hídrica em vasos.

## **2. REVISÃO DE LITERATURA**

### **2.1. O papel do Fósforo (P) na nutrição de eucalipto**

Mudas de qualidade são necessárias para conferir melhor resistência em campo e garantir o sucesso dos cultivos florestais. Com isso, a nutrição adequada, visando doses recomendadas de fertilizantes é imprescindível para proporcionar um crescimento e desenvolvimento adequados das plantas.

O fósforo (P) é um elemento essencial para as plantas, sendo absorvido na forma de  $H_2PO_4$  ou  $HPO_4$ . Exerce funções estruturais nos vegetais, fazendo parte de compostos orgânicos, como ATP (Adenosina trifosfato) e participando da transferência de energia para diversas sínteses dos vegetais, também participa de processos como a fotossíntese e respiração (Faquin, 2005).

Por participar dos principais processos metabólicos, a baixa disponibilidade desse nutriente pode inibir o crescimento vegetal e como consequência ocorrer distúrbios fisiológicos (López-Arredondo et al., 2014). Sob estresse nutricional por

deficiência de P as plantas podem apresentar mudanças na arquitetura do sistema radicular e alterações nos processos metabólicos (Jones et al., 2015), como no caso de algumas plantas que podem aumentar o crescimento do sistema radicular, no intuito de explorar de forma mais eficiente o P no solo (Niu et al., 2013).

Os cultivos de eucalipto apresentam uma boa resposta à fertilização de P, normalmente resultando em aumento da produtividade e quando esse nutriente é limitado as plantações apresentam sintomas de deficiência P (Thomas et al., 2006). Bahar et al. (2018) verificaram que espécies de eucalipto tiveram uma diminuição das taxas fotossintéticas e da respiração foliar e um crescimento reduzido devido a limitação de P.

Bulgarelli (2022) estudou diferentes espécies de eucalipto, que apresentaram respostas contrastantes em relação a baixa disponibilidade de P no solo, em que, determinadas espécies tiveram restrições de crescimento sob a limitação de P, todavia, houve uma resposta positiva para essas espécies conforme havia aumento da concentração de P no solo. Avaliando o crescimento e o uso do P de espécies de eucalipto sob baixo teor de P, Silva et al. (2022) observaram diferentes respostas, as quais podem estar relacionadas à genética de cada espécie estudada.

## **2.2. A deficiência hídrica e seus efeitos na cultura do eucalipto**

De acordo com os dados do IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) as mudanças climáticas já estão causando eventos climáticos extremos, dentre eles, a severidade das secas agrícolas, afetando diretamente os cultivos de plantas (IPCC, 2021). É necessário dar importância para estudos relacionados à seca, pois o fator hídrico é o que mais pode limitar a expressão do potencial genético das espécies florestais (Zhou et al., 2014).

Os impactos da deficiência hídrica são específicos de cada planta e variam dependendo do grau de estresse, podendo ocasionar alterações bioquímicas, fisiológicas e morfológicas, que afetam o crescimento e desenvolvimento dos vegetais (Ryan, 2011). Assim, essa limitação prejudica o ciclo de vida do vegetal, comprometendo a fotossíntese, respiração, metabolismo e absorção de íons (Martins et al., 2018). Portanto, entender as estratégias envolvidas na adaptação das espécies para esse estresse é tão importante quanto mitigar as mudanças climáticas.

O estresse hídrico pode causar baixa absorção e a exportação de nutrientes, visto que a água é limitante para o crescimento pois é o meio de contato íon-raiz (Taiz et al., 2017). A água tem sido indicada como o mais importante agente para o aumento da produtividade dos cultivos de eucalipto no Brasil (Stape et al., 2010).

As espécies de eucalipto apresentam diferentes desempenhos em relação ao estresse hídrico. Costa e Silva et al. (2004) constataram que clones tolerantes ao déficit hídrico conseguiram manter um potencial hídrico foliar adequado, além de apresentar maior biomassa, em relação ao clone suscetível. Rubilar et al. (2020) constataram que a disponibilidade hídrica adequada aumenta a sobrevivência, crescimento de árvores e área foliar das espécies de eucalipto.

Lopes et al. (2007) relataram um aumento da massa seca de plantas de *Eucalyptus grandis* na maior disponibilidade hídrica estudada por eles. Pereira et al. (2006) e Vellini et al. (2008) também encontraram resultados semelhantes, em que, a irrigação diária das mudas de eucalipto favoreceu o crescimento e desenvolvimento das plantas. Estudando *E. argophloia* e *E. cloeziana*, Ngugi et al. (2004) verificaram uma redução nas taxas de fotossíntese de 30 e 55%, respectivamente, em plantas sob baixa disponibilidade de água.

### **2.3. O papel do Silício (Si) na nutrição de plantas**

O silício é o segundo elemento mais abundante na crosta terrestre ocorrendo, principalmente, na forma de silicatos e quartzo, mas na solução do solo está na forma de ácido monossilício em baixas concentrações (Katz et al., 2021). É considerado um elemento benéfico para os vegetais, podendo melhorar o crescimento e produção de algumas culturas. Marschner (1995) classifica as espécies vegetais em três grupos de acordo com sua capacidade de absorver e acumular o silício, sendo: acumuladoras, não acumuladoras e intermediárias.

O Si é absorvido na forma de  $H_4SiO_4$  de forma passiva (Jones e Handreck, 1967). Porém, nem todo vegetal é capaz de absorver e/ou acumular o silício, as espécies de eucalipto, por exemplo, foram classificadas por Carvalho et al. (2003) como não acumuladoras, todavia, alguns estudos demonstram que mesmo as

espécies classificadas como não acumuladoras podem apresentar efeitos benéficos com a absorção do elemento (Mateus et al., 2017; Navas et al., 2016).

Esse elemento pode ser usado para aumentar a rigidez celular, melhorar a arquitetura foliar, favorecer a fotossíntese, aumentar a resistência para doenças e pragas (Farooq e Dietz, 2015; Ma e Yamaji, 2006; Ma e Yamaji, 2015). De maneira geral, vários autores apresentam os benefícios do uso do silício para os vegetais, o qual pode aumentar a resistência aos estresses bióticos e abióticos (Queiroz et al., 2018). O Si atua na parte bioquímica, fisiológica e física, aumentando a capacidade de tolerância ao déficit hídrico, realizando ajuste osmótico e reduzindo o estresse oxidativo (Farooq e Dietz, 2015). É incorporado principalmente nas paredes celulares, das células epidérmicas, estômatos e tricomas (Mitani e Ma, 2005).

Carvalho et al. (2003), estudando a absorção de Si em mudas de eucalipto, verificaram que a eficiência da translocação é maior na fase inicial e que embora seja responsiva a absorção de Si, a maior parte fica acumulada no sistema radicular da planta. Duarte e Coelho (2011) verificaram que o eucalipto foi capaz de absorver e acumular uma quantidade considerável de Si ( $0,23 \text{ dag.kg}^{-1}$ ). De acordo com Pinto et al. (2009), o Si reduz os efeitos negativos de metais pesados como Zn no crescimento de espécies de eucalipto e ainda proporciona um aproveitamento mais eficiente de macronutrientes como P, Ca, Mg e S.

### **3. MATERIAL E MÉTODOS**

O presente trabalho foi desenvolvido em quatro experimentos.

#### **3.1 Experimentos 1 e 2 – Formação de Mudas**

##### **3.1.1 Condições de crescimento e material vegetal**

Dois experimentos de produção de mudas de eucalipto foram conduzidos em casa de vegetação na Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, campus Jaboticabal, Brasil. Durante o período experimental foram monitorados, no

interior da casa de vegetação, os valores de umidade relativa do ar (%) e temperatura (°C), com auxílio de um termohigrômetro digital (Figura 1).

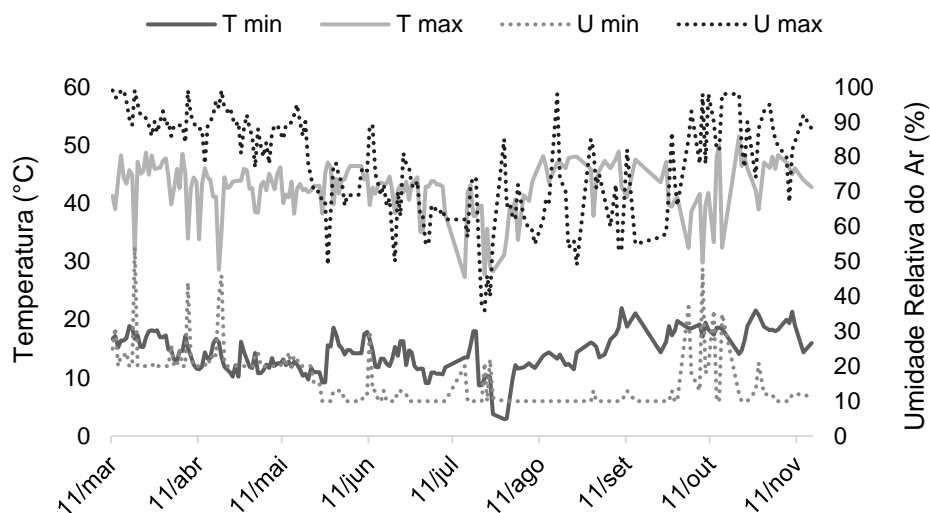


Figura 1. Temperatura máxima (T max) e mínima (T min) e umidade relativa do ar máxima (U max) e mínima (U min) na casa de vegetação entre os meses de março e novembro de 2021, correspondentes ao período de condução dos experimentos 1 e 2.

O primeiro experimento, com duração de 100 dias, foi realizado entre março e junho de 2021, com mudas clonadas (propagadas por miniestaquia) de um híbrido de *Eucalyptus grandis* X *E. urophylla*. O segundo experimento foi desenvolvido com mudas seminais de *Corymbia citriodora* (Hook.) K.D.Hill & L. A. S. Johnson, e teve duração de 72 dias entre os meses de agosto e novembro de 2021. O substrato usado para a formação das mudas foi vermiculita de granulometria fina, acondicionada em tubetes de plástico rígido com capacidade para 55 cm<sup>3</sup>.

### 3.1.2 Tratamentos e delineamento experimental

Cada experimento foi composto por 6 tratamentos, dispostos em esquema fatorial 3 x 2 resultantes da combinação de três concentrações de fósforo (P) na ausência ou presença de silício (Si). As concentrações de P, sendo a fonte KH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>, consideradas como deficiente, adequada e alta, correspondentes a 10%, 100% e

1000% da concentração da solução nutritiva de Hoagland e Arnon (1950) (Tabela 1) foram combinadas com a presença ( $2 \text{ mmol L}^{-1}$  Si) e ausência de silício, cuja fonte foi o silicato de sódio, aplicado via solução nutritiva. Os tratamentos foram dispostos em delineamento de blocos ao acaso, com 5 repetições e a unidade experimental foi constituída por seis tubetes com uma planta.

Tabela 1. Composição das soluções nutritivas utilizadas nos tratamentos de P, com dose adequada, deficiente e alta

Fontes mol L <sup>-1</sup>	Tratamento		
	Adequada (100%)	Deficiente (10%)	Alta (1000%)
	mmol L <sup>-1</sup>		
KH <sub>2</sub> PO <sub>4</sub>	1	0,1	5
KNO <sub>3</sub>	5	-	5
Ca (NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> . 5H <sub>2</sub> O	5	5	5
MgSO <sub>4</sub>	2	2	2
KCl	4	9,9	-
NH <sub>4</sub> NO <sub>3</sub>	-	2,5	-
	μmol L <sup>-1</sup>		
H <sub>3</sub> BO <sub>3</sub>	46	46	46
MnCl <sub>2</sub> . 4H <sub>2</sub> O	14	14	14
ZnCl <sub>2</sub>	0,7	0,7	0,7
CuCl <sub>2</sub>	0,3	0,3	0,3
H <sub>2</sub> MoO <sub>4</sub> H <sub>2</sub> O	0,1	0,1	0,1
Fe-EDDHA	9	9	9

A rega foi realizada diariamente, de forma manual, com a aplicação de 10 ml da solução nutritiva, de acordo com o tratamento, e 5 ml de água deionizada, para controle da salinidade. Na primeira semana a solução foi fornecida a 25% da concentração indicada, na segunda semana a concentração foi elevada para 50% e na terceira semana para 75%, sendo essa concentração mantida até o fim do experimento.

