



FRANCIS ELIAKIN PORTILLO MAGAÑA

**SELÊNIO (Se) E SILÍCIO (Si) NA ATENUAÇÃO DE
ESTRESSE HÍDRICO NO DESENVOLVIMENTO INICIAL DO
CAFEEIRO (*Coffea arabica*)**

LAVRAS-MG

2024

FRANCIS ELIAKIN PORTILLO MAGAÑA

**SELÊNIO (Se) E SILÍCIO (Si) NA ATENUAÇÃO DE ESTRESSE HÍDRICO NO
DESENVOLVIMENTO INICIAL DO CAFEIEIRO (*Coffea arabica*)**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, área de concentração em Fertilidade do Solo e Nutrição de Plantas, para a obtenção do título de Mestre.

Profa. Dra. Maria Ligia de Souza Silva

Orientadora

Prof. Dr. Flávio Henrique Silveira Rabêlo

Coorientador

LAVRAS-MG

2024

Ficha catalográfica elaborada pelo Sistema de Geração de Ficha Catalográfica da Biblioteca Universitária da UFLA, com dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).

Magaña, Francis Eliakin Portillo.

Selênio (se) e silício (si) na atenuação de estresse hídrico no desenvolvimento inicial do cafeeiro (*coffea arabica*) / francis eliakin portillo magaña. - 2024.

69 p. : il.

Orientador(a): Maria Ligia de Souza Silva.

Coorientador(a): Flávio Henrique Silveira Rabêlo.

Dissertação (mestrado acadêmico) - Universidade Federal de Lavras, 2024.

Bibliografia.

1. Café. 2. Elementos benéficos. 3. Teor nutricional. I. Silva, Maria Ligia de Souza. II. Rabêlo, Flávio Henrique Silveira. III. Título.

FRANCIS ELIAKIN PORTILLO MAGAÑA

**SELÊNIO (Se) E SILÍCIO (Si) NA ATENUAÇÃO DE ESTRESSE HÍDRICO NO
DESENVOLVIMENTO INICIAL DO CAFEIEIRO (*Coffea arabica*)**

**SELENIUM (Se) AND SILICON (Si) IN THE MITIGATION OF WATER STRESS IN
THE EARLY DEVELOPMENT OF COFFEE PLANT (*Coffea arabica*)**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, área de concentração em Fertilidade do Solo e Nutrição de Plantas, para a obtenção do título de Mestre.

APROVADA em 06 de agosto de 2024.

Dra. Maria Ligia de Souza Silva, UFLA.

Dr. Plinio Rodrigues dos Santos Filho, UNIFAL.

Dr. Enes Furlani Junior, UNESP.

Documento assinado digitalmente
 MARIA LIGIA DE SOUZA SILVA
Data: 11/11/2024 16:04:29-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Profa. Dra. Maria Ligia de Souza Silva
Orientadora

Prof. Dr. Flávio Henrique Silveira Rabêlo
Coorientador

LAVRAS-MG
2024

À minha família, minha mãe Besi, meu pai Orlando e meus irmãos Sandra, Wilman e Alexis, agradeço do fundo do meu coração pelo apoio incondicional em todas as etapas da minha vida. Vocês não apenas me apoiaram, mas foram minhas principais inspirações e exemplos de dedicação, amor e perseverança.

DEDICO

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus por Sua orientação, por ser minha fonte de força, perseverança e sabedoria durante esta jornada acadêmica e pessoal. Sua presença foi fundamental.

À Universidade Federal de Lavras (UFLA), por proporcionar o ambiente de aprendizado e pesquisa que foi fundamental para o desenvolvimento deste trabalho. Agradeço especialmente à coordenação do DCS pelo suporte administrativo e acadêmico.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) Código de Financiamento 001, ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) pelo apoio no financiamento do projeto.

À minha orientadora, Dra. Maria Ligia de Souza Silva, gostaria de expressar minha profunda gratidão pela orientação dedicada, percepções valiosas. Sua orientação não apenas foi fundamental para a realização deste trabalho, mas também enriqueceu significativamente minha formação acadêmica e profissional. Sou imensamente grato pela oportunidade de aprender.

Ao meu coorientador, Dr. Flávio Henrique Silveira Rabêlo, expressei minha gratidão pela colaboração, pelo apoio técnico e acadêmico que foram fundamentais para a concretização deste projeto.

À Universidade Federal de Alfenas (UNIFAL), especialmente ao Professor Plinio Rodrigues do departamento de Bioquímica, ao CENA-USP, representado pelo professor José Lavres. Da mesma forma, aos laboratórios que foram fundamentais: Física do Solo (DCS-UFLA), com o professor Bruno Montoani, e Fisiologia Vegetal (DBI/ICN-UFLA), com o Professor Paulo Marchiori. Não posso deixar de mencionar o ICCT-Café, representado por Indira Pereira. Por que brindaram um apoio essencial na logística e na realização das análises.

À técnica do laboratório de Nutrição de Plantas, Aline Marques, pela assistência e suporte técnico no laboratório. Assim como a Anderson Trevizam, pelo apoio e acompanhamento indispensável durante o desenvolvimento dos experimentos.

Ao corpo docente do Departamento de Ciência do Solo (DCS) da UFLA, pelo conhecimento compartilhado em sala de aula e pelos debates enriquecedores que ampliaram minha visão acadêmica.

Aos companheiros do grupo de estudos em Nutrição de Plantas (GENP), Amanda, Ane, Edinei, Fabricio, Joao, Olivia, por sua amizade e trocar ideias e discussões que contribuíram significativamente para o desenvolvimento neste trabalho.

À minha querida família, mãe Besi Magaña, pai Orlando Portillo, meus irmãos, Sandra, Wilman e Alexis pôr o seu amor. Seu apoio foi crucial em este caminho.

Agradeço também a todos os meus colegas do DCS, cuja camaradagem e apoio mútuo tornaram esta jornada mais leve e gratificante. Em especial aos meus amigos: Eder, Javier, Jhon, Katia, Keila, Larissa, Rosalia, Ruth, Sara e Victor.

Muito obrigado a todos!

RESUMO

Constantemente as plantas estão expostas à estresses abióticos, produto das altas temperaturas e da distribuição irregular das precipitações, afetando negativamente a agricultura, especialmente as culturas sensíveis como o *Coffea arábica*. Objetivou-se com este estudo avaliar os efeitos da aplicação de silício (Si) via solo combinadas com doses de selênio (Se) por meio foliar na atenuação do estresse hídrico em plantas de *Coffea arabica* conduzidas até 280 dias após transplantio (DAT). O estudo foi conduzido em casa de vegetação no Departamento de Ciência do Solo da UFLA, no período de dezembro de 2022 a novembro de 2023. Foram instalados dois experimentos simultâneos, cada um em delineamento experimental inteiramente casualizado, com três repetições. Testaram-se aplicações de Si nas doses de 35 e 70 mg Kg⁻¹ aos 85 DAT nos dois experimentos, combinadas com Se nas doses de 5, 10 e 20 g ha⁻¹ aos 95 DAT para o experimento N°1 e aos 240 DAT para o experimento N°2, mais um controle (sem doses de Se e Si) em cada experimento. O período de estresse teve duração de 20 dias, iniciando aos 255 DAT, sendo que inicialmente a água disponível no solo foi reduzida para 60% por 10 dias (umidade monitorada com o sensor Teros 11), e depois para 50% por mais 10 dias. Após esse período, as plantas foram reidratadas por 5 dias consecutivos. Procedeu-se com as avaliações em dois momentos (máximo estresse e reidratação) com leituras de fotossíntese, condutância estomática e transpiração; determinado também a porcentagem do conteúdo relativo de água nas folhas. No final do experimento (280 DAT) avaliou-se o valor nutricional de Se e Si, assim como os macro e micro nutrientes. Também foi determinada a massa seca da parte aérea e da raiz, nesse momento separou-se uma amostra foliar para avaliar a composição isotópica do carbono treze (δC^{13}). Os teores de Se nos tecidos das plantas variam de 2,35 a 4,92 mg kg⁻¹ para a época de aplicação 95 DAT e de 2,84 a 4,21 mg kg⁻¹ para 240 dias DAT. Os valores para Si variam entre 7,02 a 9,12 g kg⁻¹. As plantas em que aplicou-se a dose de 35 mg Kg⁻¹ de Si combinada com 5 g ha⁻¹ de Se aos 95 DAT, apresentaram um ganho de 30,8% na MSPA e 34,35 na MSR, mostrando também uma maior taxa fotossintética (3,13 $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$). As plantas de café arábica apresentaram valores para δC^{13} entre -25,97 e -27,78 ‰. Conclui-se que ao aplicar doses de 35 mg Kg⁻¹ de Si combinadas com 5 g ha⁻¹ de Se realizadas antecipadamente (95 DAT) ao período de déficit hídrico podem melhorar a tolerância do cafeeiro, favorecendo seu crescimento e aumentando sua resistência. Esses resultados são promissores para mitigar os impactos negativos das mudanças climáticas na cafeicultura. Além disso, observou-se que a menor concentração de Si e Se nos tecidos foliares está associada à maior tolerância em *Coffea arabica*, indicando uma via potencial para otimizar práticas de manejo visando à adaptação climática das plantas.

PALAVRAS-CHAVE: Café. Elementos Benéficos. Teor nutricional. δC^{13} .

ABSTRACT

Plants are constantly exposed to abiotic stresses, resulting from high temperatures and irregular rainfall distribution, negatively affecting agriculture, especially sensitive crops such as *Coffea arabica*. The aim of this study was to evaluate the effects of silicon (Si) application via soil combined with selenium (Se) doses via foliar application in the attenuation of water stress in *Coffea arabica* plants grown up to 280 days after transplanting (DAT). The study was conducted in a greenhouse at the Department of Soil Science at UFLA, from December 2022 to November 2023. Two simultaneous experiments were installed, each in a completely randomized experimental design, with three replicates. Si applications at doses of 35 and 70 mg kg⁻¹ were tested at 85 DAT in both experiments, combined with Se at doses of 5, 10 and 20 g ha⁻¹ at 95 DAT for experiment No. 1 and 240 DAT for experiment No. 2, plus a control (without Se and Si doses) in each experiment. The stress period lasted 20 days, starting at 255 DAT, and initially the available water in the soil was reduced to 60% for 10 days (humidity monitored with the Teros 11 sensor), and then to 50% for another 10 days. After this period, the plants were rehydrated for 5 consecutive days. Evaluations were carried out at two moments (maximum stress and rehydration) with readings of photosynthesis, stomatal conductance and transpiration; the percentage of relative water content in the leaves was also determined. At the end of the experiment (280 DAT), the nutritional value of Se and Si, as well as other macro and micro nutrients, was evaluated. The dry mass of the aerial part and root was also determined, at which time a leaf sample was separated to evaluate the isotopic composition of carbon thirteen (δC^{13}). The Se contents in the plant tissues ranged from 2.35 to 4.92 mg kg⁻¹ for the application time of 95 DAT and from 2.84 to 4.21 mg kg⁻¹ for 240 days DAT. The values for Si ranged from 7.02 to 9.12 g kg⁻¹. Plants that received the dose of 70 mg kg⁻¹ Si combined with 5 g ha⁻¹ Se at 95 DAT showed a gain of 30.8% in MSPA and 34.35 in MSR, also showing a higher photosynthetic rate (3.13 $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$). *Coffea arabica* plants showed δC^{13} values between -25.97 and -27.78 ‰. It is concluded that applying doses of 35 mg kg⁻¹ Si combined with 5 g ha⁻¹ Se applied in advance (95 DAT) to the water deficit period can improve coffee tolerance, favoring its growth and increasing its resistance. These results are promising for mitigating the negative impacts of climate change on coffee production. Furthermore, it was observed that the lower concentration of Si and Se in leaf tissues is associated with greater tolerance in *Coffea arabica*, indicating a potential way to optimize management practices aimed at the climate adaptation of plants.

KEYWORDS: Coffee. Beneficial Elements. Nutritional Content. δC^{13} .

INDICADORES DE IMPACTO

A pesquisa sobre o efeito da adubação com selênio e silício no desenvolvimento inicial do cafeeiro apresenta impactos significativos nos âmbitos ambiental, econômico e tecnológico. Os resultados indicaram que aplicações de 35 mg kg^{-1} de Si com 160 dias de antecedência frente a um período de restrição hídrica combinadas com 5 g ha^{-1} de Se com antecipação de 170 dias, promovem maior produção de matéria seca da parte aérea (MSPA) e de raízes (MSR), beneficiando a formação da planta em condições adversas. Esse achado sugere que a aplicação antecipada de Se e Si pode ser uma estratégia viável para aumentar a resiliência de culturas importantes, como o cafeeiro, especialmente em regiões suscetíveis a períodos de seca. Com impactos econômicos e tecnológicos a utilização de esses elementos benéficos no cultivo do cafeeiro contribui para a redução de custos, ao tornar o uso da água mais eficiente. No aspecto tecnológico, essas descobertas sobre doses combinadas de selênio e silício abrem caminho para o desenvolvimento de novas abordagens voltadas para o aumento da resiliência das plantas frente às mudanças climáticas. O Alinhamento com os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) é pôr o seu impacto direto no cultivo do café, a pesquisa apoia os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável da ONU, especialmente o ODS 2 (Fome zero e agricultura sustentável), ODS 8 (Trabalho decente e crescimento econômico), ODS 12 (Consumo e produção responsáveis) e ODS 13 (Ação contra a mudança global do clima). Esses objetivos promovem a produtividade e incentivam o uso mais eficiente dos recursos hídricos. Em conclusão, este estudo destaca que a aplicação de elementos benéficos como selênio e silício contribui para a resiliência do cafeeiro em resposta ao estresse hídrico, favorecendo o crescimento inicial e a adaptação da planta em regiões desafiadoras.

IMPACT INDICATORS

Research on the effects of selenium and silicon fertilization on the early development of coffee plants presents significant environmental, economic, and technological impacts. Results indicated that applications of 35 mg kg^{-1} of Si, applied 160 days in advance of a water restriction period, combined with 5 g ha^{-1} of Se applied 170 days in advance, promote higher production of shoot dry matter (MSPA) and root dry matter (MSR), benefiting plant formation under water restriction conditions. This finding suggests that early applications of Se and Si may be a viable strategy to increase the resilience of important crops, such as coffee, particularly in regions prone to drought.

Economic and Technological Impacts: The use of beneficial elements in coffee cultivation contributes to cost reduction by enhancing water use efficiency. From a technological standpoint, these discoveries regarding combined doses of selenium and silicon pave the way for developing new approaches aimed at enhancing plant resilience to climate change.