Para efeitos de balanceamento da solução nutritiva, foi adicionado KCl nas soluções de 10 e 100% de P para garantir que a concentração de K fosse consistente nos tratamentos em razão da maior concentração no tratamento de 1000%. Em relação ao balanceamento do sódio, nos tratamentos com ausência de Si esse elemento também foi adicionado na forma de NaCl. Previamente à rega, o pH da solução era ajustado entre 5,5 e 6,5 utilizando solução de HCl a  $1 \text{ mol L}^{-1}$  e de NaOH

a 1 mol L<sup>-1</sup>. Para evitar a perda da solução aplicada, para cada tratamento, foram posicionadas bandejas no fundo dos tubetes.

### **3.1.3 Avaliações**

Ao final de cada experimento foram avaliados:

#### **3.1.3.1 Altura e diâmetro**

O diâmetro do colo foi mensurado com um paquímetro digital (0,01 mm) e a altura, com régua graduada em mm, sendo considerada a altura o comprimento desde a base do caule até a base da última folha.

#### **3.1.3.2 Eficiência do Fotossistema II**

Foi utilizado um fluorômetro (modelo OS-30p, Opti-Sciences) para medição da eficiência quântica do fotossistema II (PSII). Essas avaliações foram realizadas na segunda folha completamente desenvolvida, no período de 7 h às 8 h.

#### **3.1.3.3 Índice de extravasamento de eletrólitos**

O método utilizado foi de acordo com Dionisio-Sese e Tobita (1998), coletando três discos foliares (129 mm<sup>2</sup> cada) da segunda folha completamente desenvolvida. Os discos foram colocados em um becker com 20 ml de água deionizada por 2 horas à temperatura ambiente. Após esse período, com auxílio de um condutímetro de bancada, foi realizada a leitura da condutividade elétrica da solução (EC1). As amostras foram colocadas em autoclave a 120 °C, por 20 minutos, posteriormente feita outra leitura da condutividade elétrica (EC2). O extravasamento de eletrólitos foi definido por meio da seguinte fórmula:  $(EC1/EC2) \times 100$ .

#### **3.1.3.4 Matéria seca**

Para as determinações da matéria seca da parte aérea (MSPA), matéria seca da raiz (MSR) e matéria seca total (MST) as plantas foram seccionadas na região de transição da raiz-parte aérea e acondicionadas separadamente em sacos de papel tipo kraft e submetidas à secagem em estufa de circulação forçada de ar a 65 °C até massa constante. Após a secagem, as amostras foram pesadas em balança analítica (0,001g). A MST foi determinada pela soma da MSPA e MSR; também determinou-se a relação raiz-parte aérea (RPA) pela divisão da MSR pela MSPA.

#### **3.1.3.5 Determinação de P e Si**

Amostras da parte aérea e de raízes, separadamente, foram lavadas em água deionizada, detergente a 0,1% e solução de ácido clorídrico a 0,3% e submetidas à secagem em estufas a 65 °C até atingir massa constante e, posteriormente, moídas para a realização das análises. Para o silício, a extração foi realizada conforme método descrito por Kraska e Breitenbeck (2010) e quantificado de acordo com Korndörfer et al. (2004), em espectrofotômetro a 410 nm. Com os dados do teor de Si, da massa seca da parte aérea e da raiz obteve-se o acúmulo de Si nos dois órgãos das plantas. O teor de P na parte aérea e raiz foi determinado conforme Bataglia et al. (1983). Com os teores de P e da massa seca da parte aérea e raízes, foi calculado o acúmulo desse nutriente nesses componentes.

#### **3.1.4 Análise estatística**

Os dados foram submetidos à análise de variância (ANOVA), Teste F e comparação de médias pelo teste Tukey ( $p < 0,05$ ) utilizando o programa estatístico AgroEstat® (Barbosa e Maldonado Jr., 2010).

### 3.2. Experimentos 3 e 4 – Desempenho de plantas de eucalipto sob deficiência hídrica em vasos

Dois experimentos foram realizados em casa de vegetação na Universidade Estadual Paulista “Júlio Mesquita Filho”, campus Jaboticabal, Brasil. Foram monitorados os valores de temperatura (°C) e umidade relativa do ar (%) diariamente com auxílio de um termohigrômetro digital, no interior da casa de vegetação (Figura 2).

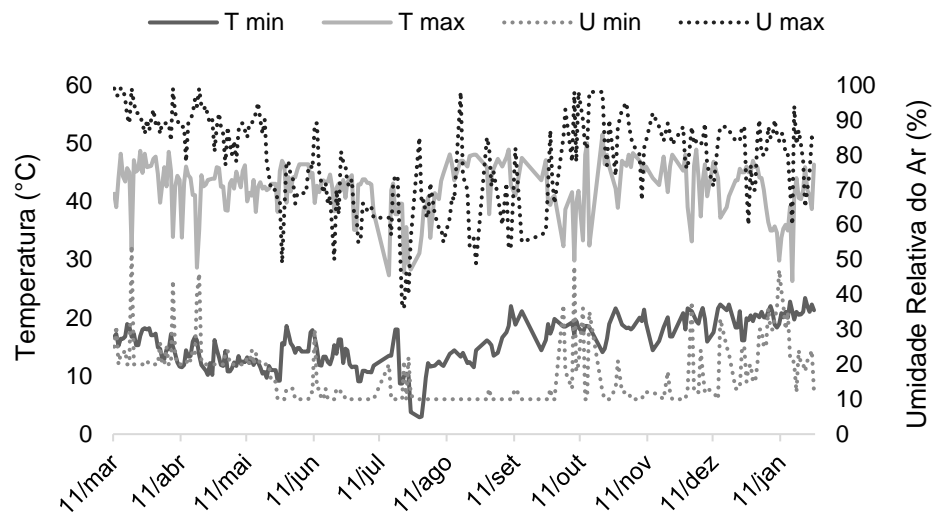


Figura 2. Temperatura máxima (T max) e mínima (T min) e umidade relativa do ar máxima (U max) e mínima (U min) na casa de vegetação entre os meses de junho de 2021 e janeiro de 2022, correspondentes ao período de condução dos experimentos 3 e 4.

Foram utilizadas as mudas de *C. citriodora* e do híbrido de eucalipto provenientes dos tratamentos de 10 e 100% das concentrações de P dos experimentos anteriores (1 e 2), na presença e ausência de Si. O período experimental foi de junho a outubro de 2021 (119 dias) e novembro de 2021 a janeiro de 2022 (78 dias) para as mudas do híbrido e de *C. citriodora*, respectivamente. As mudas foram plantadas em vasos preenchidos com 8,5 Kg de Latossolo Vermelho Distrófico coletado na camada de 0-20 cm de profundidade da região de Jaboticabal (SP). Realizou-se análise química de uma amostra do solo para fins de fertilidade seguindo método descrito por Raij et al. (1997) apresentando os seguintes resultados: pH CaCl<sub>2</sub>= 6,2; M.O=4 g dm<sup>-3</sup> ; P = 4 mg dm<sup>-3</sup>; S=23 mg dm<sup>-3</sup> ; Ca= 20 mmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup> ; Mg=

6 mmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>; K= 0,9 mmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>; Al = 0; H+Al= 10 mmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>; SB (soma de bases)= 26,6 mmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>; T (capacidade de troca catiônica)= 36,8 mmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>; V=72%, m=0%.

O delineamento experimental foi em blocos ao acaso, com seis repetições. Cada experimento com esquema fatorial 2 x 2 x 2, sendo utilizadas as mudas formadas com 10 e 100% da concentração de P da solução completa de Hoagland x com ou sem adição de Si x em dois níveis de disponibilidade hídrica no solo (30 e 60% da capacidade de retenção de água no solo – CRA). Para manter o CRA de cada tratamento era realizada, diariamente, o método da pesagem dos vasos, em que a água evapotranspirada era repostada.

### **3.2.1 Avaliações**

#### **3.2.1.1 Altura, diâmetro, número de folhas e área foliar**

Ao final do experimento foi medida a altura e o diâmetro das plantas. Para a altura foi considerado o comprimento desde a base até a base do último lançamento de folhas, utilizando uma régua graduada em mm. O diâmetro foi aferido com auxílio de paquímetro digital, sendo medido a 5 cm da base do caule. O número de folhas foi determinado por contagem. A área foliar foi determinada com um medidor de área foliar Li-Cor 3000.

#### **3.2.1.2 Matéria seca**

Ao final dos experimentos, as plantas foram cortadas e separadas em raiz, caule e folhas, o material vegetal foi seco em estufa de circulação forçada de ar a 65 °C, até obter massa constante, posteriormente realizada a pesagem da massa seca de cada parte do vegetal em balança analítica. Determinou-se a matéria seca das folhas (MSF), matéria seca do caule (MSC), matéria seca da parte aérea (MSPA), matéria seca da raiz (MSR), matéria seca total (MST) e relação raiz/parte aérea (RPA). A MST foi calculada pela soma da MSPA + MSR e a RPA pela divisão da MSR pela MSPA.

### 3.2.2 Análise estatística

Os dados foram submetidos à análise de variância, Teste F e comparação de médias pelo teste de Tukey ( $p < 0,05$ ), por meio do software estatístico Sisvar (Ferreira, 2011).

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 Experimentos 1 e 2 - Formação de Mudanças

#### 4.1.1 Altura e diâmetro

Para o diâmetro do coleto não houve interação entre os níveis de P e de Si para *C. citriodora* (Figura 3). Os tratamentos que receberam Si proporcionaram maior diâmetro em comparação aos que o Si não foi fornecido. Para as doses de fósforo, o tratamento com a dose adequada (100%) proporcionou maior diâmetro que a dose 10% P, não havendo, porém, diferenças entre essa dose e a dose alta (1000%).

O híbrido não apresentou interação entre os níveis de P e de Si (Figura 4), os tratamentos com 10% e 100% de P proporcionaram maiores diâmetros com a aplicação de Si.

Para altura das mudas de *C. citriodora* e do híbrido de eucalipto, a interação entre os níveis de P e de Si foi não significativa ( $P > 0,05$ ) (Figuras 5 e 6). Para ambas as espécies a altura foi afetada pelas doses de fósforo, sendo maior com o aumento das doses de P, por outro lado, não houve efeito do fornecimento de Si.

Por desempenhar um papel importante para vários processos metabólicos da planta o fósforo pode ser um nutriente limitante para o seu crescimento. Niu et al. (2015) estudando mudas de *E. dunnii* e *C. Citriodora*, obtiveram resultados semelhantes, em que a altura das mudas foi menor nas concentrações mais baixas de P, correspondentes a 0 e 0,01 mM de P. A deficiência desse nutriente pode reduzir a divisão e alongamento celular, causando redução do crescimento vegetal.

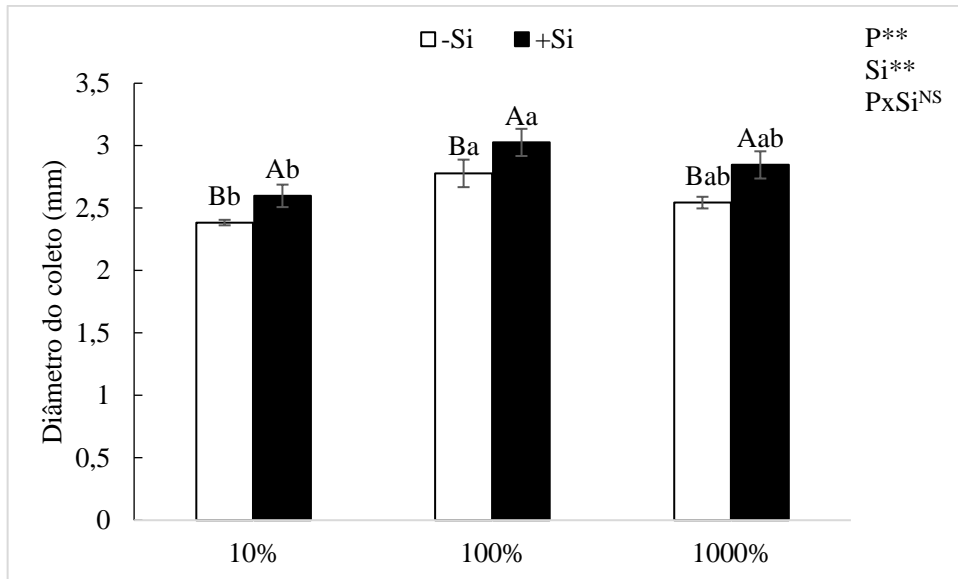


Figura 3. Diâmetro do coleto das mudas de *Corymbia citriodora* na ausência (-Si) e presença de Si (+Si), em três níveis de P. Médias seguidas pela mesma letra, minúsculas para os níveis de P e maiúsculas para presença e ausência de Si, não diferem entre si pelo teste de Tukey ( $P > 0,05$ ). \*\* e \*: valor significativo ( $P < 0,01$  e  $P < 0,05$ , respectivamente). <sup>NS</sup>: valor não significativo ( $P > 0,05$ ). As barras representam o erro padrão da média.

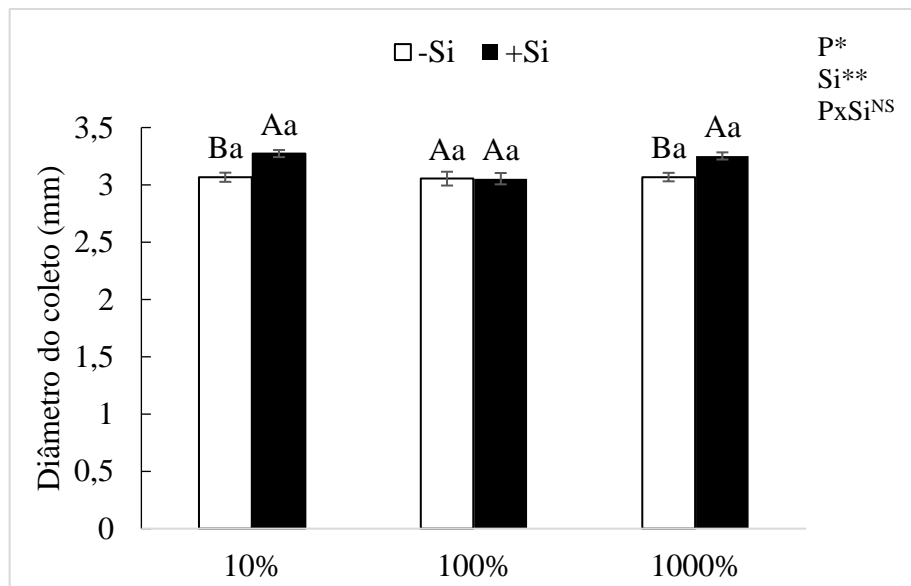


Figura 4. Diâmetro do coleto das mudas do híbrido de *Eucalyptus grandis* X *E. urophylla* na ausência (-Si) e presença de Si (+Si), em três níveis de P. Médias seguidas pela mesma letra, minúsculas para os níveis de P e maiúsculas para presença e ausência de Si, não diferem entre si pelo teste de Tukey ( $P > 0,05$ ). \*\* e \*: valor significativo ( $P < 0,01$  e  $P < 0,05$ , respectivamente). <sup>NS</sup>: valor não significativo ( $P > 0,05$ ). As barras representam o erro padrão da média.

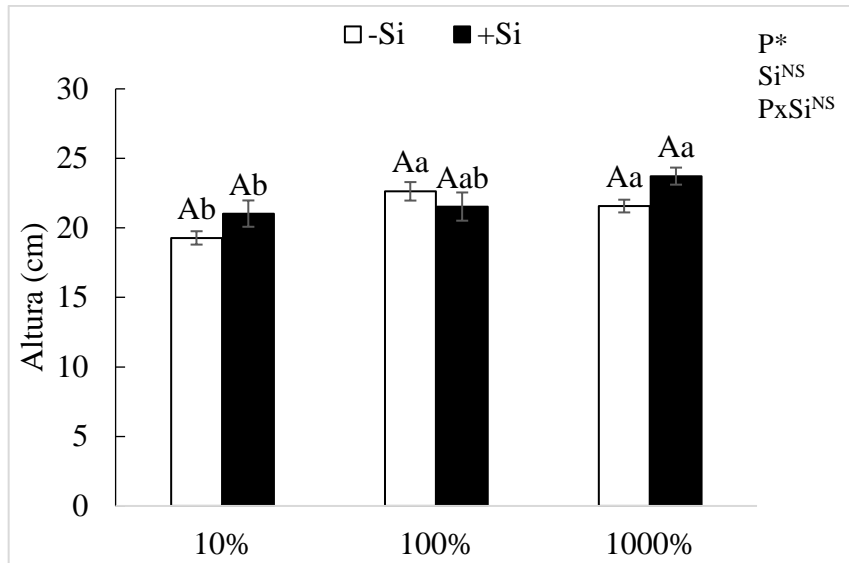


Figura 5. Altura das mudas de *Corymbia citriodora* na ausência (-Si) e presença de Si (+Si), em três níveis de P. Médias seguidas pela mesma letra, minúsculas para os níveis de P e maiúsculas para presença e ausência de Si, não diferem entre si pelo teste de Tukey ( $P > 0,05$ ). \*\* e \*: valor significativo ( $P < 0,01$  e  $P < 0,05$ , respectivamente). <sup>NS</sup>: valor não significativo ( $P > 0,05$ ). As barras representam o erro padrão da média.

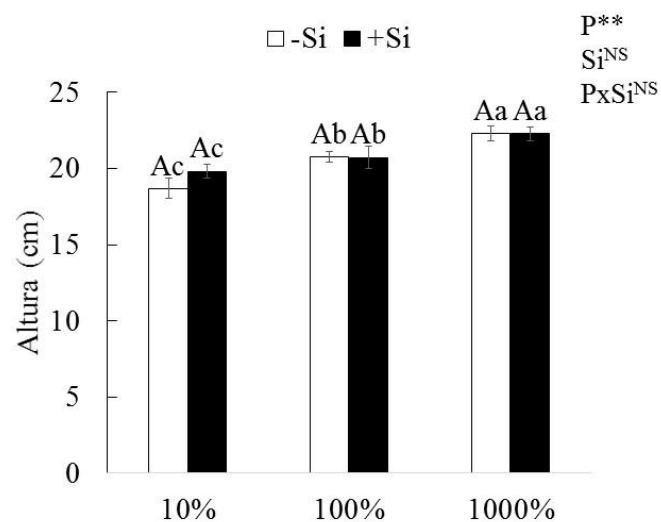


Figura 6. Altura das mudas do híbrido de *Eucalyptus grandis* X *E. urophylla* na ausência (-Si) e presença de Si (+Si), em três níveis de P. Médias seguidas pela mesma letra, minúsculas para os níveis de P e maiúsculas para presença e ausência de Si, não diferem entre si pelo teste de Tukey ( $P > 0,05$ ). \*\* e \*: valor significativo ( $P < 0,01$  e  $P < 0,05$ , respectivamente). <sup>NS</sup>: valor não significativo ( $P > 0,05$ ). As barras representam o erro padrão da média.

#### 4.1.2 Eficiência do Fotossistema II

A eficiência do fotossistema II apresentou interação significativa entre os níveis de P e de Si. Para o tratamento com 10% da dose de P em mudas de *C. citriodora*, que não receberam Si a eficiência foi reduzida em relação aos tratamentos com fornecimento (Figura 7). De acordo com Silva et al. (2015) a diminuição dessa eficiência pode ser considerada como indicativo de plantas submetidas a estresses abióticos.

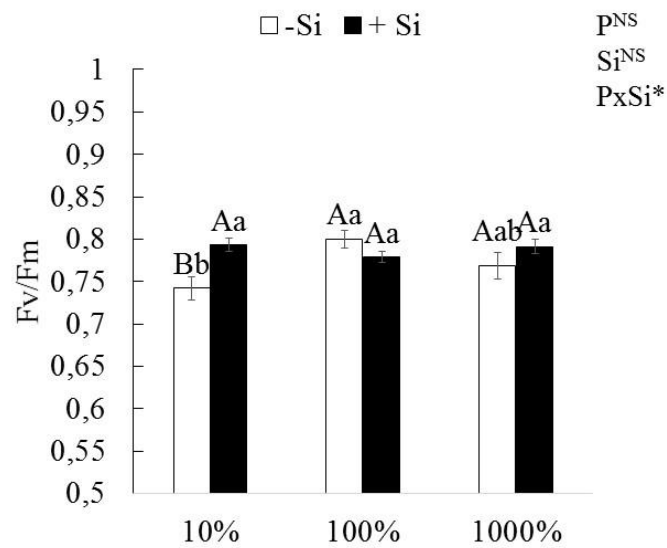


Figura 7. Eficiência quântica do FSII ( $F_v/F_m$ ) em mudas de *Corymbia citriodora* na ausência (-Si) e presença de Si (+Si), em três níveis de P. Médias seguidas pela mesma letra, minúsculas para os níveis de P e maiúsculas para presença e ausência de Si, não diferem entre si pelo teste de Tukey ( $P > 0,05$ ), \*: valor significativo ( $P < 0,05$ ). NS: valor não significativo ( $P > 0,05$ ). As barras representam o erro padrão da média.

A presença de Si preservou a relação  $F_v/F_m$  nos demais tratamentos em relação ao tratamento com a dose adequada de P (100% de P). Isso indica o efeito benéfico do Si para a eficiência do fotossistema II, contribuindo para as reações de assimilação de carbono (Ma e Takahashi, 2002). De acordo com Etesami e Jeong (2018) o Si pode aumentar indiretamente a relação  $F_v/F_m$ , atuando no controle de alterações físico-químicas, assim sugere-se que o incremento de silício exerce um efeito protetor nos centros de reação do PSII, visto que a maior parte da radiação está sendo utilizada

na fase fotoquímica da fotossíntese (Verma et al., 2021), assim, prevenindo a formação excessiva de espécies reativas de oxigênio (ERO).

Para as mudas do híbrido a interação Pi x Si foi não significativa, no entanto as mudas que receberam doses adequadas e altas de P apresentaram maior eficiência do fotossistema II (Figura 8), constatando a importância da nutrição adequada de P para garantir um bom desenvolvimento inicial das mudas.

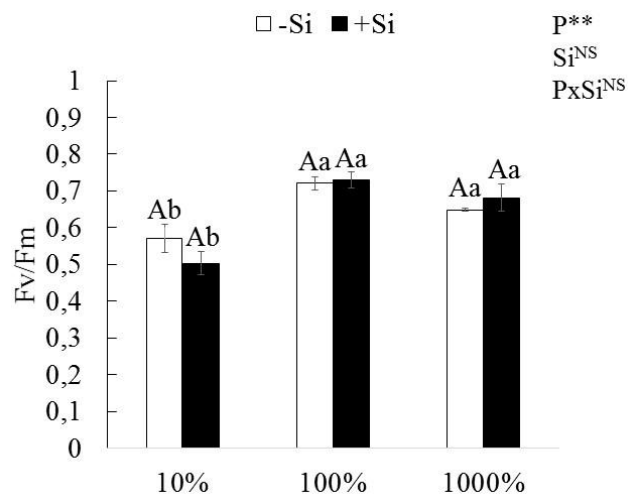


Figura 8. Eficiência quântica do FSII (Fv/Fm) em mudas de um híbrido de *Eucalyptus grandis* X *E. urophylla* na ausência (-Si) e presença de Si (+Si), em três níveis de P. Médias seguidas pela mesma letra, minúsculas para os níveis de P e maiúsculas para presença e ausência de Si, não diferem entre si pelo teste de Tukey ( $P > 0,05$ ). \*\*: valor significativo ( $P < 0,01$ ). NS: valor não significativo ( $P > 0,05$ ). As barras representam o erro padrão da média.

#### 4.1.3 Índice de extravasamento de eletrólitos

O índice de extravasamento para mudas de *C. citriodora* foi afetado pela quantidade de P fornecida, em que a menor (10%) e maior (1000%) concentração proporcionaram maiores valores (Figura 9). Para o híbrido não houve interação e nem efeito dos níveis de P na presença e ausência do silício (Figura 10). O P é fundamental no metabolismo das plantas, baixas concentrações desse nutriente podem implicar diretamente no crescimento e desenvolvimento do vegetal. Plantas com baixos teores de P podem apresentar o aumento da taxa de extravasamento de eletrólitos, devido

ao aumento da produção de espécies reativas de oxigênio, degradando a membrana celular (Araújo et al., 2022).

A redução do estresse oxidativo contribui para a proteção da integridade celular e para o aumento do conteúdo de pigmentos fotossintéticos como clorofila e carotenoides (Camargo et al., 2019), o que impacta positivamente na manutenção de uma elevada eficiência fotoquímica, como observado para mudas com teores adequados de P.