Alignment with Sustainable Development Goals (SDGs): Beyond its direct impact on coffee cultivation, this research supports the United Nations Sustainable Development Goals, especially SDG 2 (Zero Hunger and Sustainable Agriculture), SDG 8 (Decent Work and Economic Growth), SDG 12 (Responsible Consumption and Production), and SDG 13 (Climate Action). These goals promote productivity and encourage more efficient use of water resources.

In conclusion, this study highlights that the application of beneficial elements such as selenium and silicon contributes to coffee plant resilience under water stress, supporting early growth and plant adaptation in challenging regions.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	13
2	REFERENCIAL TEÓRICO	15
2.1	Cultura do café	15
2.2	Silício (Si)	16
2.3	Selênio (Se)	17
2.2	Efeitos do déficit hídrico.....	18
3	OBJETIVOS.....	21
3.1	Objetivo general.....	21
3.2	Objetivos específicos.....	21
4	HIPÓTESES	22
5	MATERIAL E MÉTODO	23
5.1	Local do experimento.....	23
5.2	Solo	23
5.3	Material vegetal.....	23
5.4	Instalação e desenvolvimento do experimento.....	24
5.5	Delineamento experimental.....	24
5.6	Tratamentos.....	25
5.7	Períodos de estresse.....	26
5.8	Avaliações	27
5.8.1	Análises nutricionais	28
5.8.2	Conteúdo de silício (Si).....	28
5.8.3	Conteúdo de macronutrientes, micronutrientes e Se	28
5.8.4	Medidas do conteúdo relativo de água.....	28
5.8.5	Avaliações das trocas gasosas	29
5.8.6	Determinação de Matéria Seca.....	29
5.8.7	Composição isotópica de carbono foliar ($\delta^{13}\text{C}$).....	30
5.9	Análise estatística	30
6	RESULTADOS	31
6.1	Aplicação de Si aos 85 DAT e Se aos 95 DAT em plantas de <i>Coffea arabica</i>	31
6.2	Aplicação de Si aos 85 DAT e Se aos 240 DAT em plantas de <i>Coffea arabica</i> ..	40
7	DISCUSSÃO.....	50
7.1	Aplicação de Si aos 85 DAT e Se aos 95 DAT em plantas de <i>Coffea arabica</i>	50
7.2	Aplicação de Si aos 85 DAT e Se aos 240 DAT em plantas de <i>Coffea arabica</i> ..	55

8	CONSIDERAÇÕES.....	61
	REFERÊNCIAS.....	3

1 INTRODUÇÃO

As mudanças do clima estão causando eventos meteorológicos extremos mais frequentes e intensos, como secas e inundações, que têm grande impacto nos sistemas de produção de alimentos (FAO, 2023). Especificamente o aumento da temperatura e mudanças nos padrões de precipitação têm fortes consequências na agricultura das diferentes regiões do mundo (ONU, 2020). Segundo Damatta *et al.* (2006), a seca não ocorre apenas no Brasil, que se destaca na produção de café, mas em vários países que têm como principal fonte de divisas a agricultura, sendo assim o estresse ambiental passa a ser um dos fatores mais importantes que pode afetar o crescimento e a produtividade do cafeeiro.

Dentro todos os fatores de estresse, o déficit hídrico na etapa inicial da cultura do cafeeiro pode ser considerado um fator limitante do desenvolvimento, pois a maioria das culturas de café estão localizadas em áreas com vulnerabilidade climática (Aparecido, 2021). O estado hídrico da planta está intimamente relacionado com importantes processos fisiológicos como a transpiração, fotossíntese, respiração e o crescimento, os quais vão ser fortemente influenciados por mudanças no estado hídrico da folha (Peloso *et al.*, 2016).

Neste contexto, embora não sejam considerados elementos essenciais para as plantas, o Selênio (Se) e o Silício (Si) podem ser uma alternativa para melhorar os indicadores de crescimento e desenvolvimento, ativando mecanismos de resposta a diferentes tipos de estresse (Pilon *et al.*, 2015). O Si é conhecido por sua influência na resistência das plantas, pois atua como uma barreira física, tendo importância para muitas reações, como estado nutritivo, transpiração e, talvez, alguns aspectos da eficiência fotossintética (Deren *et al.*, 1994).

Por outro lado, o Se regula o conteúdo de água no tecido vegetal e ativa mecanismos antioxidantes (Pilon-Smits *et al.*, 2009; White, 2016). Nesse contexto, muitos trabalhos mostraram que o Se fornece resistência para a planta de cafeeiro quando é submetida a períodos de baixa temperatura (Sousa *et al.*, 2022). Também, Martinati (2008), concluiu que quando se adicionou Si a solução nutritiva para plantas de cafeeiro, houveram respostas bioquímicas e enzimas do sistema antioxidante.

Porém, para a cultura de café ainda não está claro como o Se e Si, podem atuar frente ao estresse hídrico. Além disso, é importante conhecer a melhor época para fornecer esses elementos às plantas, para que elas estejam preparadas e apresentem resposta aos diferentes períodos de secas durante sua etapa inicial de desenvolvimento. Assim, objetivou-se com o

presente trabalho estudar diferentes doses de Se e Si, aplicadas em duas épocas, no desenvolvimento inicial de plantas de *Coffea arabica* cv. Arara, frente à suspensão gradual da irrigação, simulando um período de seca depois do transplântio.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Cultura do café

O café pertence à família Rubiaceae, grupo que inclui cerca de 500 gêneros e mais de 6.000 espécies, principalmente árvores e arbustos tropicais. O gênero *Coffea* tem mais de 100 espécies, todas nativas da África tropical e ilhas do Oceano Índico, como Madagascar (Rojo, 2014). As duas espécies mais importantes do ponto de vista econômico são *Coffea arabica* L. (café arábica) e *Coffea canéfora* Pierre (café robusta). O *Coffea arabica* é uma planta tropical de altitude, adaptada a clima úmido com temperaturas amenas, típicas dos altiplanos da Etiópia, sendo considerada esta região como a origem da espécie (Matiello *et al.*, 2005).

As plantas de *Coffea arabica* são descritas como arbustos monocaules, com até 4,0 m de altura, com ramificação plagiotrópica do tipo horizontal, as folhas são ovaladas, com bordos ondulados, medindo cerca de 10 cm a 15 cm de comprimento por 4 a 6 cm de largura. A coloração predominante é verde escuro brilhante, nos vértices formados entre as nervuras secundárias e a principal, geralmente ocorrem minúsculas cavidades denominadas domácias (Coste, 1955; Thomaziello *et al.*, 2000).

No Brasil, o café arábica tem um maior desenvolvimento em áreas com altitude de mais de 1.000 metros acima do nível do mar, em clima temperado, temperatura média de 19°C a 22°C e chuvas bem distribuídas ao longo do ano (Guimarães *et al.*, 2020). Com uma participação de 79.8% do café arábica se estima uma produção anual de 42,11 milhões de sacas. O Brasil manteve sua posição de maior produtor e maior exportador de cafés do mundo, além de ser o segundo maior consumidor, perdendo apenas para os Estados Unidos da América (CONAB, 2024).

Manter um nível de alta produtividade nas lavouras de café é sempre um desafio para os produtores, que estão constantemente procurando estratégias para neutralizar os efeitos negativos do clima que afetam o crescimento e o desenvolvimento da planta. Entre as atividades para que as plantas apresentem um bom desenvolvimento, diversos fatores de produção estão envolvidos, dentre estes destaca-se o fornecimento adequado dos nutrientes como Nitrogênio (N), Fósforo (P), Potássio (K), cálcio (Ca), Magnésio (Mg), Enxofre (S), Boro (B), Cloro (Cl), Cobre (Cu), Ferro (Fe), Manganês (Mn), Molibdênio (Mo), Níquel (Ni) e Zinco (Zn) (Dechen; Nachtigall, 2006). Também existe um grupo de elementos chamados benéficos, não essenciais, mas que ajudam em funções específicas dentro das plantas, mas em excesso podem afetar negativamente o crescimento e a produtividade das culturas.

Os elementos benéficos são aqueles que na sua presença e em condições específicas promovem o crescimento nas plantas, assim como aumentos na produção, mas não são indispensáveis ou têm necessidade restrita a certas espécies de plantas. Esta definição pode ser aplicada para elementos como silício (Si), selênio (Se), sódio (Na) e cobalto (Co) (Pilon; Smits *et al.*, 2009).

2.2 Silício (Si)

O silício (Si) é o segundo elemento mais abundante na crosta terrestre, ocupando um 27,7% de sua composição (Dechen; Nachtigall, 2006). Encontrado na forma de ácido silícico (H_2SiO_3) na solução do solo, faz parte de rochas, argilas e areias (Epstein, 1994). A presença do silício no solo está diretamente ligada ao nível de intemperismo, sendo mais comum em solos recentemente formados (Menegale; Castro *et al.*, 2015). Este elemento pode ser absorvido pelas raízes das plantas mediante processos de difusão, fluxo de massa ou transportadores de membrana como Lsi1 e Lsi2, na forma de ácido monossilícico (H_4SiO_4).

Depois da absorção, o transporte do elemento é via xilema. Apresentando uma redistribuição muito baixa, o que permite que seja depositado nas folhas como sílica ($\text{SiO}_2\text{H}_2\text{O}$) abaixo da cutícula, atuando na redução da transpiração da planta. Sua concentração pode representar entre um 0,1% a 10,0% da matéria seca massa (Liang *et al.*, 2007), podendo variar significativamente entre espécies já que pode se relacionar com a capacidade da planta em acumular Si. Nos tecidos das plantas o Si pode apresentar teores equivalentes aos de nitrogênio, fósforo e potássio obtidos de fertilizantes (Dechen; Nachtigall, 2006).

Os benefícios do Si são cada vez mais reconhecidos como elemento benéfico para as plantas em resposta aos estresses bióticos e abióticos, como estresse salino, hídrico e a resistência das plantas (Epstein, 1994). Também, Sonobe *et al.* (2011) sugeriram que o Si pode melhorar a absorção de água pela raiz no estresse hídrico, aumentar o acúmulo de açúcares solúveis e aminoácidos.

Bioquimicamente, as plantas alteram o metabolismo de várias maneiras para resistir ao estresse ambiental, incluindo a formação e/ou acúmulo de compostos osmorreguladores. O Si pode ativar várias estratégias de defesa, incluindo síntese de compostos fenólicos e produção de lignina, suberina e calose na parede da célula vegetal (Menzies *et al.*, 1991; Epstein, 1999). Além disso, é observado o aumento na capacidade fotossintética quando as plantas recebem uma nutrição com uma fonte de Si. Isso pode estar relacionado ao fato do elemento permitir um

bom desenvolvimento da estrutura foliar da planta, mantendo as folhas mais eretas e menos danificada por agentes bióticos ou abióticos (Silva, 2020).

As plantas não acumuladoras de Si o absorvem mais lentamente, aumentando assim sua concentração no meio, enquanto as plantas acumuladoras o absorvem mais rapidamente pelo fluxo de água em massa. Após a absorção, ocorre o transporte a longa distância através do xilema e é distribuído na parede celular na forma de sílica amorfa hidratada, contribuindo para a rigidez e elasticidade dos tecidos (Valledo; Alvarado, 2011).

De acordo com a literatura, ainda não foi definida a quantidade máxima de Si a ser aplicada, e não se identificou o efeito tóxico deste elemento em plantas. No entanto, é importante ressaltar que doses elevadas desse elemento podem provocar aumento excessivo no pH do solo, reduzindo a disponibilidade de micronutrientes e fósforo para as plantas, considerando assim o efeito corretivo dos silicatos (Korndorfer *et al.*, 2002). Os danos nas plantas ocorrem de maneira indireta e pela fonte que normalmente é utilizada, e não pelo elemento em si.

Apesar de sua abundância, uma porção significativa de Si não é facilmente acessível às plantas. Consequentemente, a aplicação de fertilizantes de Si pode melhorar o crescimento das plantas e melhorar a sua resistência a vários estresses (Hassan *et al.*, 2018; Krishan *et al.*, 2020).

2.3 Selênio (Se)

O Selênio é um metaloide de ocorrência natural de rochas sedimentares formado durante o período carbonífero e quaternário, designado como elemento do calcogênio (grupo 16) com propriedades químicas semelhantes ao enxofre (S). Este elemento forma ligações covalentes com o carbono e é encontrado em uma variedade de compostos organosselênicos, incluindo os selenoaminoácidos, selenocisteína (SeCys), selenometionina (SeMet) e selenoproteínas (Wan *et al.*, 2019; Fox *et al.*, 2020).

A essencialidade do Se como nutriente nas plantas ainda não foi comprovada, no entanto, este elemento pode ter um efeito benéfico em diferentes espécies de plantas (Silva *et al.*, 2018), o que contribui para o crescimento e desenvolvimento de plantas sob estresse biótico ou abiótico (Gupta, 2016).

Em baixas concentrações o Se aumenta a concentração de pigmentos fotossintetizantes, promove incremento da biomassa vegetal, ativa enzimas antioxidantes como catalase (CAT), ascorbato peroxidase (APX), dismutase do superóxido (SOD) e peroxidase (POD) ou atuando

diretamente em funções de oxidação e redução, combatendo espécies reativas de oxigênio e inibindo a formação de compostos lipídicos oxidados como malondialdeído (Golob *et al.*, 2020).

No entanto, altas concentrações de Se tem efeitos tóxicos nas plantas, assumindo uma forma não enzimática em que o selenito é rapidamente reduzido a seleneto pela enzima Redutase da Glutathione (GR), limitando assim a produção de superóxido (Silva *et al.*, 2017), induzindo a peroxidação nas células e alterando a atividade redox da planta (Reis *et al.*, 2020). Exemplos característicos de toxicidade de Se em plantas incluem clorose generalizada e, posteriormente, necrose no tecido foliar (Mostofa *et al.*, 2017). Devido à sua toxicidade, depósitos de sal rosa no interior das folhas, são observados em feijão cupi (Silva *et al.*, 2018).

2.2. Efeitos do déficit hídrico.

As plantas necessitam de fatores como radiação, temperatura, CO₂, macro e micronutrientes para o seu adequado crescimento e desenvolvimento. A água é considerada o fator de maior importância, correspondendo a 90% do seu peso total em algumas plantas, participando em todos os processos bioquímicos e fisiológicos, além de agindo como solvente no transporte de minerais e compostos orgânicos e gases. Atuando também na regulação térmica, mantendo e distribuindo o calor na planta (Costa, 2007).

O déficit hídrico pode levar a um estresse nas plantas. Isso acontece quando a quantidade de água que a planta perde através da transpiração das folhas, pelos estômatos, excede sua capacidade de absorver água do solo. Segundo Tardieu (2005), quando as plantas são expostas a períodos de restrição hídrica, basicamente respondem mediante três estratégias para poder crescer e desenvolver-se adequadamente, são elas:

- (i) Escapar do déficit hídrico, por exemplo, por meio de um curto ciclo de cultivo.
- (ii) Evitar o déficit hídrico, reduzindo a transpiração ou aumentando a absorção de água.
- (i) Manter o crescimento sob déficit hídrico, por meio de mecanismos de sobrevivência.