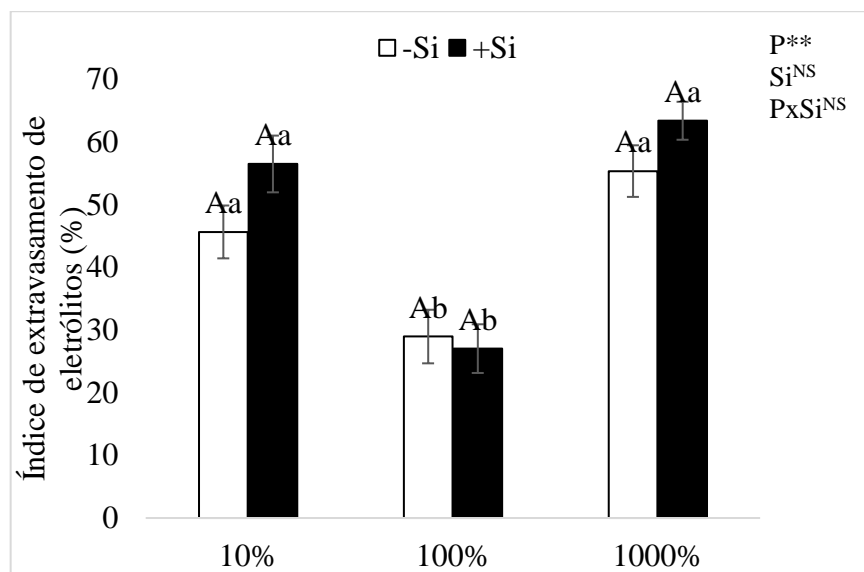


Figura 9. Índice de extravasamento de eletrólitos em mudas de *Corymbia citriodora* na ausência (-Si) e presença de Si (+Si), em três níveis de P. Médias seguidas pela mesma letra, minúsculas para os níveis de P e maiúsculas para presença e ausência de Si, não diferem entre si pelo teste de Tukey ( $P < 0,05$ ). \*\*: valor significativo ( $P < 0,01$ ). <sup>NS</sup>: valor não significativo ( $P < 0,05$ ). As barras representam o erro padrão da média.

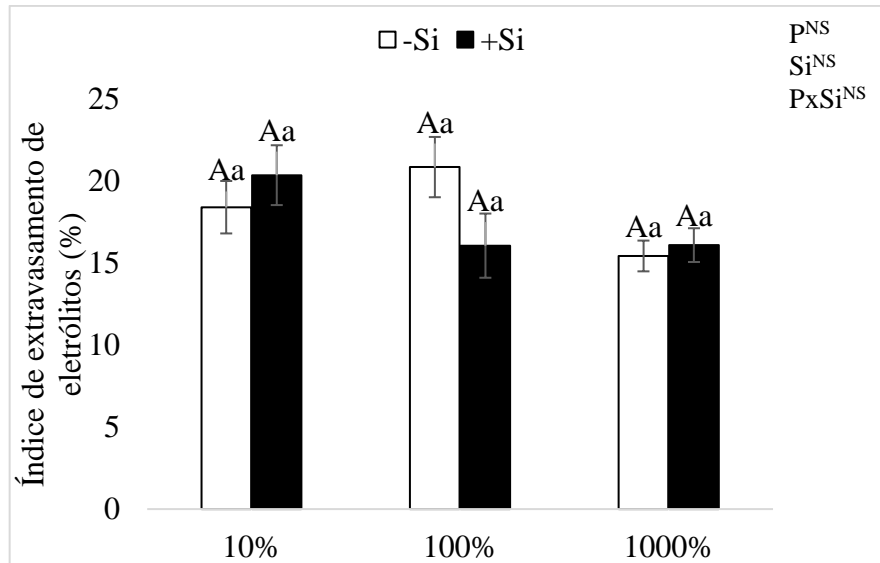


Figura 10. Índice de extravasamento de eletrólitos em mudas de um híbrido de *Eucalyptus grandis* X *E. urophylla* na ausência (-Si) e presença de Si (+Si), em três níveis de P. Médias seguidas pela mesma letra, minúsculas para os níveis de P e maiúsculas para presença e ausência de Si, não diferem entre si pelo teste de Tukey ( $P < 0,05$ ). \*\*: valor significativo ( $P < 0,01$ ). <sup>NS</sup>: valor não significativo ( $P < 0,05$ ). As barras representam o erro padrão da média.

#### 4.1.4 Matéria seca

A produção de matéria seca da parte aérea (MSPA), raiz (MSR) e total (MST) e relação raiz/parte aérea (RPA) não apresentaram interação entre os níveis de P e de Si para *C. citriodora* (Figura 11). O aumento da concentração de P promoveu maior matéria seca da parte aérea, enquanto o fornecimento de Si aumentou a produção da matéria seca de raiz, em comparação aos tratamentos sem fornecimento.

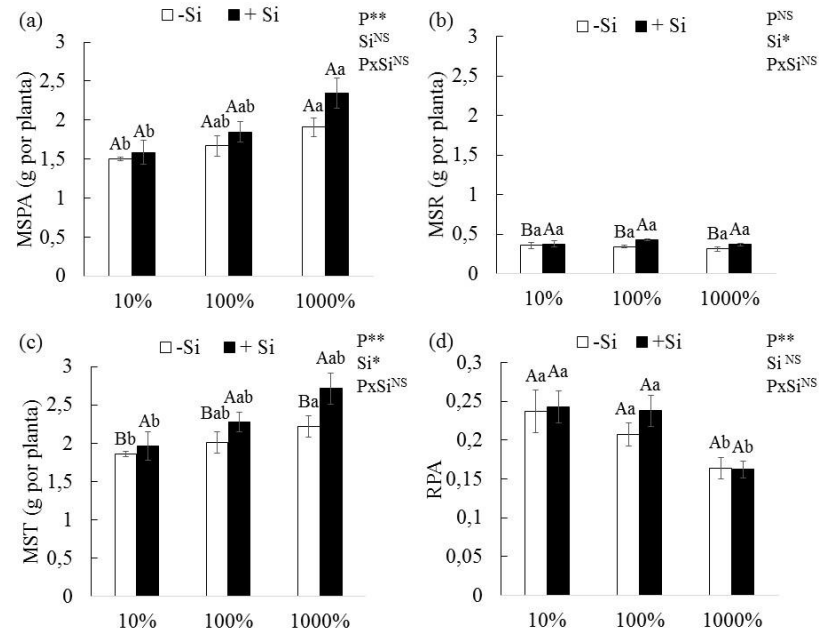


Figura 11. Matéria seca parte aérea (a), matéria seca de raízes (b), matéria seca total (c) e relação raiz/parte aérea (d) em mudas de *Corymbia citriodora* na ausência (-Si) e presença de Si (+Si), em três níveis de P. Médias seguidas pela mesma letra, minúsculas para os níveis de P e maiúsculas para presença e ausência de Si, não diferem entre si pelo teste de Tukey ( $P > 0,05$ ). \*\* e \*: valor significativo ( $P < 0,01$  e  $P < 0,05$ , respectivamente). <sup>NS</sup>: valor não significativo ( $P > 0,05$ ). As barras representam o erro padrão da média.

A matéria seca da parte aérea, raiz e total e relação raiz parte não apresentaram interação entre os níveis de P e de Si para o híbrido (Figura 12). As plantas sem fornecimento de Si apresentaram menor produção de matéria seca das raízes e a relação raiz-parte aérea foi maior nos tratamentos com a presença do elemento benéfico.

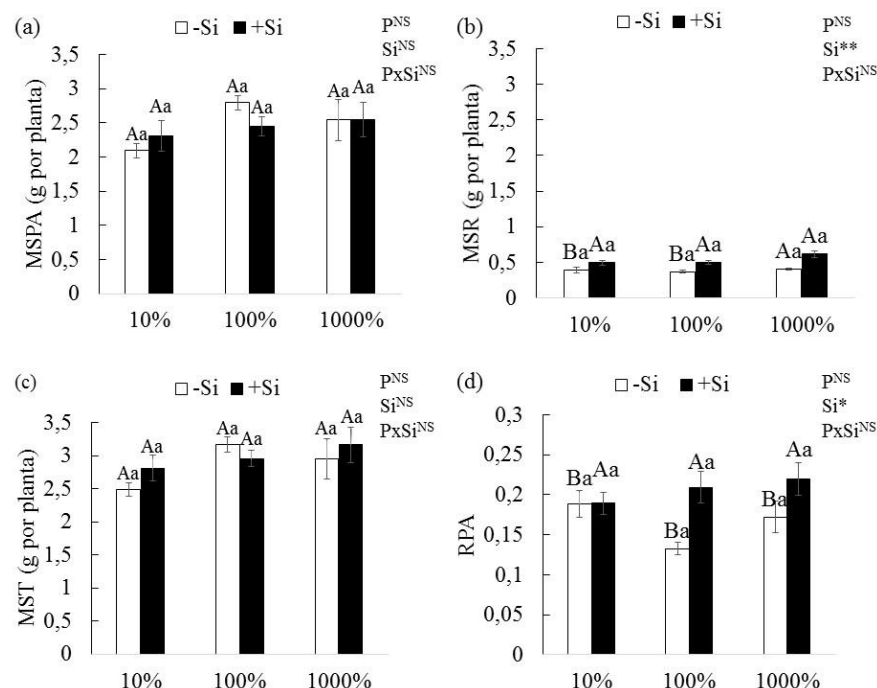


Figura 12. Matéria seca parte aérea (a), matéria seca raiz (b), matéria seca total (c) e relação raiz/parte aérea (d) em mudas de um híbrido de *Eucalyptus grandis* X *E. urophylla* na ausência (-Si) e presença de Si (+Si), em três níveis de P. Médias seguidas pela mesma letra, minúsculas para os níveis de P e maiúsculas para presença e ausência de Si, não diferem entre si pelo teste de Tukey ( $P > 0,05$ ). \*\* e \*: valor significativo ( $P < 0,01$  e  $P < 0,05$ , respectivamente). NS: valor não significativo ( $P > 0,05$ ). As barras representam o erro padrão da média.

O efeito benéfico do Si foi perceptível mesmo em plantas com as doses adequadas de P. Para ambas as espécies, o maior acúmulo de Si promovido pelo fornecimento do elemento teve efeito positivo nas raízes, devido a maior produção de matéria seca nesses tratamentos, podendo melhorar o crescimento dessas mudas.

A absorção do elemento pode favorecer a atividade fotossintética e atenuar possíveis danos na arquitetura das raízes e folhas, como constatado para a cultura do eucalipto por Souza Junior et al. (2021). Neste experimento, a absorção de Si em mudas deficientes em P para *C. citriodora* apresentaram melhora na atividade fotossintética, pois o Si contribuiu para a diminuição dos danos aos centros de reação do fotossistema II, melhorando a utilização da radiação solar pela planta (Verma et al., 2021)

Carvalho et al. (2003) constataram que a maior parte do silício absorvido por mudas de eucalipto fica retida nas raízes das plantas, podendo corroborar que a deposição de Si pode promover melhorias na estrutura vegetal, sendo uma das ações benéficas desse elemento. Estudos como de Mateus et al. (2017) verificaram que dependendo da dose de Si aplicada, a taxa de matéria seca em mudas de eucalipto pode apresentar um aumento de 28% em comparação ao tratamento controle.

#### 4.1.5 Acúmulo de silício (Si)

Os resultados obtidos demonstram interação entre os níveis de P e de Si para *C. citriodora* no acúmulo de Si na parte aérea e raiz da planta (Figura 13). O fornecimento de Si promoveu aumento no acúmulo do elemento em todos os tratamentos, sendo que para a parte aérea o aumento da concentração de P aumentou o acúmulo de Si.

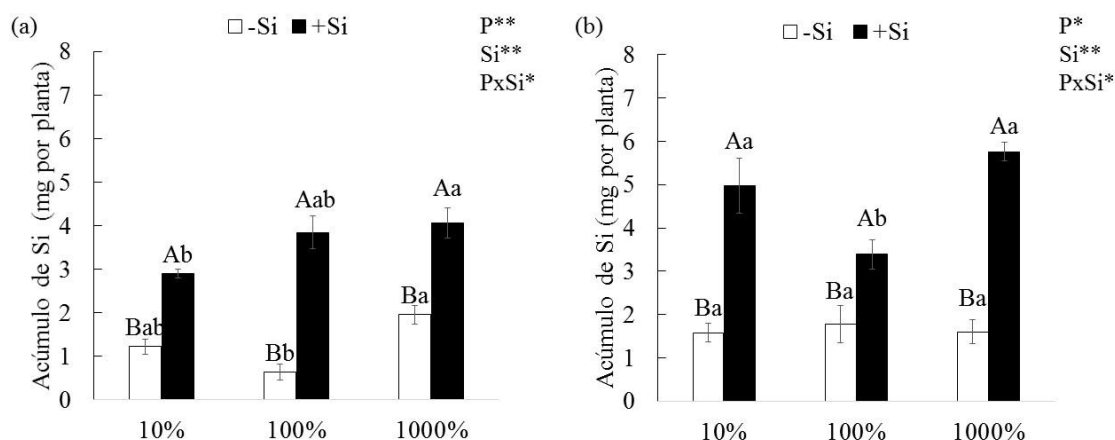


Figura 13. Acúmulo de Si na parte aérea (a) e acúmulo de Si na raiz (b) em mudas de *Corymbia citriodora* na ausência (-Si) e presença de Si (+Si), em três níveis de P. Médias seguidas pela mesma letra, minúsculas para os níveis de P e maiúsculas para presença e ausência de Si, não diferem entre si pelo teste de Tukey ( $P > 0,05$ ). \*\* e \*: valor significativo ( $P < 0,01$  e  $P < 0,05$ , respectivamente). As barras representam o erro padrão da média.

Para o híbrido houve interação entre os níveis de P e de Si na raiz (Figura 14). Para todos os tratamentos a presença de Si proporcionou maior acúmulo desse elemento em relação aos tratamentos sem o fornecimento do mesmo. Nas raízes, na

presença de Si, o aumento da concentração de P proporcionou aumento no acúmulo de Si.

Mateus et al. (2017) estudando mudas de um clone de *E. urophylla* x *E. grandis* verificaram que ao fornecer Si, que esse elemento se acumulou principalmente nas raízes das plantas, em que houve uma maior tendência de crescimento e matéria seca na aplicação de  $0,5 \text{ mmol.L}^{-1}$ , corroborando com os resultados obtidos no presente estudo. Todavia, Carvalho et al. (2003), afirmam que espécies de eucalipto não são consideradas acumuladoras de Si, apesar de absorvê-lo. Podemos considerar que este acúmulo de Si pode provocar diversas respostas positivas nas plantas, aumentando a tolerância do vegetal a estresses bióticos e abióticos.

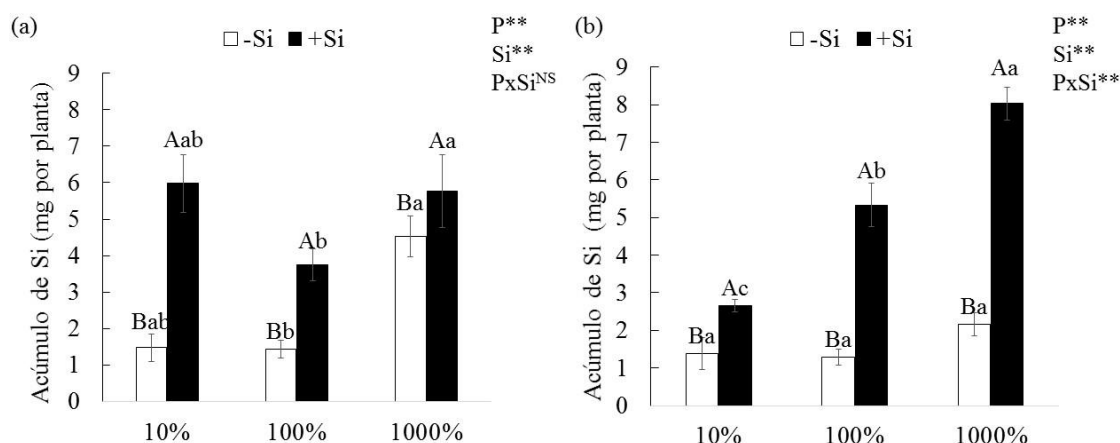


Figura 14. Acúmulo de Si na parte aérea (a) e acúmulo de Si na raiz (b) em mudas de um híbrido de *Eucalyptus grandis* X *E. urophylla* na ausência (-Si) e presença de Si (+Si), em três níveis de P. Médias seguidas pela mesma letra, minúsculas para os níveis de P e maiúsculas para presença e ausência de Si, não diferem entre si pelo teste de Tukey ( $P > 0,05$ ). \*\* e \*: valor significativo ( $P < 0,01$  e  $P < 0,05$ , respectivamente). NS: valor não significativo ( $P > 0,05$ ). As barras representam o erro padrão da média.

#### 4.1.6 Acúmulo de fósforo (P)

A interação entre os níveis de P e de Si foi não significativa ( $P > 0,05$ ) para o acúmulo de P na parte aérea e nas raízes de mudas de *C. citriodora* (Figura 15). No entanto, o acúmulo de P foi maior com o aumento da concentração de P e nos tratamentos na presença de Si, tanto da parte aérea e quanto das raízes das plantas.

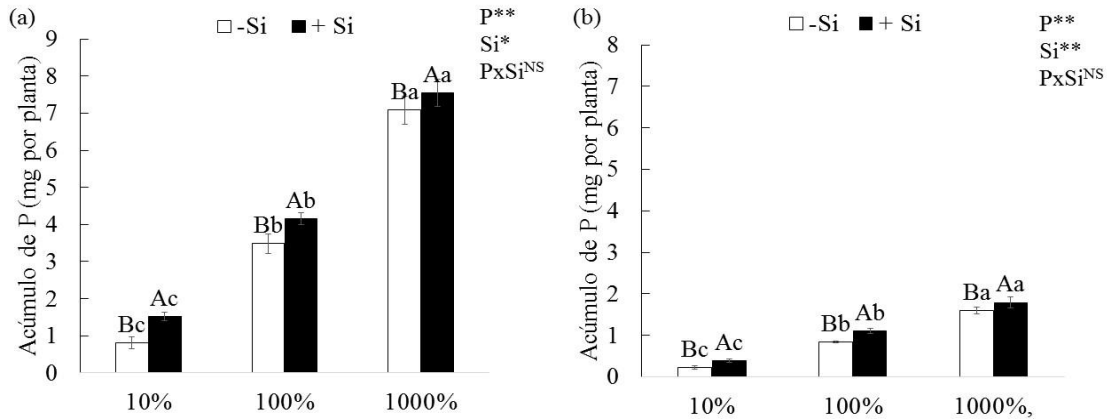


Figura 15. Acúmulo de P na parte aérea (a) e acúmulo de P na raiz (b) em mudas de *Corymbia citriodora* na ausência (-Si) e presença de Si (+Si), em três níveis de P. Médias seguidas pela mesma letra, minúsculas para os níveis de P e maiúsculas para presença e ausência de Si, não diferem entre si pelo teste de Tukey ( $P < 0,05$ ). \*\* e \*: valor significativo ( $P < 0,01$  e  $P < 0,05$ , respectivamente). <sup>NS</sup>: valor não significativo ( $P > 0,05$ ). As barras representam o erro padrão da média.

Para as mudas do híbrido, houve interação entre os níveis de P e de Si, tanto no acúmulo de P na parte aérea quanto nas raízes (Figura 16). Porém, o acúmulo de P foi maior com o aumento da concentração de P e na presença de Si sob 1000% da dose de P.

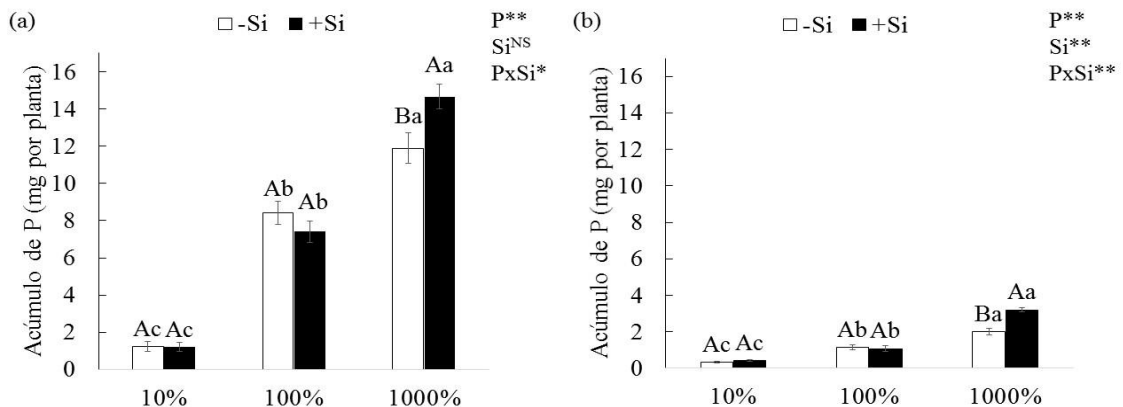


Figura 16. Acúmulo de P na parte aérea (a) e acúmulo de P na raiz (b) em mudas de um híbrido de *Eucalyptus grandis* X *E. urophylla* na ausência (-Si) e presença de Si (+Si), em três níveis de P. Médias seguidas pela mesma letra, minúsculas para os níveis de P e maiúsculas para presença e ausência de Si, não diferem entre si pelo teste de Tukey ( $P < 0,05$ ). \*\* e \*: valor significativo ( $P < 0,01$  e  $P < 0,05$ , respectivamente). <sup>NS</sup>: valor não significativo ( $P > 0,05$ ). As barras representam o erro padrão da média.

A deficiência de P afeta diretamente o crescimento das mudas (Niu et al., 2015), com isso a nutrição fosfatada é imprescindível para garantir o desenvolvimento inicial adequado para o eucalipto. Na deficiência de P, o silício favorece sua absorção, pois pode aumentar a expressão gênica de transportadores de P (Kostic et al., 2017), fato que foi verificado para as mudas de *C. citriodora* mas não para as mudas de *E. grandis* X *E. urophylla*.

#### **4.2. Experimentos 3 e 4 - Desempenho de plantas de eucalipto sob deficiência hídrica em vasos**

Os resultados obtidos demonstram que tanto o *Corymbia citriodora* quanto o híbrido de *E. grandis* X *E. urophylla* tiveram as taxas de crescimento reduzidas sob déficit hídrico, independentemente da dose de P e ou da presença ou não de Si durante a formação das mudas. A baixa disponibilidade de água no solo ocasiona perda da turgescência celular, com isso há redução da expansão celular que por sua vez inibe o crescimento e a expansão foliar (Abreu et al., 2022). Assim, umas das consequências para as plantas submetidas ao déficit hídrico é a redução das suas taxas de crescimento como em altura e diâmetro e acúmulo de massa seca.

A interação regime hídrico x doses de P (P x RH) e doses de P x doses de Si (P x Si) foi significativa para a altura das plantas de *C. citriodora*. As plantas que receberam adubação fosfatada (100% da concentração de P) e água adequadamente (CRA 60%) apresentaram maior altura, comparativamente àquelas que receberam a menor dose de P (10% da concentração de P) nesse mesmo regime hídrico, demonstrando a importância da correta nutrição com P para o crescimento da espécie. Por outro lado, sob baixa disponibilidade hídrica (CRA 30%) não houve diferença entre as doses de P aplicadas. Também, independentemente da dose de P aplicada, as plantas sob maior disponibilidade hídrica apresentaram maior crescimento em altura (Figura 17a). Ainda para altura e considerando-se a interação P x Si, a resposta foi oposta quando as plantas receberam alta ou baixa concentração de P. Neste sentido, na menor concentração de P (10%) a adição de Si não afetou o crescimento em altura, mas na maior concentração de P (100%) as plantas que receberam Si apresentaram

maior crescimento em altura, indicando uma ação benéfica do Si nessa condição (Figura 17a).

Sob baixa disponibilidade hídrica (CRA 30%) não houve efeito da concentração de P sobre o crescimento em diâmetro de *C. citriodora*, mas sob maior disponibilidade hídrica (CRA 60%) o diâmetro foi maior quando aplicado 100% da concentração de P (Figura 17b). Diante desses resultados, para altura e diâmetro, fica evidente que o efeito da concentração de P é dependente da adequada disponibilidade hídrica para as plantas de *C. citriodora*.