Uns dos parâmetros fisiológicos, como o conteúdo relativo de água (CRA) tem função de auxiliar estudos em plantas cultivadas sob condição de estresse. A capacidade de recuperação das plantas após a reidratação é um componente importante, e no caso particular do déficit hídrico, o balanço de carbono depende não apenas da redução da taxa fotossintética em

consequência do estresse, mas também sobre a capacidade de recuperação após a disponibilidade de hídrica (Rodrigues *et al.*, 2013).

Algumas características bioquímicas são essenciais para aumentar a tolerância ao estresse hídrico, incluindo a capacidade de transportar fotoassimilados da parte aérea para as raízes. Isso possibilita um maior crescimento radicular, permitindo às plantas acessar camadas mais profundas do solo e aumentar a absorção de água (Silva *et al.*, 2010). No café arábica, o fechamento estomático é frequentemente considerado como o principal indicador de déficit hídrico (DaMatta, 2003). No entanto, observa-se que há uma maior sensibilidade estomática à demanda evaporativa do ar nas variedades arábica (Ronchi; DaMatta, 2007).

A resposta direta dos estômatos às variações na umidade relativa tem consequências significativas para a capacidade das plantas de tolerar períodos prolongados de déficit hídrico no solo, especialmente em condições de alta demanda evaporativa na atmosfera. Nessas circunstâncias, um fechamento rápido dos estômatos é vantajoso para o cafeeiro, pois resulta em uma redução substancial da transpiração. Por outro lado, em condições de disponibilidade hídrica adequada ou períodos curtos de déficit hídrico, a sensibilidade dos estômatos à umidade do ar pode ser desfavorável. Nestas condições, maximizar a absorção de CO₂ para a fotossíntese se torna mais crucial do que reduzir a transpiração, em termos de manter a produtividade sob condições de seca (DaMatta, 2003).

O carbono presente no CO₂ atmosférico é composto por aproximadamente 1,1% do isótopo mais pesado, ¹³C, e 98,9% do isótopo mais leve, ¹²C. Durante o processo de fixação de carbono, as plantas demonstram preferência pelo isótopo mais leve, o que resulta numa composição isotópica de carbono mais negativa no material vegetal em comparação com o CO₂ atmosférico (Marion; O'Leary, 1981). O valor de $\delta^{13}\text{C}$ é influenciado por efeitos isotópicos durante a difusão do CO₂ da atmosfera para o cloroplasto e durante as reações de carboxilação. Esses processos são afetados por diversos fatores, incluindo a regulação estomática das trocas gasosas foliares e a relação entre as concentrações intercelular (C_i) e atmosférica (C_a) de CO₂ (Farquhar *et al.*, 1989).

Alterações no $\delta^{13}\text{C}$ podem surgir de mudanças na eficiência da carboxilação, na condutância estomática (g_s) ou em ambos. A composição isotópica do carbono ($\delta^{13}\text{C}$) é baseada na proporção dos isótopos estáveis de carbono, ¹³C/¹²C, que é menor no tecido vegetal do que na atmosfera, devido ao fracionamento isotópico durante a fotossíntese e à composição isotópica do carbono na biomassa, principalmente determinada pela disponibilidade de água e

pela limitação estomática (Bowling, 2002). Portanto, a determinação do carbono geralmente se refere à medição da quantidade de carbono em uma amostra. Por outro lado, a composição isotópica do carbono ($\delta^{13}\text{C}$) refere-se à proporção dos isótopos estáveis de carbono, especificamente a proporção de ^{13}C para ^{12}C , em uma amostra em relação a um padrão.

3 OBJETIVOS

3.1. Objetivo general.

Avaliar a influência do Silício e Selênio na atenuação de estresse hídrico no desenvolvimento inicial de plantas de *Coffea arabica*.

3.2. Objetivos específicos.

1. Estimar a época de aplicação de Se e Si no primeiro ano de desenvolvimento de plantas de café arábica;
2. Comparar a eficiência de Si e Se na atenuação do estresse hídrico em plantas de café arábica;
3. Determinar uma dose adequada de Si e Se para ser usada em atenuação do estresse hídrico em desenvolvimento inicial de plantas de café arábica.

4 HIPÓTESES

1. Adubações com doses de Se e Si otimizam o aproveitamento da água pela planta favorecendo assim a resistência frente ao período de déficit hídrico;
3. Aplicações antecipadas de Se e Si possibilitam nas plantas de café maior resistência frente ao período de déficit hídrico;
4. Aplicações associadas de Se e Si possibilitam nas plantas de café maior resistência frente ao período de déficit hídrico.

5 MATERIAL E MÉTODO

5.1 Local do experimento

O experimento foi realizado em casa de vegetação do Laboratório de Nutrição de Plantas, Departamento de Ciência do Solo da Universidade Federal de Lavras (UFLA), com coordenada 21°13'35.363"S 44°58'45.416"W e 918 metros acima do nível do mar, no período de dezembro de 2022 até novembro de 2023. O clima de Lavras, segundo a classificação climática de Köppen, é Cwa, temperado chuvoso (mesotérmico) com inverno seco e verão chuvoso, subtropical (Dantas; Carvalho; Ferreira, 2007). Dentro da casa de vegetação foram medidas as condições de temperatura (°C) e umidade relativa do ar (%), utilizando um data loggers do modelo UX100-003 (HOBO).

5.2 Solo

O solo usado foi um Latossolo Vermelho distroférrico (LVdf), coletado na profundidade de 0-0,20 m, seco ao ar e passado em peneira de 4 mm para obtenção de terra fina. Posteriormente foi analisado quanto aos seus atributos químicos e granulométricos (Tabela 1).

Tabela 1. Análise do solo utilizado no experimento

pH	Al	H+Al	Ca	Mg	K	P	B	Cu	Fe	Mn	Zn	S
-----cmol _c /dm ³ ----- --mg/dm ³ -- -----mg dm ⁻³ -----												
4,6	0,3	6,2	0,39	0,14	18,73	0,1	0,04	1,64	30,1	2	0,7	2,3
MO	SB	t		T		V	mAA	Areia	Silte	Argila		
dag kg ⁻¹		cmol _c dm ⁻³				%				g kg ⁻¹		
2,67	0,58	0,88		6,78		8,53	34,09	200	130	670		

pH em água: potencial hidrogeniônico em água; Al: Alumínio– extrator: KCl 1 mol L⁻¹; H + Al: Acidez potencial; Ca: Cálcio; Mg: Magnésio; K: Potássio; P: fósforo-Rem: Fósforo Remanescente; B: Boro; Cu: Cobre; Fe: Ferro; Mn: Manganês; Zn: Zinco; S: Enxofre– extrator: Fosfato monocálcio em ácido acético; MO: Matéria Orgânica– oxidação: Na₂Cr₂O₇ 4N + H₂SO₄ 10N; SB: Soma de Bases Trocáveis; t: Capacidade de Troca Catiônica efetiva; T: Capacidade de Troca Catiônica a pH 7 ; V: Saturação por bases; M: Índice de Saturação de Al, P, K, Fe, Zn, Mn e Cu – extrator: Mehlich 1, H + Al – Extrator: SMP.

Com base na análise química, o solo foi corrigido com a incorporação de carbonato de cálcio p.a, visando elevar a saturação por bases para 60%, em seguida foi irrigado com água deionizada até sua capacidade de campo mantendo essa umidade durante todo o período de incubação (60 dias).

5.3 Material vegetal

Foram usadas mudas de *Coffea arabica* cv. Arara. Esse cultivar se destaca na cafeicultura, por apresentar, bom vigor, alta produtividade, alta resistência à doença ferrugem

e tolerância a pseudomonas. Além disso a cultivar se destaca na qualidade da bebida, obtendo pontos altos em competições (Matiello; Almeida, 2018). As mudas foram adquiridas em viveiro comercial, padronizadas pelo crescimento e número de pares de folhas e aclimatadas à casa de vegetação por um período de 15 dias. Após esse período foram colocadas em vasos de polietileno rígido com capacidade de 10 kg.

5.4 Instalação e desenvolvimento do experimento

Em cada vaso foi transplantada uma muda de café que ficaram bem alinhadas no centro e ao nível do solo. Para propiciar à muda uma condição favorável ao seu enraizamento abundante e profundo, no momento do transplântio se realizou adubação fosfatada com Superfosfato Triplo (46% P_2O_5) seguindo a recomendação de Cantarella *et al.* (2022), sendo aplicado $0,22 \text{ g kg}^{-1}$ do produto.

Uma vez realizado o transplântio das mudas de café, o experimento foi conduzido de acordo com o recomendado para a cultura, para poder reduzir o estresse por transplântio. O plano de adubação foi distribuído em quatro parcelas com intervalo de 30 dias entre cada uma, sendo feitas aos 35, 65, 95 e 125 dias após transplântio (DAT). As doses utilizadas em cada parcelamento foram referentes a 12 mg kg^{-1} de N, 4 mg kg^{-1} de P_2O_5 e 4 mg kg^{-1} K_2O , usando como fontes os seguintes fertilizantes: Ureia, Sulfato de amônio $(NH_4)_2SO_4$, Fosfato Monoamônico (MAP) e Cloreto de Potássio (KCl). As adubações foram aplicadas na forma de solução.

Aos 45 DAT foi aplicado Sulfato de Cálcio P.A (15% de S) como fonte de S, na dose de 40 mg kg^{-1} . Além disso, aos 75 DAT, foi feita adubação com $FeSO_4 \cdot 7H_2O$ na dose de 30 mg kg^{-1} . Realizou-se também a adubação de micronutrientes, utilizando como fonte a solução de micronutrientes de Hoagland e Arnon (1950), na dose de 1 mL kg^{-1} .

5.5 Delineamento experimental

O delineamento experimental utilizado foi o inteiramente casualizado (DIC), com três repetições em esquema fatorial $3 \times 2 + 1$ constituído por aplicação de três doses de Se (5, 10, 20 g ha^{-1}) aplicados via foliar; duas doses de Si (35 e 70 mg kg^{-1}) aplicados via solo, mais um controle, sem aplicação desses elementos. Foram instalados dois experimentos simultâneos, contendo cada os mesmos tratamentos, variando somente a época de aplicação de Se. No experimento Nº 1 foi aplicado o Se aos 95 DAT (aplicação antecipada) e no experimento Nº 2 a aplicação de Se foi feita aos 240 DAT (aplicação 15 dias antes de induzir o déficit hídrico).

Em ambos experimentos, o Si foi aplicado aos 85 DAT. Cada experimento foi composto por 21 unidades amostrais.

5.6 Tratamentos

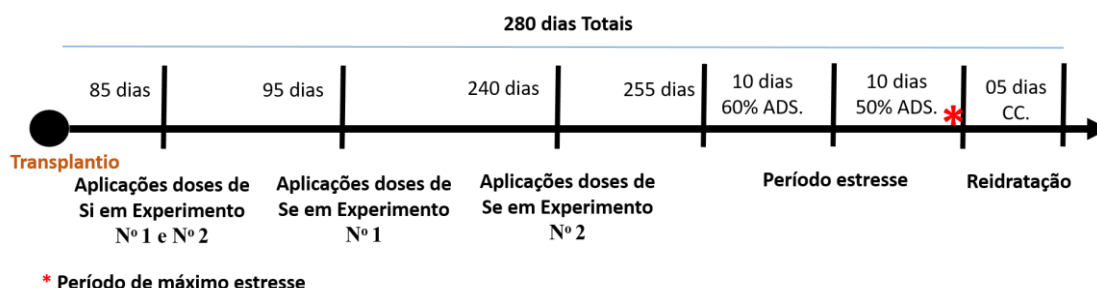
Na Tabela 2 são detalhadas as doses utilizadas em ambos experimentos.

Tabela 2. Tratamentos aplicados

Tratamento	Se	Si
Controle	0 g ha ⁻¹	0 mg kg ⁻¹
Tratamento 1 (T1)	5 g ha ⁻¹	35 mg kg ⁻¹
Tratamento 2 (T2)	5 g ha ⁻¹	70 mg kg ⁻¹
Tratamento 3 (T3)	10 g ha ⁻¹	35 mg kg ⁻¹
Tratamento 4 (T4)	10 g ha ⁻¹	70 mg kg ⁻¹
Tratamento 5 (T5)	20 g ha ⁻¹	35 mg kg ⁻¹
Tratamento 6 (T6)	20 g ha ⁻¹	70 mg kg ⁻¹

Foi utilizada Wollastonita-CaSiO₃ (23% Si total, 4,6% de Si solúvel, 46% de CaO) como fonte de Si e Selenato de sódio-Na₂SeO₄ (98,9%) como fonte de Se. Conforme detalhado na Figura 1, esses tratamentos foram aplicados da seguinte maneira: aos 85 dias DAT aplicou-se as doses de Si, em todas as unidades experimentais, nos dois experimentos. Aos 95 DAT foram aplicadas as doses de Se no experimento N° 1 e posteriormente aos 240 DAT, foram aplicadas as doses de Se no experimento N° 2.

Figura 1. Linha do tempo das atividades desde o transplântio, aplicação dos tratamentos, período de estresse (déficit hídrico) e reidratação das plantas de café.



As doses de Se foram aplicadas sobre as faces superiores e inferiores das folhas das plantas de café, depositando com um pulverizador manual, utilizando um volume de 10 mL de solução (dose do tratamento de Na_2SeO_4 + 0,5% v/v de óleo mineral) por planta, obtendo assim total molhamento foliar, sem escorrimento. Para as doses de Si aplicou-se Wollastonita ao solo, aplicada circundando a planta, considerando uns 5 cm do colo.

5.7 Períodos de estresse

Durante a execução do experimento, as plantas foram submetidas a um período de estresse causado por déficit hídrico, aos 255 DAT, realizado entre os meses de outubro e novembro de 2023 e com uma duração de 20 dias. Para a indução do déficit hídrico, a água disponível no solo dos vasos foi reduzida gradualmente, primeiramente para 60% por 10 dias, depois foi reduzida para 50% por mais 10 dias, o dia 20 se considerou o período de maior estresse. Depois desse período as plantas voltaram a receber irrigação normalmente até sua capacidade de campo, mantendo essa condição durante 5 dias consecutivos (período de reidratação). Esse período de estresse por déficit hídrico foi realizado nos dois experimentos (Nº1 e Nº2) ao mesmo tempo, conforme mostrado na Figura 2.

Para avaliar a umidade do solo foi usado o sensor Teros 11 (METER) o qual foi calibrado. A umidade inicial do solo determinada pelo método gravimétrico no laboratório foi de 9,22%. Além disso, observando-se os valores de umidade volumétrica obtida para a capacidade de campo (CC) em 29,90% determinada na tensão de 0,01 MPa e para o ponto de murcha permanente (PMP) em 25,78% na tensão de 1,5 MPa. A água disponível no solo (AD) foi determinada fazendo uso da seguinte expressão: $AD = CC - PMP$ (Centurion; Andreoli, 2000).

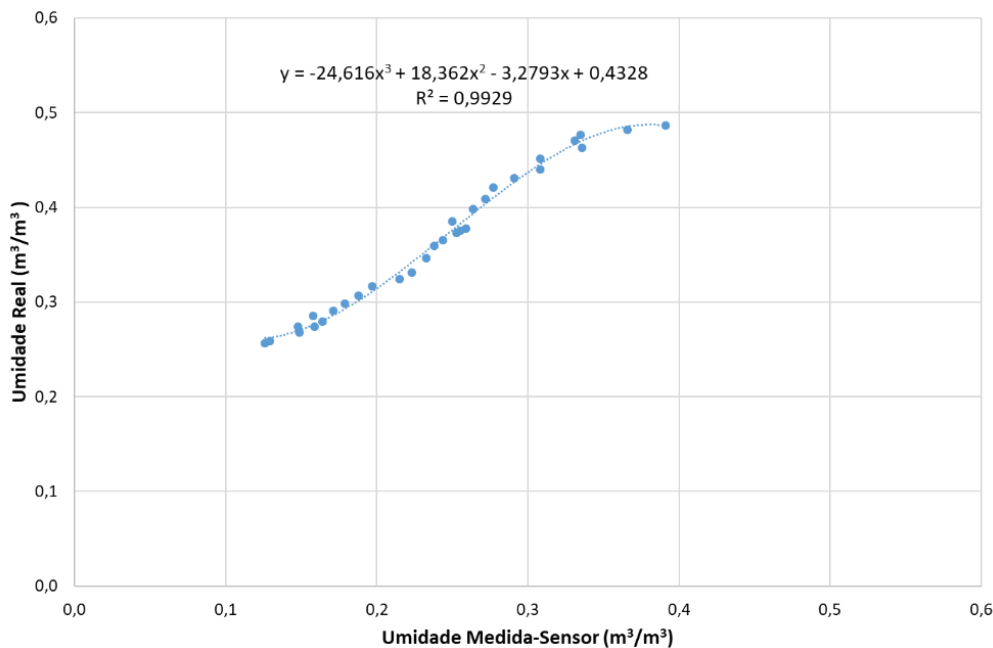
Para realizar as medições, as leituras do sensor foram calibradas, medindo-se o peso de três vasos com solo, saturando-os e permitindo que drenassem até a capacidade de campo. Todas as leituras do sensor foram correlacionadas com o peso (kg) dos vasos a cada três horas, até obter peso constante. Com base na umidade medida no laboratório e o peso do solo dos vasos, a umidade real do solo foi calculada usando a seguinte formula:

$$U = (MU - MS) / MS.$$

Onde: U é Umidade, MU é massa úmida e MS a massa seca.

A partir desses dados de umidade (do sensor e calculada), foi elaborada uma curva de umidade (Figura 2), realizada pelo modelo polinômio e derivada a seguinte equação: $-24,616 \cdot (\text{Leitura do sensor})^3 + 18,362 \cdot (\text{Leitura do sensor})^2 - (3,2793 \cdot \text{Leitura do sensor}) + 0,4328$.

Figura 2. Curva para umidade volumétrica estimada de um Latossolo Vermelho distroférrico (LVdf).



Com essa equação foi possível calcular uma estimativa de umidade para cada leitura feita pelo sensor. Os cálculos foram realizados para alcançar os valores de 60% e 50% da AD no solo. Durante o período que as plantas estavam sob estresse por déficit hídrico, a umidade foi monitorada continuamente usando o sensor. As medições foram verificadas em três momentos do dia: pela manhã (7h), ao meio-dia (12 h) e à tarde (17 h), a fim de estimar a quantidade de água necessária para atingir esses valores.

5.8 Avaliações

Os dois experimentos foram avaliados durante dois momentos, quando as plantas estavam em estresse (período de restrição hídrica) e dias após estresse (período de reidratação) usando a parte foliar das plantas de café para conhecer a resposta dos tratamentos (Se e Si) aplicados, frente ao período de estresse causado por déficit hídrico. A coleta do material vegetal foi realizada de acordo com cada análise.

5.8.1 Análises nutricionais

Na etapa final do experimento, conforme a metodologia de Martinez *et al.* (2003), para avaliar o valor nutricional foram coletadas o 3º e 4º pares de folhas a partir do ápice dos ramos plagiotrópicos, com retirada de duas folhas por ramo na altura mediana da planta. Essa amostragem foi realizada no quinto dia do período da reidratação das plantas, sendo coletado em cada repetição, em todos os tratamentos.

5.8.2 Conteúdo de silício (Si)

A análise de Si no tecido das folhas das plantas de café foi feita utilizando o método amarelo, descrito por Elliot *et al.* (1991), citado por Korndorfer *et al.* (2004). Esse método de extração é realizado pela oxidação da matéria orgânica, ou seja, pela remoção do carbono do tecido vegetal com água oxigenada (digestão). O Hidróxido de Sódio adicionado à solução digestora melhora a eficiência do oxidante (H_2O_2) e eleva o pH da solução para que o silício do tecido vegetal permaneça em solução. A leitura foi realizada em espectrofotômetro UV-visível no comprimento de onda de 410 nm.

5.8.3 Conteúdo de macronutrientes, micronutrientes e Se.

O teor de nitrogênio (N) total da parte foliar da planta foi determinado pelo método de Kjeldahl (Malavolta; Vitti; Oliveira, 1997) assim como os teores dos demais macronutrientes (P, K, Ca, Mg e S), micronutrientes (Fe, Mn, Cu, Zn, B) e Se nos tecidos das folhas foram determinados após digestão ácida nítrico-percloreica, de acordo com Malavolta; Vitti; Oliveira (1997) adaptado por Silva Júnior *et al.* (2017). Para fazer as respectivas leituras as amostras digeridas foram analisadas usando um espectrômetro de emissão óptica com plasma indutivamente acoplado (ICP-OES).

5.8.4 Medidas do conteúdo relativo de água.

Foi determinado a percentagem do conteúdo relativo de água das folhas (CRA) no momento de máximo estresse (dia vinte de restrição hídrica) e ao final do período da reidratação (5º dia após ao período de estresse), ele foi determinado pelo procedimento de medição por gravimetria conforme Whertherley (1950). Para isto, foram coletados 10 discos foliares (1 cm^2) de folhas maduras por cada tratamento, nos dois experimentos (Nº1 e Nº2), depois colocados em sacos plásticos e armazenados em caixa de isopor com gelo para manter o turgor celular. Imediatamente foram pesados em uma balança analítica de precisão para obtenção de massa fresca (MF). Posteriormente, se colocaram em placas de Petri com papel filtro saturado com

água destilada, por um período de 24 h, sendo novamente pesados, para obtenção da massa túrgida (MT). Por último, foram secas em estufa de circulação de ar forçada (45°C) até atingir peso constante, obtendo a massa seca (MS). Dessa forma, o % de CRAC foi calculado com os valores obtidos nestas pesagens mediante a seguinte equação:

$$\text{CRA} = [(MF - MS) / (MT - MS)] * 100$$

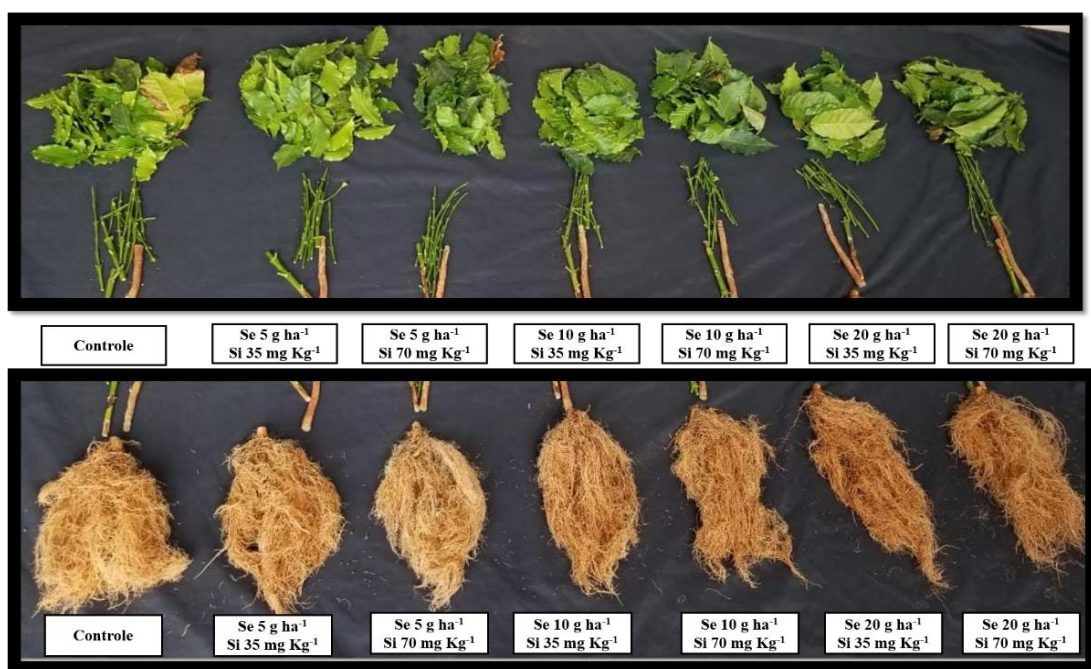
5.8.5 Avaliações das trocas gasosas

Foram realizadas medições de fotossíntese (A , $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$), condutância estomática (g_s , $\text{mol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) e transpiração (E , $\text{mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) utilizando um analisador de gases de infravermelho (IRGA) LI-6400XT. Essas avaliações ocorreram durante o período de máximo estresse hídrico e reidratação, entre 8:30 e 11:00 h, com o objetivo de identificar alterações na resposta das plantas ao estresse causado pelo déficit hídrico.

5.8.6 Determinação de Matéria Seca

Ao final do experimento, Figura 3, as plantas foram cortadas e separadas em parte radicular e foliar. Posteriormente foram levadas a estufa de circulação forçada a temperatura de 45°C, até obter peso constante, para obter massa seca.

Figura 3. Plantas de Café arábica aos 280 DAT, separadas em parte radicular e foliar após a reidratação. Cultivadas e submetidas a aplicação foliar de Se e aplicação via solo de Si.



5.8.7 Composição isotópica de carbono foliar ($\delta^{13}\text{C}$)

Foi utilizada a matéria seca foliar (folhas finamente moídas) das plantas, onde foi separada uma amostra por cada unidade experimental para avaliar a composição isotópica de carbono treze ($\delta^{13}\text{C}$). Os valores de ^{13}C foram determinados usando um espectrômetro de massa (modelo ANCA-GSL Hydra 20–20 SERCON Co., Crewe, GBR) acoplado a um analisador automático de carbono (Barrie; Prosser, 1996). Os valores dos isótopos (‰) foram calculados utilizando a seguinte equação (Farquhar; Sharkey, 1982; Cernusak *et al*, 2013).

$$\delta^{13}\text{C}(\text{‰}): \left(\frac{R_{\text{amostra}}}{R_{\text{padrão}}} - 1 \right) \times 1000$$

Onde: R é a razão de $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$. O material de referência é o Vienna Pee Dee Belemnite (PDB) com valor de 0,01117960 (Craig, 1957).

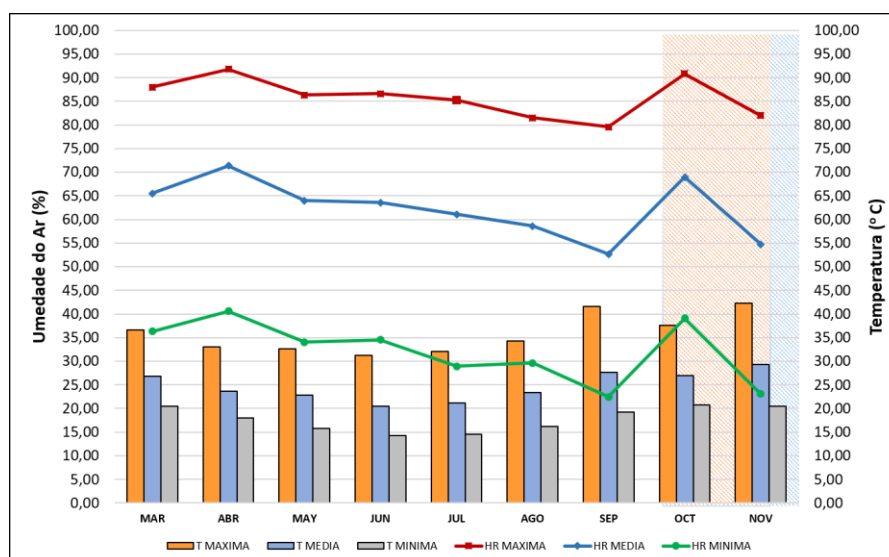
5.9 Análise estatística

Os dados coletados foram verificados quanto à distribuição normal utilizando o teste de Shapiro-Wilk ($p > 0,05$). As diferentes variáveis de resposta foram analisadas por meio de análise de variância (ANOVA) para avaliar diferenças estatisticamente significativas entre os tratamentos testados ($p < 0,05$). Quando os resultados foram significantes, as médias foram comparadas usando o teste de Tukey a 5%. Além disso, os dados foram correlacionados utilizando a correlação de Pearson e submetidos a uma Análise de Componentes Principais (PCA). Todas as análises estatísticas foram realizadas no software R-Studio.

6. RESULTADOS

Para o período experimental são apresentados dados médios mensais das temperaturas ($^{\circ}\text{C}$), máxima, média e mínima, assim como a umidade relativa do ar (UR%) máxima, média e mínima, registradas dentro da casa de vegetação. A temperatura média foi de aproximadamente $24,22^{\circ}\text{C}$, já a umidade relativa do ar (UR%) média foi de aproximadamente 60,71% durante a condução do experimento (Figura 4).