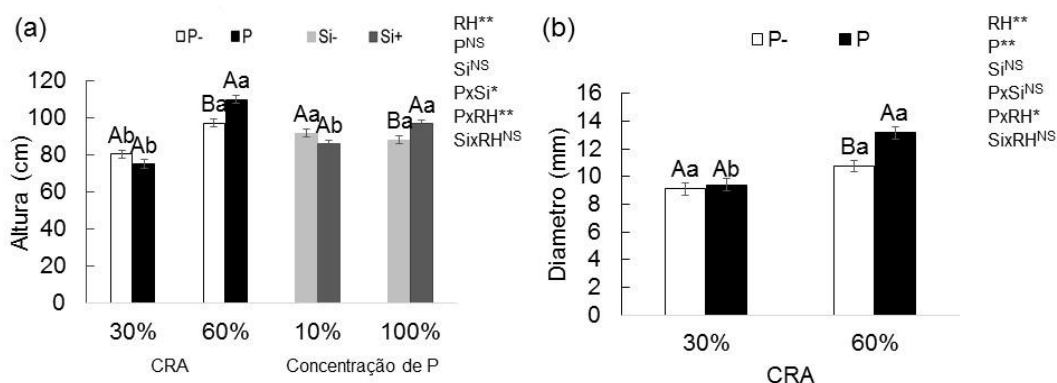


Figura 17. Altura (a) e diâmetro (b) das mudas de *Corymbia citriodora* sob níveis de 30 e 60% capacidade de retenção de água no solo (CRA), concentração de P na presença e ausência de Si. Médias seguidas pela mesma letra, minúsculas para os níveis de CRA (ou concentração de P) e maiúsculas para concentração de P (ou presença e ausência de Si), não diferem entre si pelo teste de Tukey ( $P > 0,05$ ). \*\* e \*: valor significativo ( $P < 0,01$  e  $P < 0,05$ , respectivamente). NS: valor não significativo ( $P > 0,05$ ). As barras representam o erro padrão da média.

Para as plantas de *E. grandis* X *E. urophylla* não houve efeito da concentração de P sobre o crescimento em altura, independentemente do regime hídrico, mas sob maior disponibilidade hídrica a altura foi maior independentemente da concentração de P (Figura 18a). A maior disponibilidade hídrica favoreceu o crescimento em diâmetro, independentemente da concentração de P, mas a maior concentração de P favoreceu o crescimento em diâmetro apenas na maior disponibilidade hídrica (Figura 18b), corroborando os resultados obtidos para o *C. citriodora* (Figura 17b).

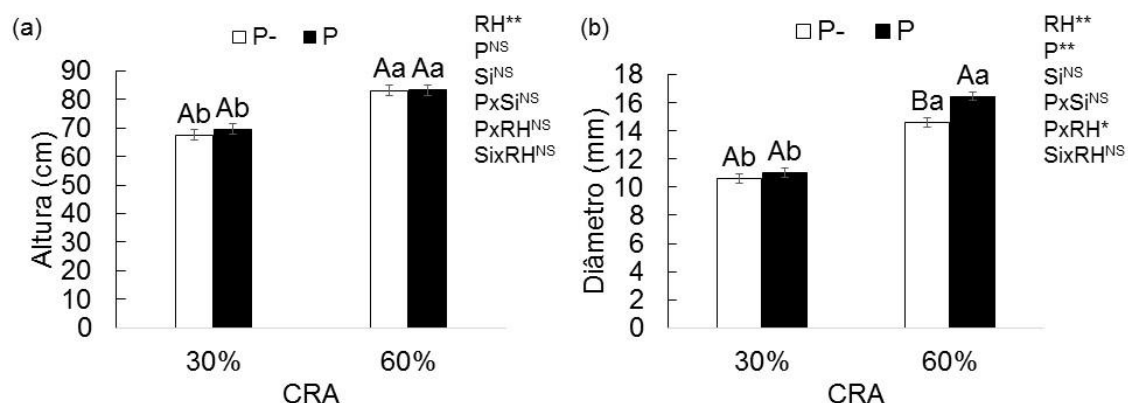


Figura 18. Altura (a) e diâmetro (b) das mudas do híbrido de *Eucalyptus grandis* X *E. urophylla* sob níveis de 30 e 60% capacidade de retenção de água no solo (CRA). Médias seguidas pela mesma letra, minúsculas para os níveis de CRA e maiúsculas para presença e ausência de P, não diferem entre si pelo teste de Tukey ( $P > 0,05$ ). \*\* e \*: valor significativo ( $P < 0,01$  e  $P < 0,05$ , respectivamente). NS: valor não significativo ( $P > 0,05$ ). As barras representam o erro padrão da média.

Para *C. citriodora* o número de folhas e a área foliar apresentaram valores superiores sob maior disponibilidade hídrica (CRA de 60%). A deficiência hídrica no solo pode afetar as variáveis de crescimento e desenvolvimento do vegetal, desta maneira, podendo reduzir a emissão de folhas e, ou a expansão foliar. Não houve efeito da concentração de P sobre o número de folhas sob baixa disponibilidade hídrica (CRA 30%), mas sob CRA de 60% a maior concentração de P favoreceu a emissão de folhas (Figura 19a e 18b).

Em *E. grandis* x *E. urophylla* houve efeito do regime hídrico (RH) e da concentração de P, de formas isoladas, sobre o número de folhas (Figura 20a) em que a maior disponibilidade hídrica (60% CRA) e a maior concentração de P (100%) favoreceram a emissão de folhas. Também, a maior disponibilidade hídrica favoreceu a expansão foliar (Figura 20b) e, apesar da interação P x Si ser significativa ( $P < 0,05$ ) não houve diferenças entre a aplicação ou não de Si, independentemente da concentração de P, e da concentração de P, independentemente da presença ou não de Si.

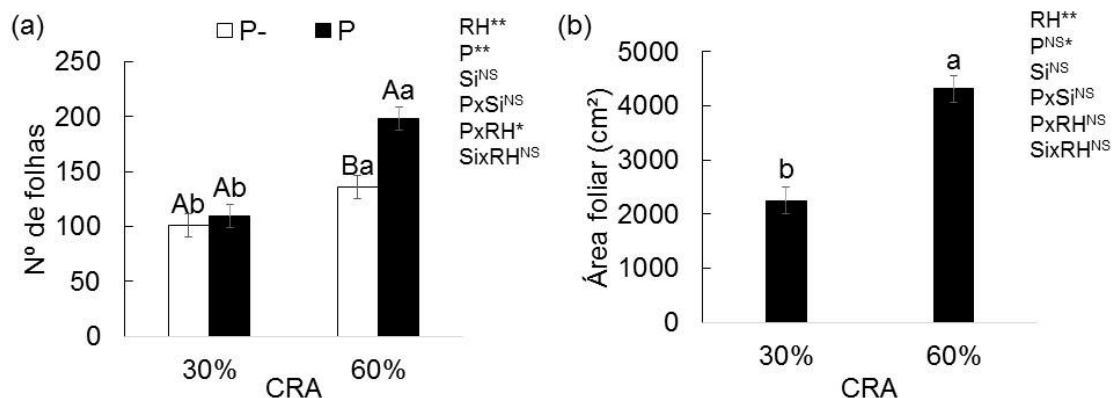


Figura 19. Número de folhas (a) e área foliar (b) das mudas de *Corymbia citriodora* sob níveis de 30 e 60% capacidade de retenção de água no solo (CRA). Médias seguidas pela mesma letra, minúsculas para os níveis de CRA e maiúsculas para presença e ausência de P, não diferem entre si pelo teste de Tukey ( $P > 0,05$ ). \*\* e \*: valor significativo ( $P < 0,01$  e  $P < 0,05$ , respectivamente). NS: valor não significativo ( $P > 0,05$ ). As barras representam o erro padrão da média.

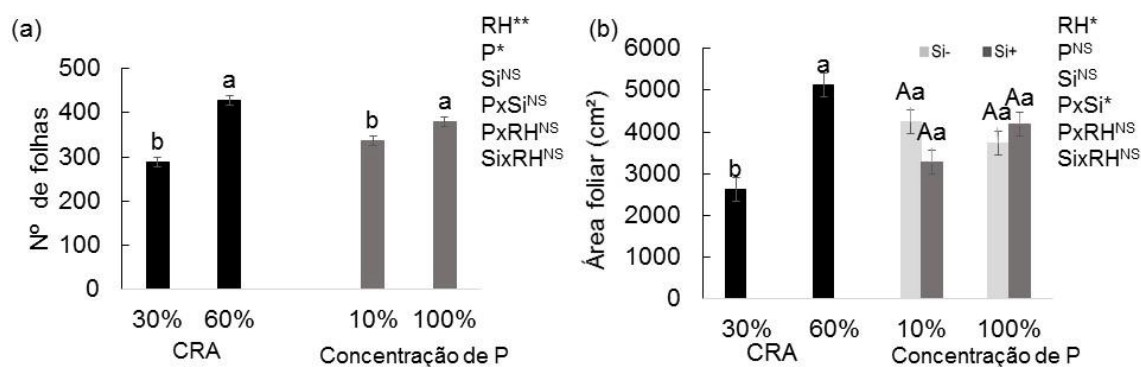


Figura 20. Número de folhas (a) e área foliar (b) das mudas do híbrido de *Eucalyptus grandis* X *E. urophylla* sob níveis de 30 e 60% capacidade de retenção de água no solo (CRA). Médias seguidas pela mesma letra, minúsculas para os níveis de CRA e maiúsculas para presença e ausência de P, não diferem entre si pelo teste de Tukey ( $P > 0,05$ ). \*\* e \*: valor significativo ( $P < 0,01$  e  $P < 0,05$ , respectivamente). NS: valor não significativo ( $P > 0,05$ ). As barras representam o erro padrão da média.

A interação concentração de P x regime hídrico (P x RH) foi significativa sobre o acúmulo de massa de matéria seca de folhas (MSF), de caule (MSC), da parte aérea (MSPA) e total (MST) e da relação massa seca de raízes/massa seca da parte aérea

(RPA), Figura 21. Para essas características, sob baixa disponibilidade hídrica (CRA 30%) não houve efeito da concentração de P, por outro lado as mesmas foram favorecidas pela maior concentração de P sob maior disponibilidade hídrica (CRA 60%). Apesar da aplicação de Si não ter afetado a fase inicial de desenvolvimento das mudas de *C. citriodora*, houve interação significativa ( $P < 0,05$ ) entre concentração de Si x regime hídrico (Si x RH) para massa seca de raízes (MSR) das mudas em vasos, sendo que a aplicação de Si sob CRA de 60% proporcionou maior massa de MSR (Figura 21d), podendo ter implicação direta com o acúmulo desse elemento nesse componente conforme resultados obtidos no experimento 1. A relação raiz-parte aérea (RPA) foi afetada apenas pelo regime hídrico, com maior valor sob CRA de 60% (Figura 21f).

De forma semelhante ao observado para *C. citriodora*, também não houve efeito da presença ou não do Si sobre o acúmulo de massa de matéria seca nas plantas do híbrido de *E. grandis* X *E. urophylla* (Figura 22), seja de forma isolada ou em interação com as concentrações de P ou regime hídrico. Maior acúmulo de matéria seca nos diferentes compartimentos da planta foram observados sob maior disponibilidade hídrica, independentemente da concentração de P e nessa condição a maior concentração de P proporcionou maior desenvolvimento das plantas. Sob menor disponibilidade hídrica (CRA 30%) não houve efeito da concentração de P, conforme observado também para *C. citriodora*. A relação raiz/parte aérea (RPA) seguiu a mesma tendência das características de acúmulo de massa seca, com maior valores sob maior disponibilidade hídrica, situação, também, em que a maior concentração de P proporcionou maiores valores de RPA. Sob menor disponibilidade hídrica não houve efeito das concentrações de P (Figura 22f).

Neste estudo é notável que para ambas espécies estudadas, os valores de matéria seca foram maiores no regime hídrico com maior disponibilidade de água. Isto posto, a produção de biomassa é variável conforme o acesso aos recursos necessários para o ciclo de vida da planta. Santana et al. (2008) constataram que essa produção é influenciada principalmente por condições climáticas, tais como a disponibilidade de água, logo, locais onde o déficit hídrico é mais severo podem não garantir o pleno estabelecimento dos plantios. Desta maneira, além da genética envolvida na sobrevivência em casos de estresses abióticos, os fatores

edafoclimáticos estão ligados de modo direto à capacidade produtiva do eucalipto (Binkley et al. 2020).