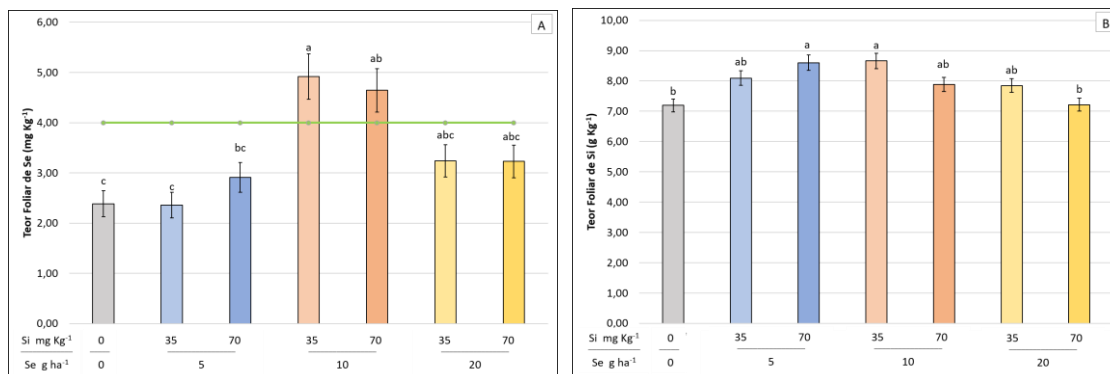
Figura 4. Médias mensais das temperaturas ($^{\circ}\text{C}$) e umidades relativas do ar (%), máxima, média e mínima, registradas dentro da casa de vegetação para o período de março de 2023 a novembro de 2023. Lavras, MG. As áreas marcadas indicam o período de déficit hídrico e reidratação.



6.1 Aplicação de Si aos 85 DAT e Se aos 95 DAT em plantas de *Coffea arabica*.

A aplicação de Se via foliar resultou em maior teor do elemento (Figura 5A) ($4,92$ e $4,69 \text{ mg kg}^{-1}$ de Se) nas folhas das plantas, nos tratamentos em que foi aplicada a dose de 10 g ha^{-1} de Se, nas duas doses de Si (35 e 70 mg kg^{-1}) representando um incremento do teor de Se de $105,9\%$ e $96,3\%$, respectivamente, em relação ao tratamento controle ($2,39 \text{ mg kg}^{-1}$ de Se).

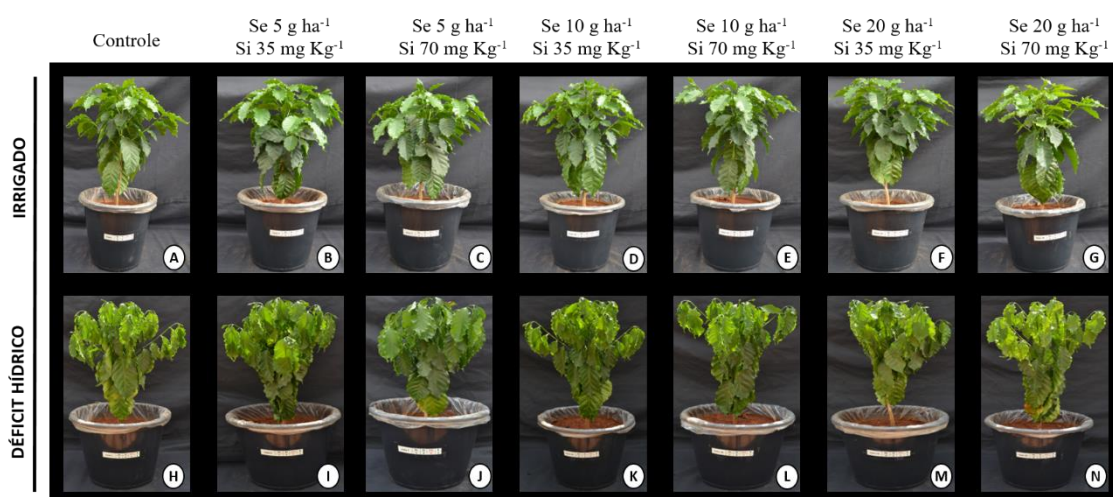
Figura 5. Teores foliares de Se (A) e Si (B) encontrados em *Coffea arabica* (cultivar Arara) durante o primeiro ano de desenvolvimento, em Lavras- MG, 2023. As médias dos tratamentos com a mesma letra não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey a $\leq 5\%$. Letras minúsculas representam diferenças entre tratamentos da mesma época de aplicação do Se e Si.



Por outro lado, os teores de Si nos tecidos foliares apresentaram significância estatística entre os tratamentos. Após à reidratação, conforme mostra a Figura 5B, as plantas tratadas com 70 mg kg⁻¹ de Si e 5 g ha⁻¹ de Se, bem como com 35 mg kg⁻¹ de Si e 10 g ha⁻¹ de Se, apresentaram teores mais elevados de Si nas folhas, com 8,60 e 8,67 mg kg⁻¹, respectivamente, representando aumento de 20% e 21% em comparação às plantas do tratamento controle (7,19 mg kg⁻¹), que não receberam doses de Si e Se.

Foi observado que as folhas das plantas quando a condição do solo foi levada para 60% AD no solo, voltaram-se flácidas 4 dias após ao estresse imposto por déficit hídrico, mas foi observado um maior murchamento e prostração das folhas quando a condição do solo alcançou 50% de AD no solo (Figura 6).

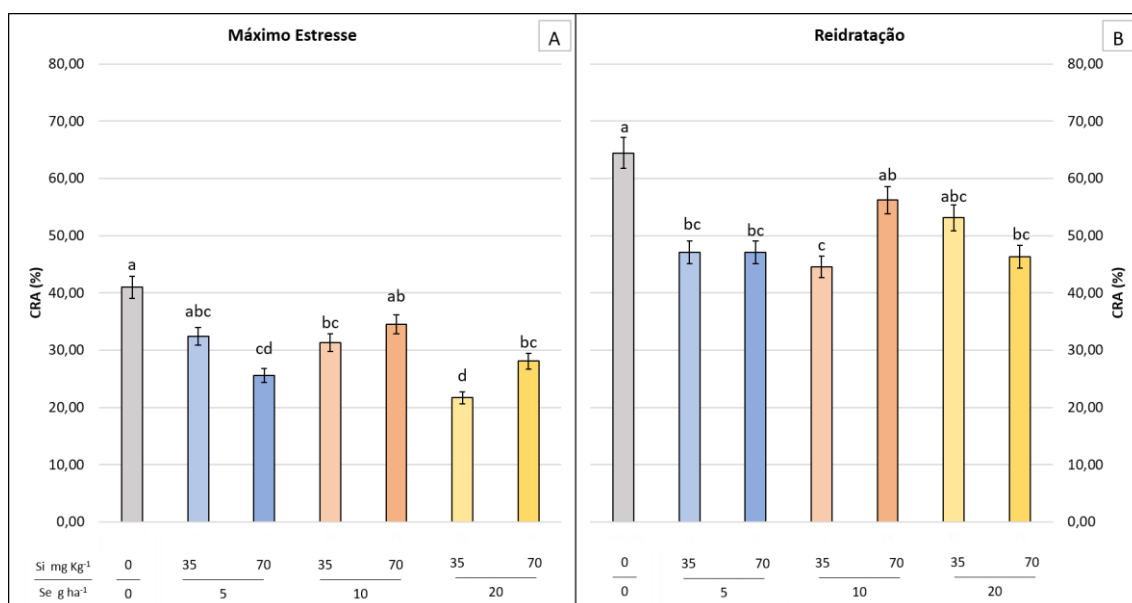
Figura 6 – Caracterização visual de plantas de *Coffea arabica* aos 280 DAT no período de máximo estresse (50% água disponível no solo) e irrigação a capacidade de campo, cultivadas e submetidas a aplicação foliar de Se e aplicação via solo de Si. Irrigado: Figuras A-G; e déficit hídrico: Figuras H-N.



Quanto ao conteúdo relativo de água (CRA) nas folhas durante o período de máximo estresse (Figura 7A), houve diferença significativa ($p \leq 0,05$) entre os tratamentos. As plantas do tratamento controle apresentaram o maior CRA (41,01%), seguidas pelas tratadas com 10 g ha⁻¹ de Se e 70 mg kg⁻¹ de Si, que registraram um CRA de 34,59%, que obteve o maior valor em relação aos tratamentos que receberam as demais doses de Se e Si.

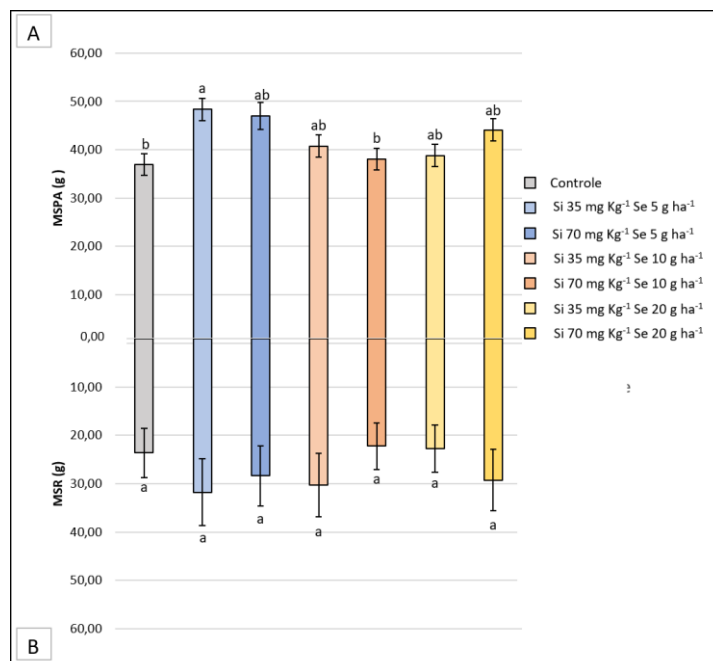
No período de reidratação (Figura 7B), observou-se um comportamento esperado, que foi o aumento nos valores de CRA (%), com a reposição da umidade no solo. O tratamento controle exibiu o maior CRA nas folhas (64,52%), significativamente superior às plantas tratadas. As plantas em que se aplicou 10 g ha⁻¹ de Se e 70 mg kg⁻¹ de Si apresentaram um CRA de 56,21%, sendo o segundo maior valor entre os tratamentos avaliados.

Figura 7. Conteúdo Relativo de Água (%) em *Coffea arabica* (cultivar Arara), no período de máximo estresse por déficit hídrico (A) e período de reidratação das plantas (B), Lavras- MG, 2023. As médias dos tratamentos com a mesma letra não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey a $\leq 5\%$. Letras minúsculas representam diferença entre tratamentos da mesma época de aplicação do Se e Si.



Aos 280 DAT, foram determinados os valores da massa seca da parte aérea (MSPA) e da massa seca das raízes (MSR) das plantas (Figura 8A). A dose de 5 g ha⁻¹ de Se e 35 mg kg⁻¹ de Si resultou na maior produção de MSPA (48,33 g), representando um aumento de 30,8% em comparação com as plantas do tratamento controle (36,96 g), que apresentou a menor média entre os tratamentos. As plantas tratadas com 10 g ha⁻¹ de Se e 35 mg kg⁻¹ de Si, apresentaram uma MSPA de 38,05 g, similar as plantas do tratamento controle.

Figura 8. A- Matéria seca da parte aérea (MSPA) (g) e B- Matéria seca da raiz (MSR) (g) encontrados em *Coffea arabica* (cultivar Arara) aos 280 dias de desenvolvimento em Lavras- MG, 2023. As médias dos tratamentos com a mesma letra não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey a $\leq 5\%$. Letras minúsculas representam diferença entre tratamentos da mesma época de aplicação do Se e Si.

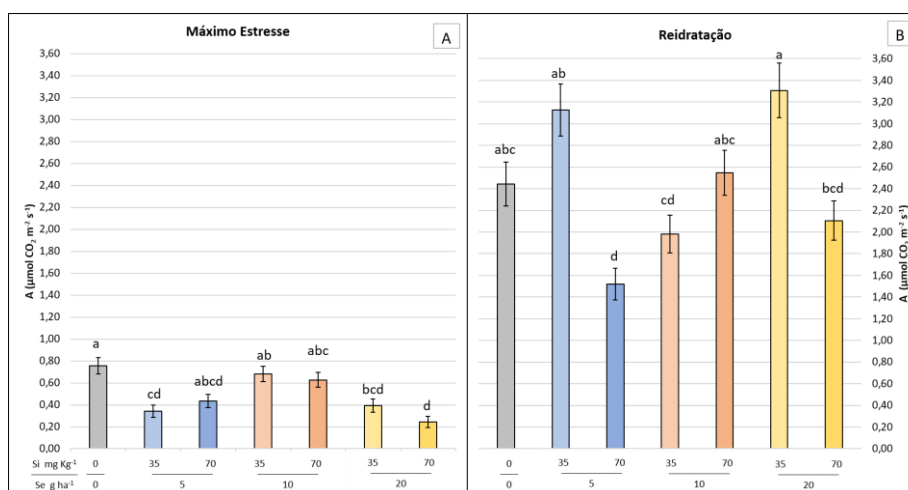


Constatou-se que as doses de Se e Si aplicadas não influenciaram significativamente a produção de MSR das plantas (Figura 8B). Embora a Figura 8B mostre que os valores de MSR não diferiram estatisticamente entre as doses de Se e Si, as maiores médias de MSR também foram observadas com a aplicação de 5 g ha⁻¹ de Se e 35 mg kg⁻¹ de Si. Essas plantas apresentaram um aumento de 34,35% na produção de MSR em comparação ao controle, um comportamento similar ao observado na MSPA. Além disso, observou-se que as plantas tratadas com as doses 10 g ha⁻¹ de Se com 70 mg kg⁻¹ de Si, e 20 g ha⁻¹ de Se com 35 mg kg⁻¹ de Si, apresentaram em média uma diminuição de 6,90% na MSR em relação ao controle.

No período do estresse por déficit hídrico (Figura 9A), quando medida a Taxa Fotossintética (A, $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$), nas plantas, observou-se valores muito baixos comparados ao período de reidratação (Figura 9B). Nos resultados da fotossíntese durante o máximo estresse por déficit hídrico (Figura 9A), foi observado uma maior taxa fotossintética nas plantas que não receberam aplicação de Se e Si. Nas plantas em que se aplicou Se e Si, a maior taxa fotossintética foi apresentada na dose de 10 g ha⁻¹ de Se com 35 mg kg⁻¹ de Si.

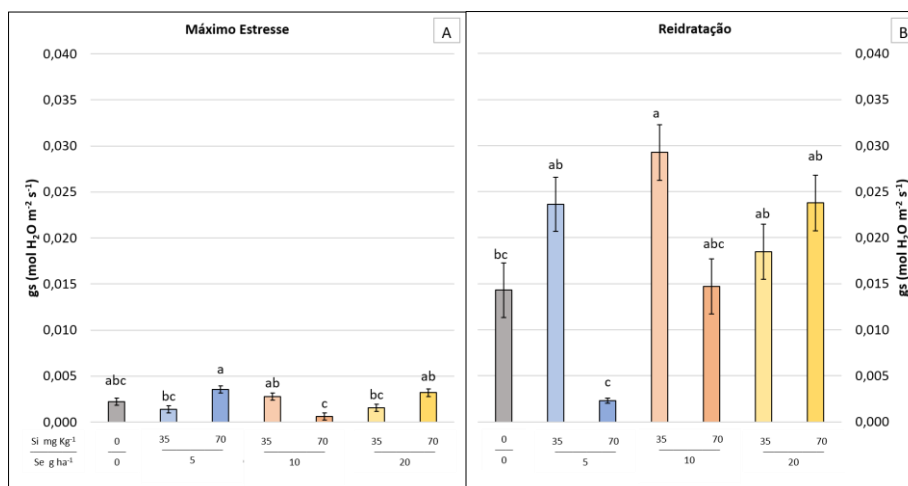
No período de reidratação das plantas (Figura 9B), foram observadas diferenças significativas para as plantas das doses de 5 g ha⁻¹ e 20 g ha⁻¹ de Se combinadas com 35 mg kg⁻¹ de Si, em que apresentaram as maiores taxas fotossintéticas, superando as plantas do tratamento controle em 27,8% e 35%, respectivamente.

Figura 9. Taxa Fotossintética (A, $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$), em *Coffea arabica* (cultivar Arara), no período de máximo estresse por déficit hídrico (A) e período de recuperação das plantas (B), Lavras- MG, 2023. As médias dos tratamentos com a mesma letra não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey a $\leq 5\%$. Letras minúsculas representam diferença entre tratamentos da mesma época de aplicação do Se e Si.



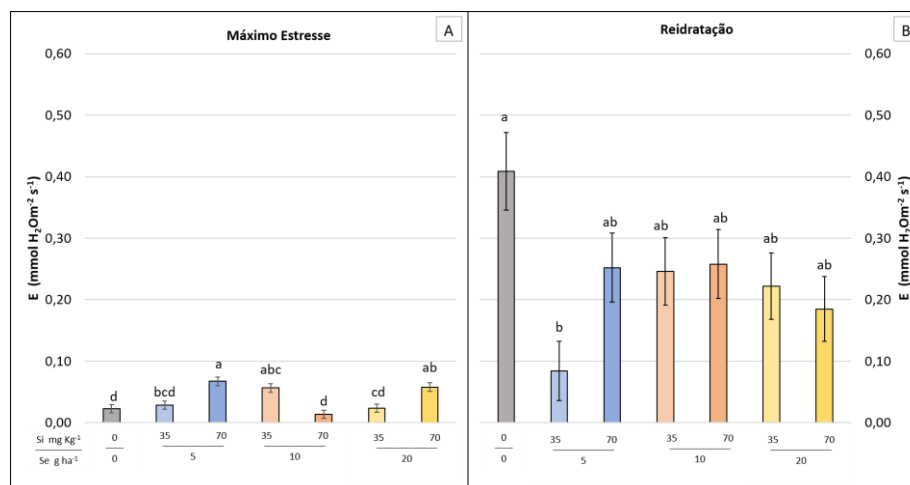
Durante o período de máximo estresse por déficit hídrico (Figura 10A), a medida da condutância estomática ($\text{gs, mol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) revelou que as plantas tratadas com 5 g ha⁻¹ de Se e 70 mg kg⁻¹ de Si apresentaram maior condutância estomática. No período de reidratação subsequente (Figura 10B), ao contrário do observado durante o estresse, as plantas tratadas com 5 g ha⁻¹ de Se, combinados com 70 mg kg⁻¹ de Si, não conseguiram manter e nem recuperar sua condutância estomática. Por outro lado, as plantas tratadas com 10 g ha⁻¹ de Se e 35 mg kg⁻¹ de Si apresentaram uma diferença significativa ($p > 0,05$), superando o tratamento controle em 104% no valor de gs.

Figura 10. Condutância Estomática (gs , $\text{mol H}_2\text{O m}^{-2} \text{s}^{-1}$), em *Coffea arabica* (cultivar Arara), no período de máximo estresse por déficit hídrico (A) e período de recuperação das plantas (B), Lavras- MG, 2023. As médias dos tratamentos com a mesma letra não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey a $\leq 5\%$. Letras minúsculas representam diferença entre tratamentos da mesma época de aplicação do Se e Si.



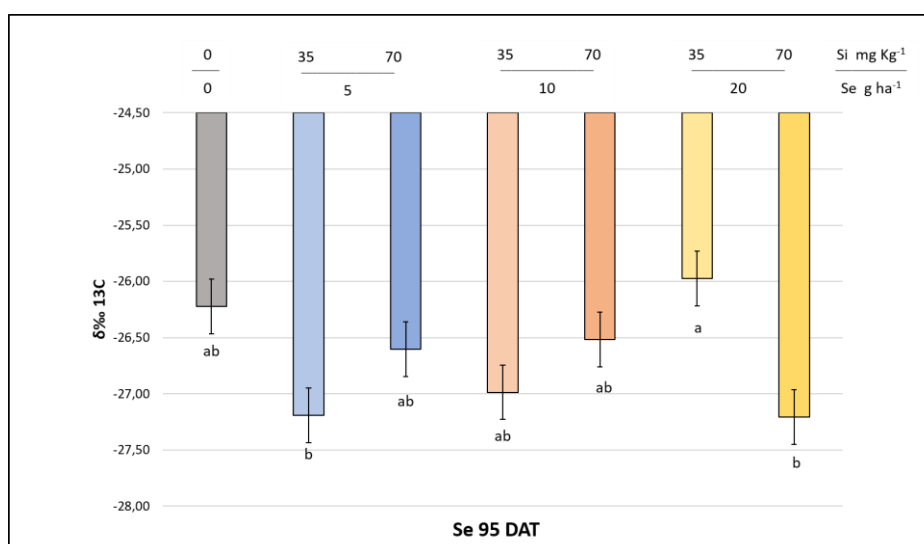
Para a taxa transpiratória das plantas (E , $\text{mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{s}^{-1}$), conforme ilustrado na Figura 11A, durante o período de máximo estresse por déficit hídrico, os tratamentos com 5 g ha^{-1} de Se, combinados com 70 mg kg^{-1} de Si, mostraram maior taxa de transpiração. No período da reidratação (Figura 11B), observou-se que as plantas tratadas com 5 g ha^{-1} de Se e 35 mg kg^{-1} de Si, apresentaram os valores mais baixos para transpiração. As plantas não tratadas com Se e Si apresentaram os maiores valores de transpiração.

Figura 11. Taxa Transpiratória (E , $\text{mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{s}^{-1}$), em *Coffea arabica* (cultivar Arara), no período de máximo estresse por déficit hídrico (A) e período de recuperação das plantas (B), Lavras- MG, 2023. As médias dos tratamentos com a mesma letra não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey a $\leq 5\%$. Letras minúsculas representam diferença entre tratamentos da mesma época de aplicação do Se e Si.



As doses de Se e Si aplicadas nas plantas de *Coffea arabica*, afetaram significativamente a composição isotópica de carbono foliar ($\delta^{13}\text{C}$) durante um período de déficit hídrico (Figura 12). Os maiores valores de $\delta^{13}\text{C}$ (‰) foram observados nas plantas tratadas com 20 g ha⁻¹ de Se combinados com 35 mg kg⁻¹ de Si, em contrapartida, os menores valores de $\delta^{13}\text{C}$ foram registrados nas plantas que receberam 5 e 20 g ha⁻¹ de Se combinadas com 35 mg kg⁻¹ de Si.

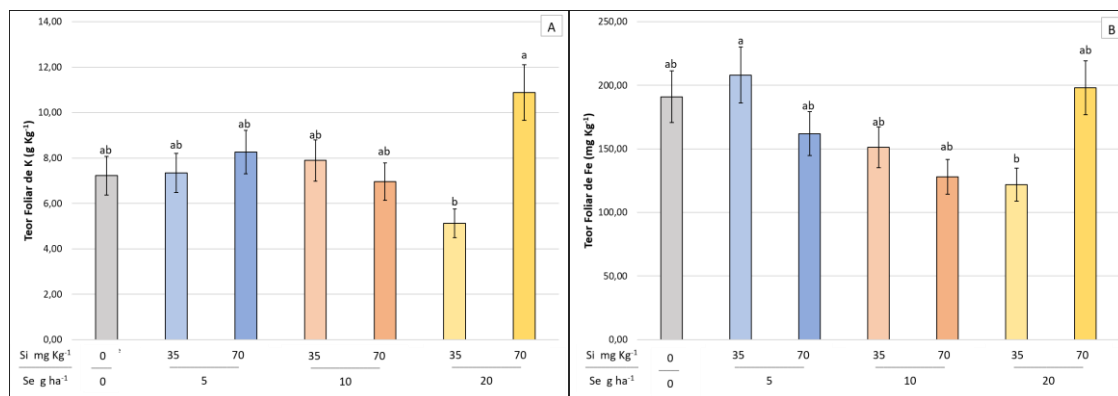
Figura 12. Composição isotópica de carbono foliar ($\delta^{13}\text{C}$) em *Coffea arabica* (cultivar Arara), aos 280 dias de desenvolvimento inicial em Lavras- MG, 2023. As médias dos tratamentos com a mesma letra não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey a $\leq 5\%$. Letras minúsculas representam diferença entre tratamentos da mesma época de aplicação do Se e Si.



Nas análises foliares de macronutrientes, a significância estatística foi observada apenas para o K (Figura 13). O fornecimento de Se e Si aumentou o teor de K nos tecidos foliares em 50,6% na dose de 20 g ha⁻¹ de Se e 70 mg kg⁻¹ de Si, comparado às plantas que não receberam

doses de esses elementos. Para os demais macronutrientes, não foram observadas diferenças significativas. Em média, os teores encontrados foram: N (28,17 g kg⁻¹), P (9,92 g kg⁻¹), Ca (15,05 g kg⁻¹), Mg (5,48 g kg⁻¹) e S (1,92 g kg⁻¹).

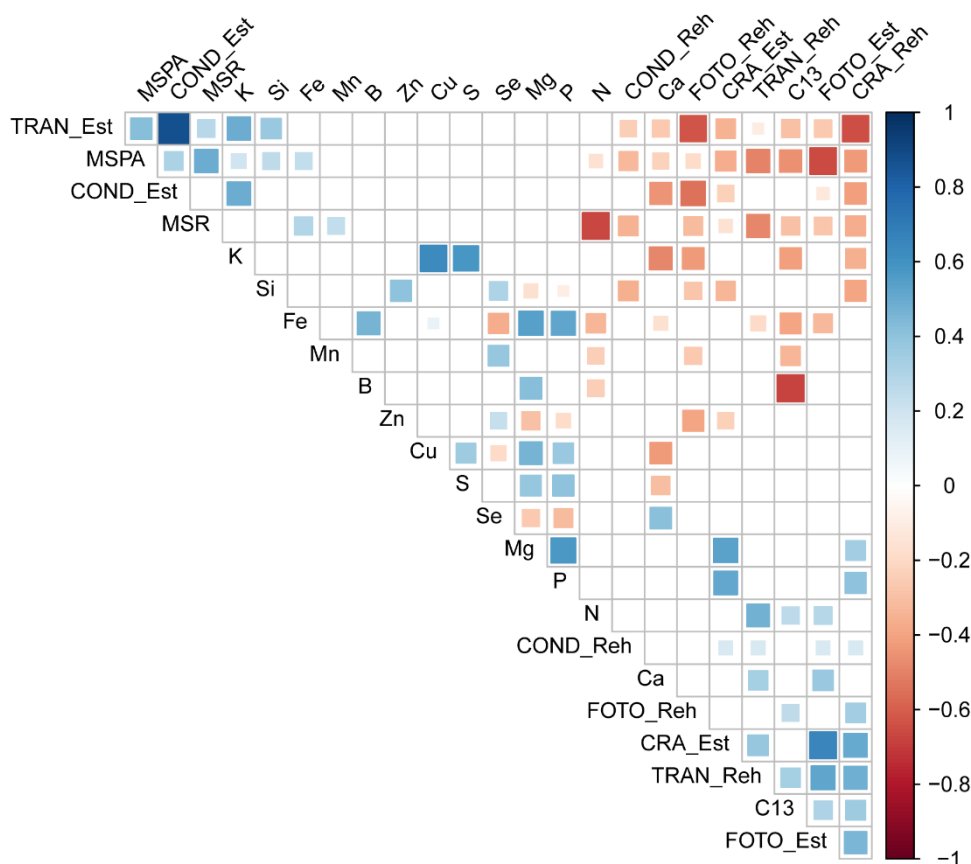
Figura 13. Teores foliares para K (A) e Fe (B), em *Coffea arabica* (cultivar Arara). Aos 280 dias de desenvolvimento inicial, Lavras- MG, 2023. As médias dos tratamentos com a mesma letra não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey a $\leq 5\%$. Letras minúsculas representam diferença entre tratamentos da mesma época de aplicação do Se e Si.



Na análise dos teores de micronutrientes foliares, foram observadas diferenças significativas para o Fe (Figura, 13B). Houve aumento de 5% no teor de Fe nas plantas que receberam 5 g ha⁻¹ de Se e 35 mg kg⁻¹ de Si. Para os demais micronutrientes não foram observadas diferenças significativas, em média os teores encontrados foram: B (45,72 mg kg⁻¹), Cu (2,40 mg kg⁻¹), Mn (81,28 mg kg⁻¹) e Zn (10,78 mg kg⁻¹).

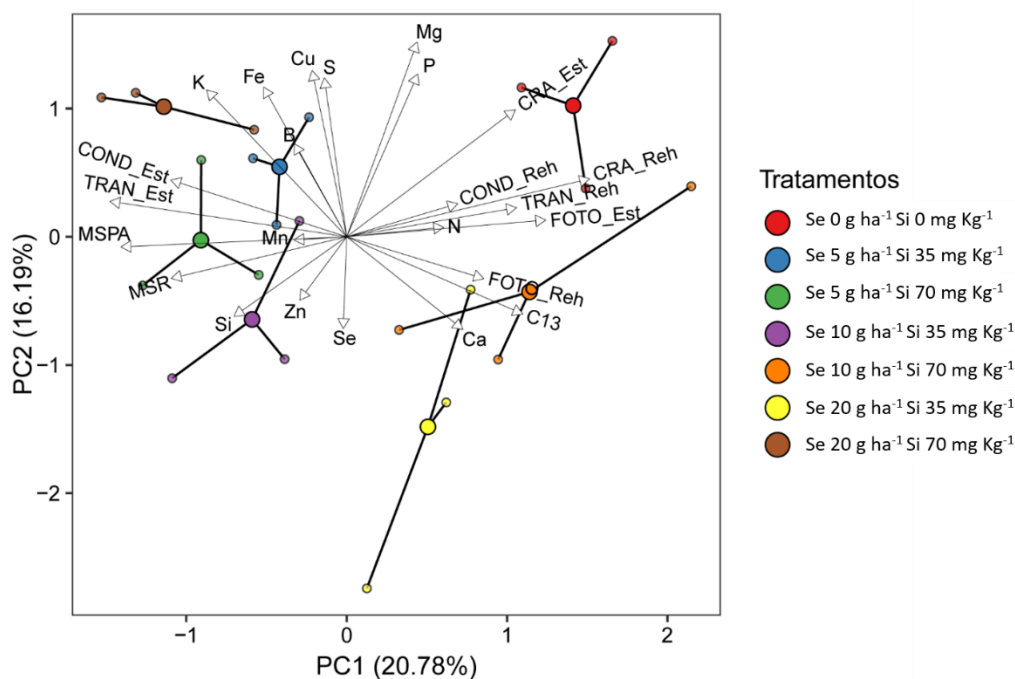
A correlação de Pearson entre as variáveis analisadas para a aplicação de doses de Se e Si está apresentada na Figura 14. Observou-se uma correlação positiva entre Si e a produção de matéria seca da parte aérea e das raízes das plantas de café, assim como entre os teores de Zn e Se nos tecidos foliares. Por outro lado, houve correlação negativa entre Si e os teores de Mg e P. Quanto ao Se, foi observada uma correlação positiva com os teores de Ca, Zn, Mn e Si, e correlação negativa com P, Mg, Cu e Fe.