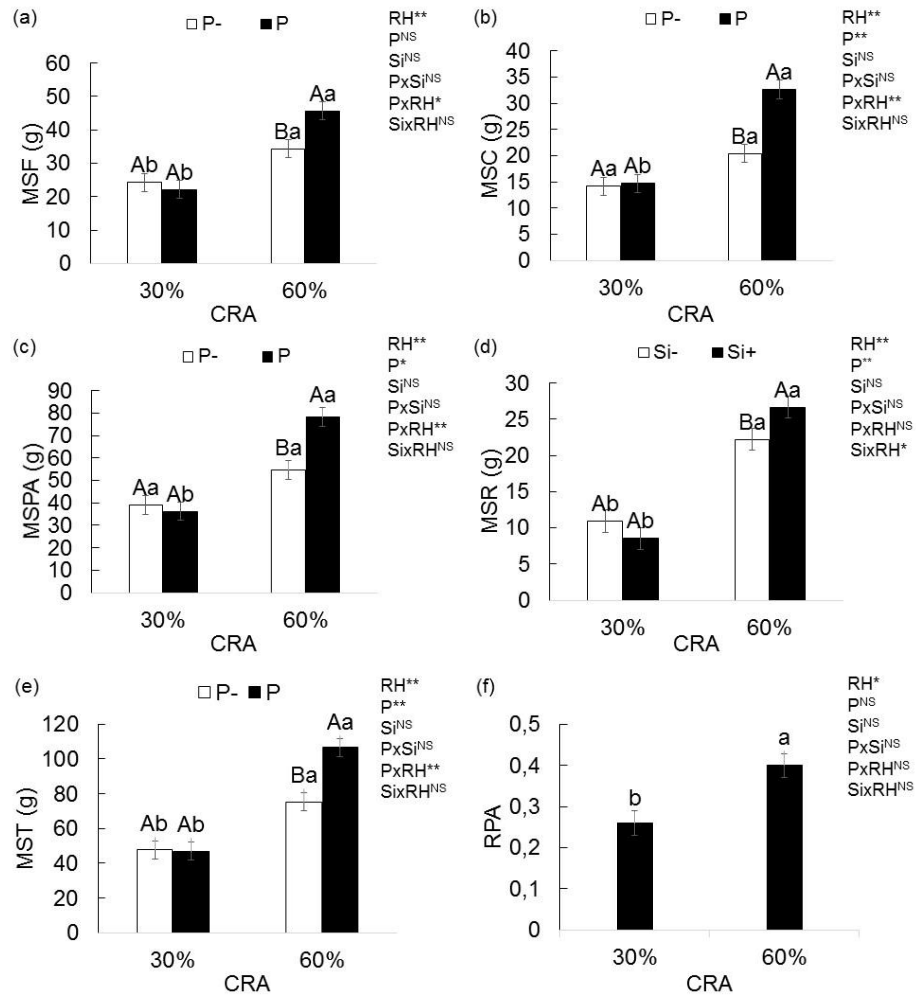


Figura 21. Matéria seca das folhas (a), matéria seca do caule (b), matéria seca da parte aérea (c), matéria seca da raiz (d), matéria seca total (e) e relação raiz/parte aérea (f) das mudas de *Corymbia citriodora*. Médias seguidas pela mesma letra, minúsculas para os níveis de CRA e maiúsculas para presença e ausência de P, exceto figura d em que maiúsculas para presença e ausência de Si, não diferem entre si pelo teste de Tukey ( $P>0,05$ ). \*\* e \*: valor significativo ( $P<0,01$  e  $P<0,05$ , respectivamente). <sup>NS</sup>: valor não significativo ( $P>0,05$ ). As barras representam o erro padrão da média.

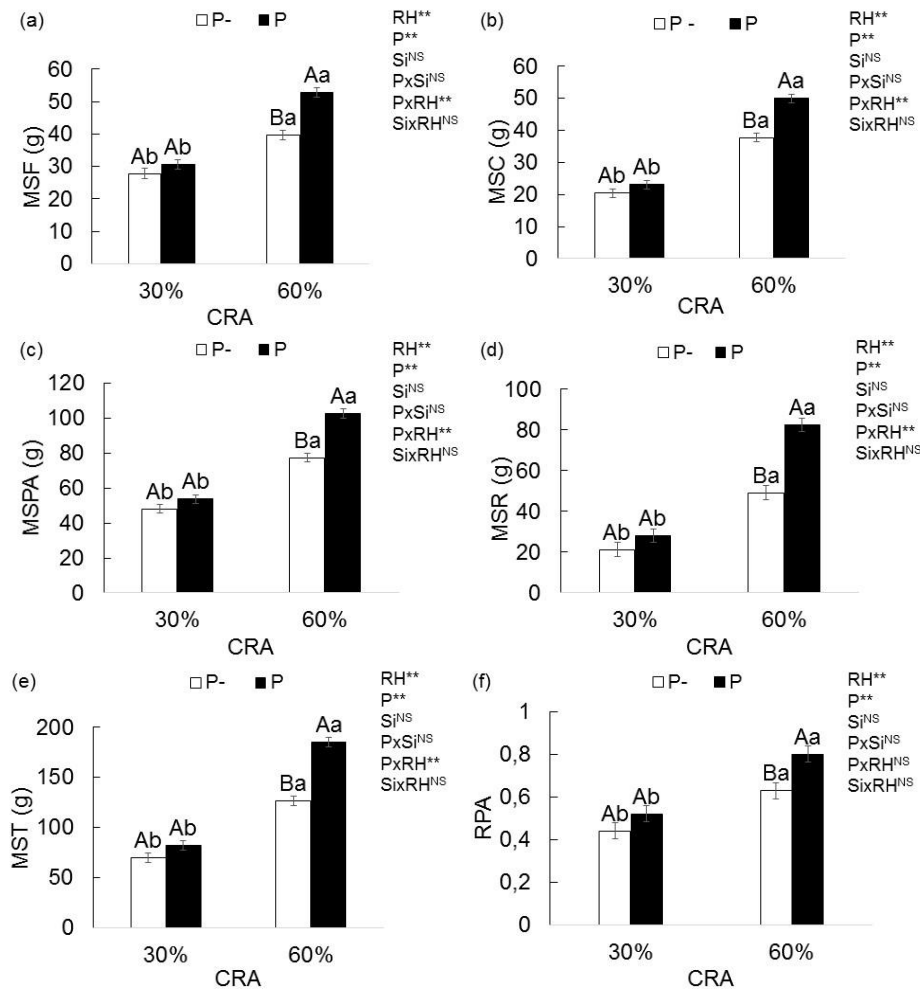


Figura 22. Matéria seca das folhas (a), matéria seca do caule (b), matéria seca da parte aérea (c), matéria seca da raiz (d), matéria seca total (e) e relação raiz/parte aérea (f) das mudas do híbrido *Eucalyptus grandis* X *E. urophylla*. Médias seguidas pela mesma letra, minúsculas para os níveis de CRA e maiúsculas para presença e ausência de P, não diferem entre si pelo teste de Tukey ( $P > 0,05$ ). \*\* e \*: valor significativo ( $P < 0,01$  e  $P < 0,05$ , respectivamente). <sup>NS</sup>: valor não significativo ( $P > 0,05$ ). As barras representam o erro padrão da média.

O fósforo é transportado do solo até as raízes das plantas por meio da difusão, sendo este fenômeno responsável por boa parte do contato entre íon e raiz, só assim o vegetal poderá realizar sua absorção. Desta maneira, há uma demanda de água para favorecer o contato e absorção, assim, a baixa disponibilidade hídrica estará associada à redução da absorção de nutrientes pelas plantas (He e Dijkstra, 2014). De acordo com Rouphael et al. (2012) a seca pode reduzir o crescimento das plantas e afetar a absorção e transporte de nutrientes como N e P, conforme observado no

presente trabalho. Para a cultura do eucalipto o abastecimento de água no solo é um fator limitante para o crescimento das plantas, variando conforme a espécie (Ryan et al., 2010)

## 5. CONCLUSÕES

Durante a formação de mudas de eucalipto observou-se que:

- i) O aumento da concentração de P promove maior matéria seca da parte aérea, enquanto o fornecimento de Si aumenta a produção da matéria seca de raiz para *C. citriodora*;
- ii) O fornecimento de Si para as mudas de *C. citriodora* aumenta o diâmetro do coleto, a eficiência quântica do fotossistema II sob deficiência de P, a produção de massa seca da raiz e total e acúmulo de Si e P nas plantas
- iii) Para *E. grandis* X *E. urophylla* as plantas com fornecimento de Si apresentam maior diâmetro do coleto sob deficiência ou excesso de P, maior produção de matéria seca das raízes, maior relação raiz-parte aérea e maior acúmulo de Si;
- iv) O Si ajuda a mitigar os efeitos da deficiência de P durante a formação de mudas de eucalipto.

No desenvolvimento das plantas de eucalipto, em vasos, observou-se que:

- i) As plantas de *C. citriodora* e de *E. grandis* X *E. urophylla* são prejudicadas pela deficiência hídrica, independentemente da dose de P e, ou Si na formação das mudas;
- ii) O efeito positivo da adubação com P é dependente da boa disponibilidade hídrica, favorecendo o crescimento das plantas na ausência de deficiência hídrica;
- iii) A aplicação de Si, em geral, não afeta o desenvolvimento das plantas de eucalipto, mas em *C. citriodora* quando associada a adequada disponibilidade hídrica, favorece o acúmulo de matéria seca.

## 6. REFERÊNCIAS

Abreu MC, Soares AAV, de Freitas CH et al. (2022) Respostas da transpiração e do crescimento de espécies de *Eucalyptus* ao ressecamento progressivo do solo. **J. Para. Res.** 33 , 1529–1543.

Araújo WBS, Teixeira GCM, Prado RM, Rocha AMS (2022) O silício atenua o estresse nutricional de deficiência de nitrogênio, fósforo e cálcio em duas plantas forrageiras. **Scientific Reports** 12, 6611.

Bahar NHA, Gauthier PPG, Sullivan OSO, Brereton T, Evans JR, Atkin OK (2018) Phosphorus deficiency alters scaling relationships between leaf gas exchange and associated traits in a wide range of contrasting *Eucalyptus* species. **Functional Plant Biology**, v. 45, n. 8, p. 813-826.

Barbosa JC, Maldonado Júnior W (2010) AgroEstat: sistema para análises estatísticas de ensaios agrônômicos. Jaboticabal: Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, UNESP.

Bataglia OC, Furlani AMC, Teixeira JPF, Furlani PR, Gallo JR (1983) Métodos de análise química de plantas. Campinas: Instituto Agronômico. (IAC, Boletim Técnico, 78). p.48.

Binkley D, Campoe OC, Alvares CA, Carneiro RL, Stape JL (2020) Variation in whole-rotation yield among *Eucalyptus* genotypes in response to water and heat stresses: The TECHS project. **Forest Ecology and Management**, v.462, e117953.

Bulgarelli RG (2022) **Resposta de espécies de eucalipto à disponibilidade de fósforo no solo: Response of eucalypt species to soil phosphorus availability.** 241 f. Tese (Doutorado) - Universidade Estadual de Campinas, Instituto de Biologia, Campinas, SP.

Camargo MS, Bezerra BKL, Holanda LA, Oliveira AL, Vitti AC, Silva MA (2019) Silicon fertilization improves physiological responses in sugarcane cultivars grown under water deficit. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition** 19:81–91.

Carvalho R, Furtini Neto AE, Curi N, Resende AV (2003) Absorção e translocação de silício em mudas de eucalipto cultivadas em Latossolo e Cambissolo. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 27, p. 491-500.

Cooke J, Leishman MR (2016) Alívio consistente do estresse abiótico com adição de silício: uma meta-análise. **Ecologia Funcional** , v. 30, n. 8, pág. 1340-1357.

Coskun D, Britto DT, Huynh WQ, Kronzucker HJ (2016) The role of Silicon in higher plants under salinity and drought stress. **Frontiers in Plant Science**, v.7, 1072. DOI: 10.3389/fpls.2016.01072

Costa e Silva F, Shvaleva A, Maroco JP, Almeida MH, Chaves MM, Pereira JS (2004) Responses to water stress in two *Eucalyptus globulus* clones differing in drought tolerance, **Tree Physiology**, vol 24, Issue 10, pg 1165–1172.

Dionisio-Sese ML, Tobita S (1998) Antioxidant responses of rice seedlings to salinity stress. **Plant Science**, v.135, p.1-9.

Duarte I, Coelho L. (2011) Uso do silício no cultivo de mudas de eucalipto. **Enciclopédia Biosfera**, v. 7, n. 12.

Etesami H, Jeong BR (2018) Silicon (Si): Review and future prospects on the action mechanisms in alleviating biotic and abiotic stresses in plants. **Ecotoxicology and environmental safety**, v. 147, p. 881-896.