Figura 14. Correlação de Pearson entre Teor de Se e Si na folha, teor de macro e micronutrientes (P, K, Ca, Mg, S, Mn, Fe, Cu, Zn, B), massa seca da parte aérea, raiz (MSPA, MSR) e composição isotópica de carbono foliar ($\delta^{13}\text{C}$). Assim como Conteúdo Relativo de Água (CRA), Taxa Fotossintética (A, $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$); Condutância Estomática (gs, $\text{mol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) e Taxa Transpiratória (E, $\text{mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$), resultados dessas variáveis mostrados nos momentos do máximo estresse e reidratação das plantas de *Coffea arabica*. As legendas representam uma correlação positiva quando são apresentados círculos azuis e uma correlação negativa quando são apresentados círculos vermelhos. Círculos maiores e pintados com cores mais fortes, como o azul escuro demonstram uma correlação positiva mais forte, assim como o azul claro demonstra uma correlação positiva mais fraca.



A análise de componentes principais (PCA) explicou os 36,97% da variação dos dados, com o primeiro eixo (PC1) explicando os 20,78% e o segundo eixo (PC2) os 16,19 % (Figura 15). O conteúdo de Si nas folhas mostrou uma correlação com Zn, Mn, MSPA e MSR, este comportamento também foi notado e mostrado anteriormente na matriz de correlação de Person (Figura 14).

Figura 15. Análise de componentes principais (PCA), para época de aplicação de Se aos 95 DAT e Si 85 DAT. Os atributos incluídos foram: Teor de Se e Si na folha, teor de macro e micronutrientes (P, K, Ca, Mg, S, Mn, Fe, Cu, Zn, B), massa seca da Parte Área e Raiz (MSPA, MSR), Composição isotópica de carbono foliar ($\delta^{13}\text{C}$). Assim como Conteúdo Relativo de Água (CRA), Taxa Fotossintética (A, $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$); Condutância Estomática (gs, $\text{mol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) e Taxa Transpiratória (E, $\text{mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$), resultados dessas variáveis mostrados nos momentos do máximo estresse e reidratação das plantas de *Coffea arabica*.

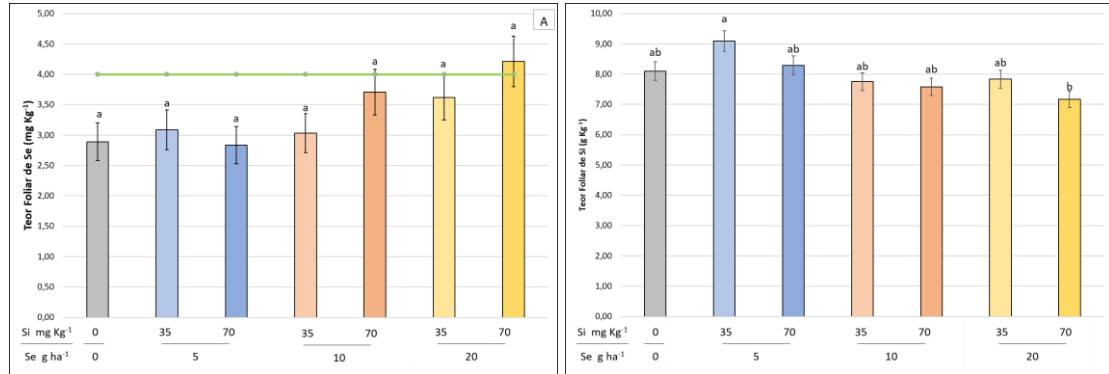


Os grupos de correlação distinguiram claramente os tratamentos e suas respectivas associações. Os tratamentos com doses de 5 g ha⁻¹ de Se, combinadas com 35 e 70 mg kg⁻¹ de Si, assim como com 10 g ha⁻¹ de Se e 35 mg kg⁻¹ de Si, mostraram uma correlação mais forte e evidente com MSPA e MSR, corroborando os resultados apresentados anteriormente (Figura 7). Assim como a relação do K com a doses de 20 g ha⁻¹ de Se combinada com 70 mg kg⁻¹ de Si (Figura 13A).

6.2 Aplicação de Si aos 85 DAT e Se aos 240 DAT em plantas de *Coffea arabica*.

A aplicação foliar de Se aos 240 DAT, embora sem significância estatística, resultou em maior teor do elemento nas folhas das plantas sob estresse hídrico (Figura 16A), nos tratamentos em que se aplicaram doses de 20 g ha⁻¹ de Se e 70 mg kg⁻¹ de Si, atingindo 4,21 mg kg⁻¹ de Se. As plantas em que se aplicaram as demais doses apresentaram em média um teor para Se de 3,20 mg kg⁻¹.

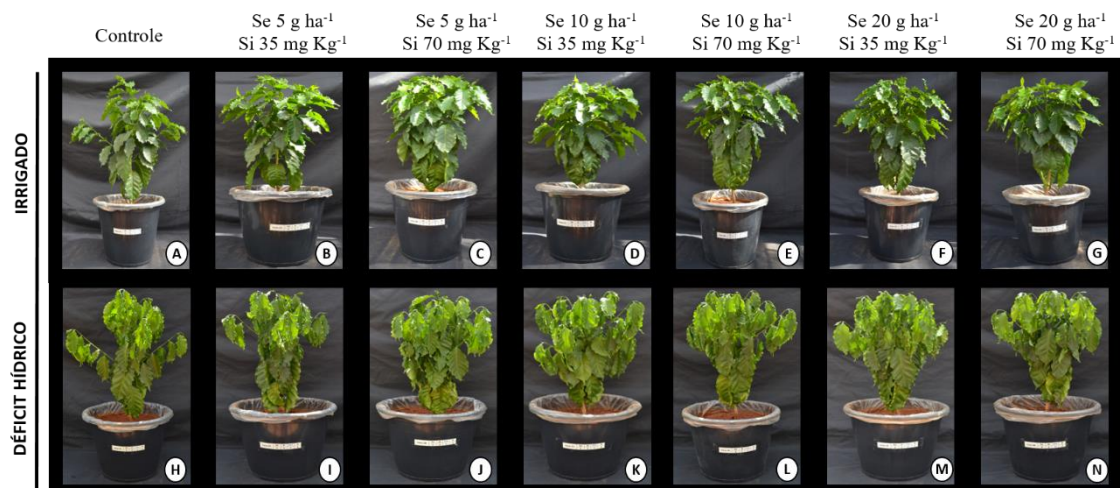
Figura 16. Teores foliares de Se e Si encontrados em *Coffea arabica* (cultivar Arara) durante o primeiro ano de desenvolvimento, em Lavras- MG, 2023. As médias dos tratamentos com a mesma letra não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey a $\leq 5\%$. Letras minúsculas representam diferença entre tratamentos da mesma época de aplicação do Se e Si.



Por outro lado, os teores de Si nos tecidos foliares apresentaram significância estatística entre os tratamentos aplicados. Após a reidratação, conforme mostra a Figura 16B, as plantas tratadas com 35 mg kg⁻¹ de Si e 5 g ha⁻¹ de Se, apresentaram os teores mais elevados de Si nas folhas, atingindo 9,10 mg kg⁻¹. Representando um aumento de 13% em comparação com as plantas que não receberam doses de Si e Se.

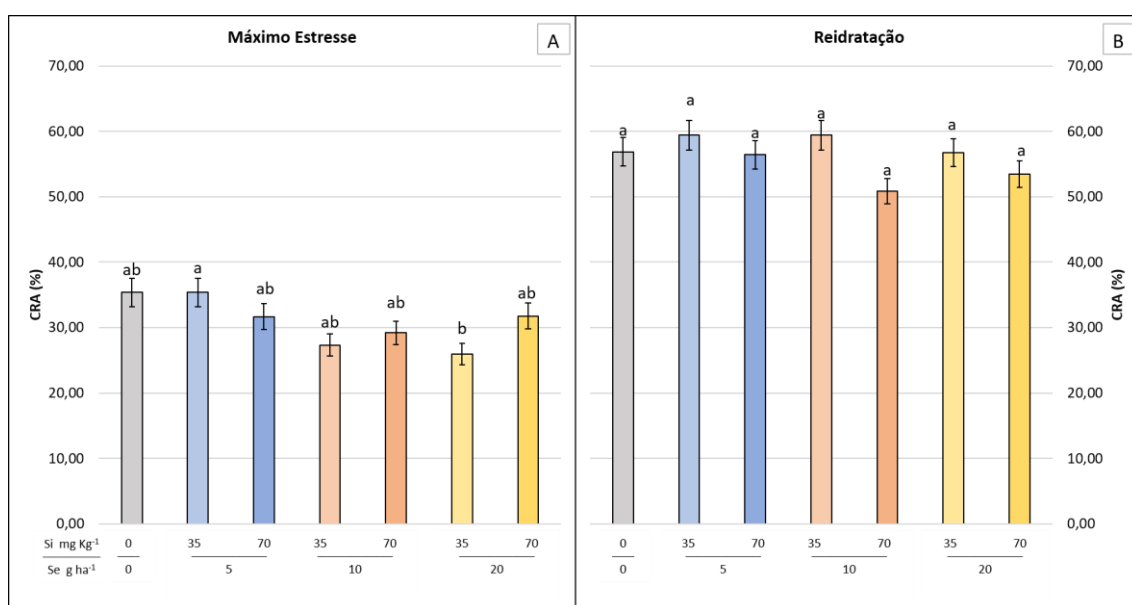
Observou-se que as folhas das plantas quando o solo atingiu 60% AD no solo, tornaram-se flácidas 4 dias depois ao estresse imposto por déficit hídrico. No entanto houve um maior murchamento e inclinação das folhas quando a condição do solo alcançou 50% de AD no solo (Figura 17).

Figura 17. Caracterização visual de plantas de *Coffea arábica* aos 280 DAT no período de máximo estresse (50% água disponível no solo) e irrigação a capacidade de campo, cultivadas e submetidas a aplicação foliar de Se e aplicação via solo de Si. Irrigado: Figuras A-G; e déficit hídrico: Figuras H-N.



Em relação ao CRA nas folhas das plantas durante o período de máximo estresse (Figura 18A), houve uma diferença significativa ($p \leq 0,05$) entre os tratamentos. As plantas tratadas com 5 g ha^{-1} de Se e 35 mg kg^{-1} de Si apresentaram os maiores valores de CRA ($35,4\%$), enquanto as plantas que receberam outras doses, assim como as que não foram tratadas apresentaram CRA em média de $29,75\%$.

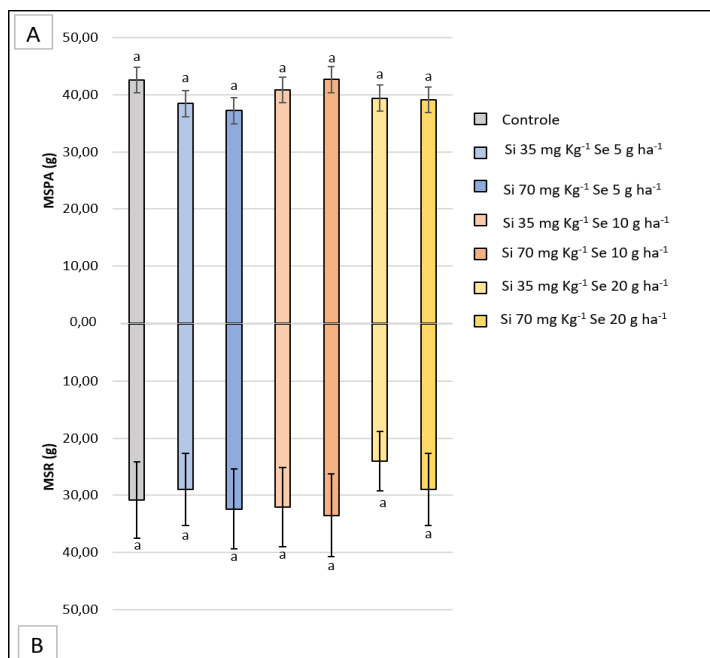
Figura 18. Conteúdo Relativo de Água (%) em *Coffea arabica* (cultivar Arara), no período de máximo estresse por déficit hídrico (A) e período de recuperação das plantas (B), Lavras- MG, 2023. As médias dos tratamentos com a mesma letra não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey $\alpha \leq 5\%$. Letras minúsculas representam diferença entre tratamentos da mesma época de aplicação do Se e Si.



No período da reidratação (Figura 18B), também se observou um comportamento esperado, um aumento nos valores de CRA (%), com a reposição da umidade no solo, não apresentando diferença significativa entre às doses aplicadas, mas as plantas em que foi aplicada a dose de 5 g ha^{-1} de Se e 35 mg kg^{-1} de Si apresentaram os maiores valores de CRA ($59,4\%$).