Faquin V (2005) **Nutrição mineral de plantas**. Lavras: UFLA (FAEPE),183p.

Farooq MA, Dietz KJ (2015) Silicon as versatile player in plant and human biology: overlooked and poorly understood. **Frontiers in plant science**, v. 6, p. 994.

Graciano C, Goya JF, Frangi JL, Guiamet JJ (2006) Fertilization with phosphorus increases soil nitrogen absorption in young plants of *Eucalyptus grandis*. **Forest Ecology and Management**, v. 236, p. 202-210.

Ferreira DF. (2011) Sisvar: a computer statistical analysis system. **Ciência e agrotecnologia**, v. 35, p. 1039-1042.

Grattapaglia D, Kirst M. (2008). *Eucalyptus* applied genomics: from gene sequences to breeding tools. **New Phytologist** 179, 911–929.

Gong H, Zhu X, Chen K, Wang S, Zhang C. (2005) Silicon alleviates oxidative damage of wheat plants in pots under drought. **Plant Science**, Bibao, v. 169, n. 2, p. 313-321.

Güsewell S (2005) High nitrogen: phosphorus ratios reduce nutrient retention and second-year growth of wetland sedges. **New Phytologist** 166:537–550.

He M, Dijkstra FA (2014) Drought effect on plant nitrogen and phosphorus: a meta-analysis. **New Phytologist**, v. 204, n. 4, p. 924-931.

Hoagland DR, Arnon DL (1950) **The water culture methods for growing plants without soil**. Circular, v.347, p.32.

IBÁ - Indústria Brasileira de Árvores (2021). **Relatório Anual 2022**. Itaim Bibi, São Paulo, 96p. <https://iba.org/datafiles/publicacoes/relatorios/relatorio-anual-iba2022-compactado.pdf> acesso em 22 dez 2022

IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change (2021): **Sumário para Formuladores de Políticas. Em: Mudança do Clima 2021: A Base da Ciência Física**. Contribuição do Grupo de Trabalho I ao Sexto Relatório de Avaliação do Painel

Intergovernmental sobre Mudanças Climáticas. Cambridge University Press. No Prelo.

IPEF - Instituto de Pesquisa e Estudos Florestais (2009). **Identificação de Espécies Florestais**.

Jones C, Hatier JH, Cao M, Fraser K, Rasmussen S (2015) Metabolomics of plant phosphorus-starvation response. **Annual Plant Reviews Volume 48: Phosphorus Metabolism in Plants**, v. 48, p. 215-236.

Jones LHP, Handreck KA. (1967) Silica in soils, plants, and animals. **Advances in agronomy**, v. 19, p. 107-149, 1967.

Katz O, Puppe D, Kaczorek D, Prakash NB, Schaller J (2021) Silicon in the soil–plant continuum: Intricate feedback mechanisms within ecosystems. **Plants** 10:1–36.

Kraska JE, Breitenbeck GA. (2010) Simple, robust method for quantifying silicon in plant tissue. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v. 41, n. 17, p. 2075-2085.

Korndörfer GH, Pereira HS, Nolla A (2004) Análise de silício: solo, planta e fertilizante. **Boletim Técnico, Uberlândia**, n.2, p.34.

Kostic L, Nikolic N, Bosnic D, Samardzic, Nikolic M (2017) Silicon increases phosphorus (P) uptake by wheat under low P acid soil conditions. **Plant Soil**. 419:447–455.

Lopes JLW, Guerrini IA, Saad JCC (2007) Qualidade de mudas de eucalipto produzidas sob diferentes lâminas de irrigação e dois tipos de substrato. **Revista Árvore**, v. 31, p. 835-843.

López-Arredondo DL, Leyva-González MA, González-Morales SI, López-Bucio J, Herrera-Estrella L. (2014). Phosphate nutrition: improving low-phosphate tolerance in crops. **Annual Review of Plant Biology**, 65, 95-123.

Ma JF., Yamaji N, (2015) A cooperated system of silicon transport in plants. **Trends Plant Science**, v.20, p.435-442.

Ma JF, Yamaji N (2006) Silicon uptake and accumulation in higher plants. **Trends Plant Science**. 11(8):392–397.

Ma JF, Takahashi E (2002). Soil, fertilizer, and plant silicon research in Japan. **Elsevier Science**, Amsterdam.

Marschner H (1995) **Marschner's mineral nutrition of higher plants**. Academic press, second edition.

Martins GSM, Freitas NC, Máximo WPF, Paiva LV (2018) gene expression in two contrasting hybrid clones of eucalyptus camaldulensis x eucalyptus urophylla grown under water deficit conditions. **Journal of plant physiology** 229:122-131.

Mateus NS, Ferreira EVO, Toledo FHSF, Lavres Junior J, Gonçalves JLM (2017) Do the nutrition and physiology of eucalyptus seedlings respond to silicon (Si) supply? **Australian Journal of Crop Science**, 9, 1086-1093.

Mello RM, Vitti GC, Matsuzaki R, Camargo MS (2016). Silício e suas relações com a nutrição mineral e resistência de plantas a estresses abióticos. **Scientia Agricola**, 73(1), 1-10.

Minden V, Schaller J, Olde Venterink H (2021) Plants increase silicon content as a response to nitrogen or phosphorus limitation: a case study with *Holcus lanatus*. **Plant Soil**. 1–14.

Mitani N, Ma JF (2005) Uptake system of silicone in different plant species. **Journal of Experimental Botany**. London, v. 56 p. 1255-1261.

Navas R, Nunes JMC, Vasconcelos Junior JB (2016). Aplicação de ferro e silício na produção de mudas de eucalipto. **Agrarian**, 9(32), 137-142.

Neu S, Schaller J, Dude EG (2017). Silicon availability modifies nutrient use efficiency and content, C:N:P stoichiometry, and productivity of winter wheat (*Triticum aestivum* L.) **Scientific Reports** 7:40829.

Niu YF et al. (2013) Responses of root architecture development to low phosphorus availability: a review. **Annals of botany**, v. 112, n. 2, p. 391-408.

Niu YF, Chai RS, Jin GL, Wang H, Tang CX, Zhang YS (2015) Morphological response of eucalypts seedlings to phosphorus supply through hydroponic system. **Scientia Horticulturae**, v. 194, p. 295-303.

Ngugi MR, Doley D, Hunt MA, Ryan P, Dart P (2004) Physiological responses to water stress in *Eucalyptus cloeziana* and *E. argophloia* seedlings. **Trees**, Berlin, v. 18, p.381-389.

Pei, ZF, Ming DF, Liu D, Wan GL, Geng XX, Gong HJ, Zhou, WJ (2010) Silicon improves the tolerance to water-deficit stress induced by polyethylene glycol in wheat (*Triticum aestivum* L.) seedlings. **Journal of plant growth regulation**, v. 29, p. 106-115.

Pereira MRR, Klar AE, Silva MR, Souza RA, Fonseca NR. (2006) Comportamento fisiológico e morfológico de clones de *Eucalyptus urograndis* submetidos a diferentes níveis de água no solo. **Irriga**, v. 11, n. 4, p. 518-531.

Pinto SIC, Ramos SJ, Araujo JL, Faquin, V, Novais CB, Silva, KD, Furtini Neto AE. (2009) Silício como amenizador da fitotoxicidade de zinco em plantas jovens de

Eucalyptus urophylla cultivadas em solução nutritiva. **Revista Árvore**, v. 33, p. 1005-1014.

Queiroz DL, Camargo JMM, Dedecek RA, Oliveira EBD, Zanol KMR, Melido RCN (2018) Absorção e translocação de silício em mudas de Eucalyptus camaldulensis. **Ciência Florestal**, v. 28, p. 632-640.

Raij BV, Cantarella H, Quaggio J A, Furlani, AMC (1997). **Recomendações de adubação e calagem para o estado de São Paulo**. Campinas: Instituto Agronômico (Boletim Técnico, 100).

Rocha JHT, Pietro MR, Borelli K, Backes C, Neves MB. (2013) Produção e desenvolvimento de mudas de eucalipto em função de doses de fósforo. **Cerne**, v. 19, p. 535- 543.

Rouphael Y, Cardarelli M, Schwarz D, Franken P, Colla G. (2012). Effects of drought on nutrient uptake and assimilation in vegetable crops. In: R Aroca, ed. **Plant responses to drought stress**. Berlin, Heidelberg, Germany: Springer, 171– 195.

Rubilar R et al. (2020) Climate and water availability impacts on early growth and growth efficiency of Eucalyptus genotypes: The importance of GxE interactions. **Forest Ecology and Management**, v. 458, p. 117763.

Ryan MG et al. (2010) Fatores que controlam a produtividade do eucalipto: como a disponibilidade de água e a estrutura do povoamento alteram a produção e a alocação de carbono. **Ecologia e Manejo Florestal** , v. 259, n. 9, pág. 1695-1703.

Ryan MG (2011) Tree responses to drought. **Tree Physiology**, v. 31, n. 3, p. 237-239.

Schawambach J, Fadanelli C, Fett Neto AG (2005) Mineral nutrition and adventitious rooting in microcuttings of Eucalyptus globules. **Tree Physiology**, v. 25, p. 487-494.

Santana RC, Barros NF, Novais RF, Leite HG, Comerford NB. (2008) Alocação de nutrientes em plantios de eucalipto no Brasil. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.26 n.4, p.447-457.

Santos DF, Martins FB, Torres RR (2017) Impacts of climate projections on water balance and implications on olive crop in Minas Gerais. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 21, p. 77-82.

Silva FGD, Dutra WF, Dutra AF, Oliveira IMD, Filgueiras L, Melo ASD (2015). Trocas gasosas e fluorescência da clorofila em plantas de berinjela sob lâminas de irrigação. *Revista brasileira de engenharia agrícola e ambiental*, 19, 946-952.

Silva OMD, Nieri EM, Santana LS, Almeida RS, Araújo GDCR, Botelho SA, Melo LAD (2022). Adubação fosfatada no crescimento inicial de sete espécies florestais nativas destinadas à recuperação de uma área degradada. **Ciência Florestal**, 32, 371-394.

Silveira RLVA, Moreira A, Takashi EM, Sgarbi F, Branco EF (2002) Sintomas de deficiência de macronutrientes e de boro em clones híbridos de *Eucalyptus grandis* com *Eucalyptus urophylla*. **Cerne**, v. 8, n. 2, p. 107-116.

Soares MTS (2019) **O eucalipto e a Embrapa: 40 anos de pesquisa e desenvolvimento. Eucaliptos nutrição e fertilização na ótica da sustentabilidade florestal**. 1ª edição (versão digitalizada). Colombo, Paraná.

Souza Junior JP, Prado RDM, Morais TCB, Santos Sarah MM, Oliveira KR (2021),. Silicon fertigation and salicylic acid foliar spraying mitigate ammonium deficiency and toxicity in *Eucalyptus* spp. Clonal seedlings. **PLoS ONE** 16(4): e0250436.

Stape JL *et al.* (2010) The Brazil Eucalyptus potential productivity project: influence of water, nutrients and stand uniformity on wood production. **For. Ecol. Manage.** 259, 1684–1694.

Taiz L, Zeiger E, Moller IM, Murphy A (2017) **Fisiologia e desenvolvimento vegetal**. Artmed Editora.

Thomas DS, Montagu KD, Conroy, Jann P (2006) Leaf inorganic phosphorus as a potential indicator of phosphorus status, photosynthesis and growth of *Eucalyptus grandis* seedlings. **Forest Ecology and Management**, v. 223, n. 1-3, p. 267-274.

Vellini ALTT, Paula NFD, Alves PLDCA, Pavani LC, Bonine CAV, Scarpinati EA, Paula RCD (2008) Respostas fisiológicas de diferentes clones de eucalipto sob diferentes regimes de irrigação. **Revista Árvore**, v. 32, p. 651-663.

Verma KK, Song XP, Zeng Y, Guo DJ, Singh M, Rajput VD, Malviya MK, Wei KJ, Sharma A, Li DP, Chen GL, Li YR (2021) Foliar application of silicon boosts growth, photosynthetic leaf gas exchange, antioxidative response and resistance to limited water irrigation in sugarcane (*Saccharum officinarum* L.). **Plant Physiology and Biochemistry** 166:582–592.

Zhou S, Medlyn B, Sabaté S, Sperlich D, Prentice IC, Whitehead D (2014) Shorttermwater stress impacts on stomatal, mesophyll and biochemical limitations to photosynthesis differ consistently among treespecies from contrasting climates. **Tree Physiology** 34:1035–1046