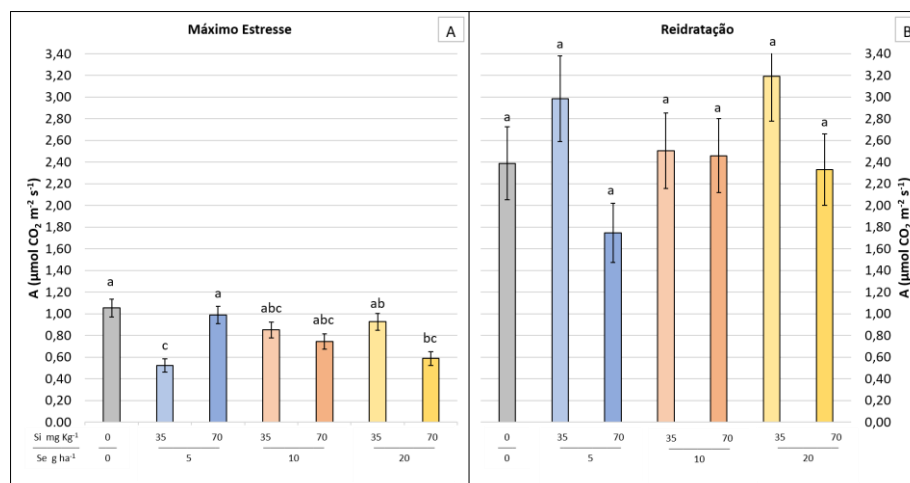
Quando as plantas completaram 280 DAT, foi determinado o valor da MSPA das plantas, assim como MSR. Os tratamentos não diferem estatisticamente (Figura 19A) para MSPA, a dose de 10 g ha^{-1} de Se com 70 mg kg^{-1} de Si apresentou um maior valor ($42,65\text{g}$). Embora a MSR (Figura 19B) também não tenha mostrado diferença significativa, as plantas tratadas também com 10 g ha^{-1} de Se e 70 mg kg^{-1} de Si apresentaram maior MSR ($33,51\text{g}$), em comparação com as plantas tratadas com as demais doses, assim como as que não receberam doses de Se e Si.

Figura 19. A- Matéria seca da parte aérea (MSPA) (g) e B- Matéria seca da raiz (MSR) (g) encontrados em *Coffea arabica* (cultivar Arara). Aos 280 dias de desenvolvimento inicial em Lavras- MG, 2023. As médias das variáveis com a mesma letra não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey a $\leq 5\%$. Letras minúsculas representam diferença entre tratamentos da mesma época de aplicação do Se e Si.



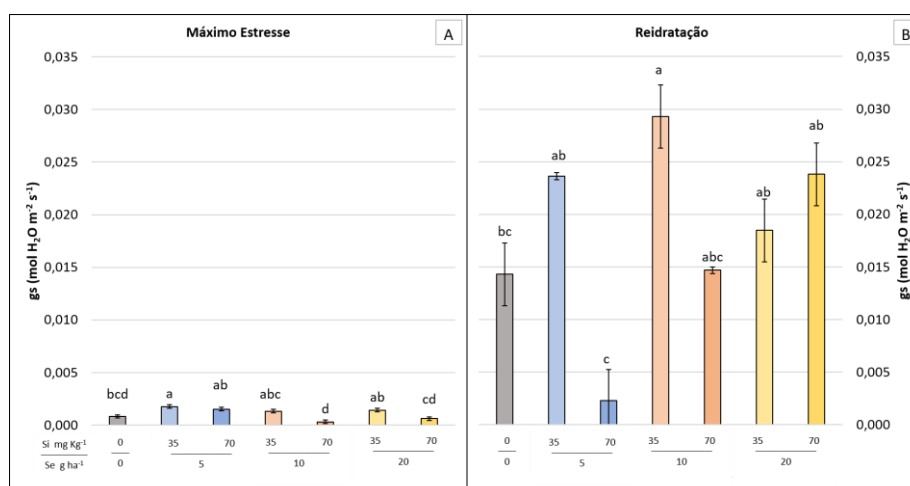
Nos resultados da fotossíntese durante o máximo estresse por déficit hídrico (Figura 20A), foi observado um aumento na taxa fotossintética das plantas em que foi aplicada a dose de 5 g ha⁻¹ de Se e 70 mg kg⁻¹ de Si, comportamento também mostrado pelas plantas que não receberam aplicação de Se e Si. No período da reidratação (Figura 20B), não foram observadas diferenças significativas entre os tratamentos. As doses de 5 e 20 g ha⁻¹ de Se, combinadas com 35 mg kg⁻¹ de Si, apresentaram as maiores taxas fotossintéticas, indicando uma recuperação das plantas. Essas doses mostraram um incremento de 25% e 33,7%, respectivamente em relação as plantas que não receberam doses desses elementos.

Figura 20. Taxa Fotossintética (A, $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$), em *Coffea arabica* (cultivar Arara), no período de máximo estresse por déficit hídrico (A) e período de reidratação das plantas (B), Lavras- MG, 2023. As médias das variáveis com a mesma letra não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey a $\leq 5\%$. Letras minúsculas representam diferença entre tratamentos da mesma época de aplicação do Se e Si.



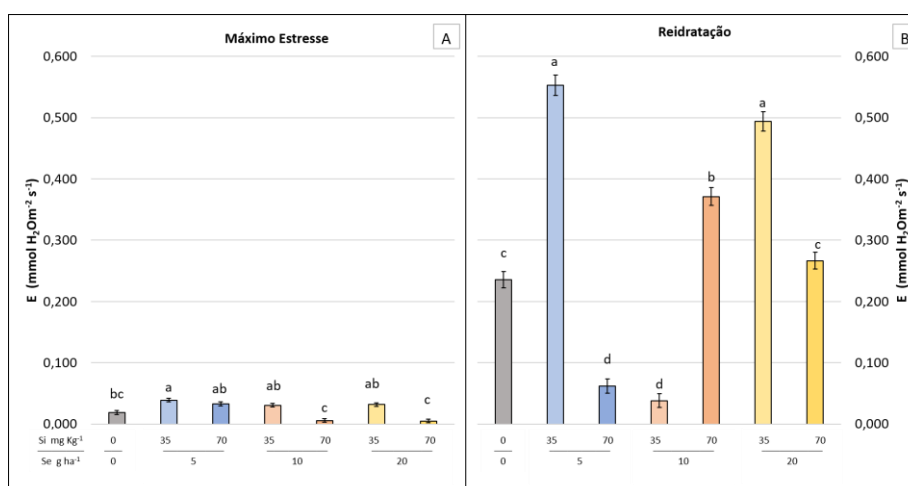
Durante o período de máximo estresse causado por déficit hídrico (Figura 21A), a medida da condutância estomática das plantas revelou que os tratamentos com 5 g ha⁻¹ de Se e 70 mg Kg⁻¹ de Si apresentaram maiores valores. No período de reidratação subsequente (Figura 21B), as plantas de todos os tratamentos conseguiram manter e elevar sua condutância estomática, sendo que as plantas tratadas com 10 g ha⁻¹ de Se e 35 mg kg⁻¹ de Si apresentaram diferença significativa ($p > 0,05$), superando o tratamento controle em 107% no valor de gs. Foi mostrado que as plantas em que se aplicou a dose de 5 g ha⁻¹ de Se e 70mg kg⁻¹ de Si, apresentaram valores muito baixos para condutância estomática.

Figura 21. Condutância Estomática (gs, mol H₂O m⁻² s⁻¹), em *Coffea arabica* (cultivar Arara), no período de máximo estresse por déficit hídrico (A) e período de reidratação das plantas (B), Lavras- MG, 2023. As médias das variáveis com a mesma letra não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey a $\leq 5\%$. Letras minúsculas representam diferença entre tratamentos da mesma época de aplicação do Se e Si.



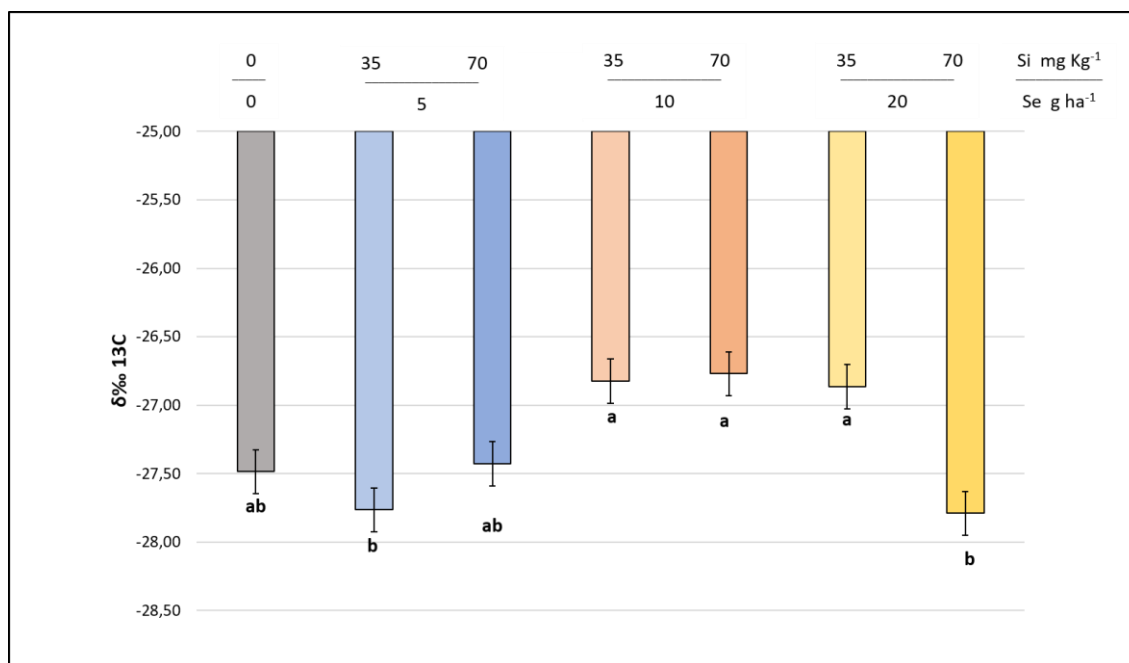
Para a taxa transpiratória das plantas, conforme ilustrado na Figura 22A, durante o período de máximo estresse por déficit hídrico, as plantas tratadas com 5 g ha⁻¹ de Se, combinados com 70 mg kg⁻¹ de Si, mostraram maiores valores. Já no período da reidratação (Figura 22B), observou-se que as plantas em que se aplicou 5 e 20 g ha⁻¹ de Se combinadas com 35 mg kg⁻¹ de Si, tiveram uma maior taxa transpiratória representando um 134% e 109% respectivamente, em comparação com as plantas não tratadas com Se e Si.

Figura 22. (E, mmol H₂O m⁻² s⁻¹, E e F), em *Coffea arabica* (cultivar Arara), no período de máximo estresse por déficit hídrico (A) e período de reidratação das plantas (B), Lavras- MG, 2023. As médias das variáveis com a mesma letra não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey a $\leq 5\%$. Letras minúsculas representam diferença entre tratamentos da mesma época de aplicação do Se e Si.



As doses de Se e Si aplicadas nas plantas, conforme mostrado na Figura 23, afetaram significativamente a composição isotópica de carbono foliar ($\delta^{13}\text{C}$) em plantas que passaram por um período de déficit hídrico. Os maiores valores de $\delta^{13}\text{C}$ (‰) foram observados nas plantas tratadas com 10 g ha⁻¹ de Se nas duas doses de Si (35 e 70 mg kg⁻¹), comportamento semelhante ao encontrado nas plantas tratadas com 20 g ha⁻¹ de Se e 35 mg kg⁻¹ de Si. Em contrapartida, os menores valores de $\delta^{13}\text{C}$ foram registrados nas plantas que receberam 5 g ha⁻¹ de Se combinados com 35 mg kg⁻¹ de Si, bem como nas tratadas com 20 g ha⁻¹ de Se e 70 mg kg⁻¹ de Si.

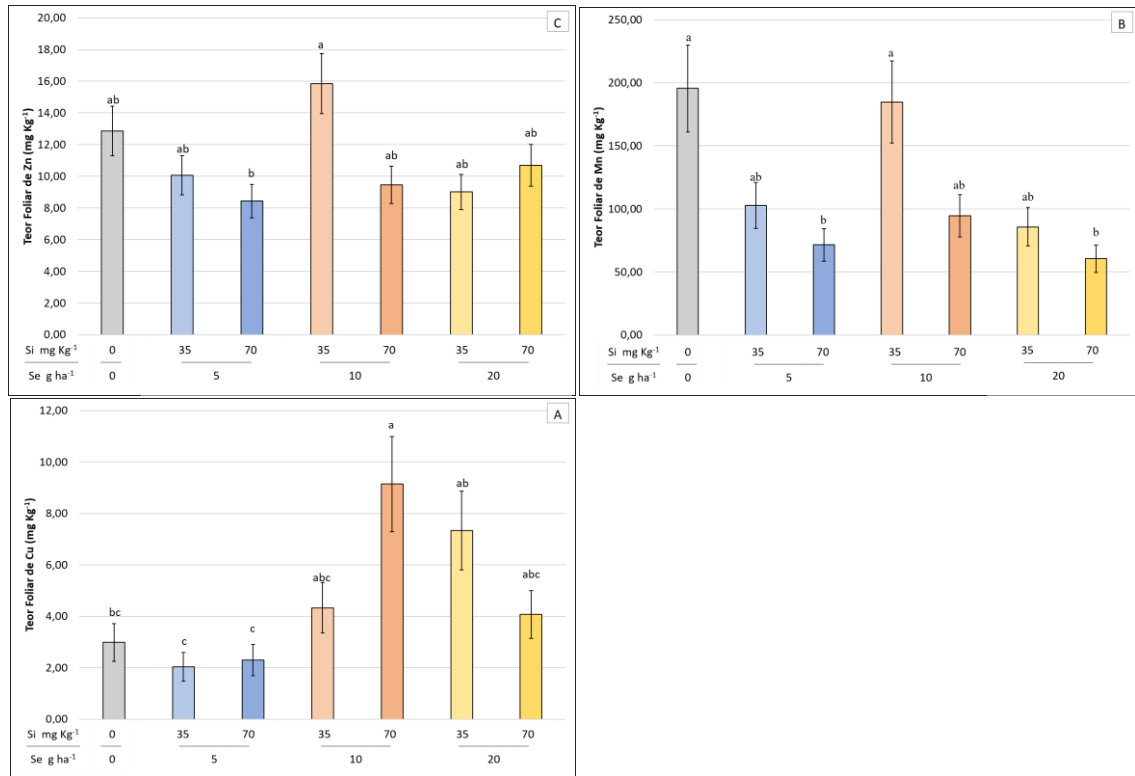
Figura 23. Composição isotópica de carbono foliar ($\delta^{13}\text{C}$) em *Coffea arabica* (cultivar Arara). Aos 280 dias de desenvolvimento inicial, Lavras- MG, 2023. As médias das variáveis com a mesma letra não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey a $\leq 5\%$. Letras minúsculas representam diferença entre tratamentos da mesma época de aplicação do Se e Si.



Nas análises foliares de macronutrientes, não houve significância entre os tratamentos com diferentes doses de Se e Si aplicadas. No entanto, os teores médios encontrados foram: N (26,65 g kg⁻¹), P (9,81 g kg⁻¹), K (8,61 g kg⁻¹), Ca (12,92 g kg⁻¹), Mg (5,85 g kg⁻¹) e S (1,91 g kg⁻¹).

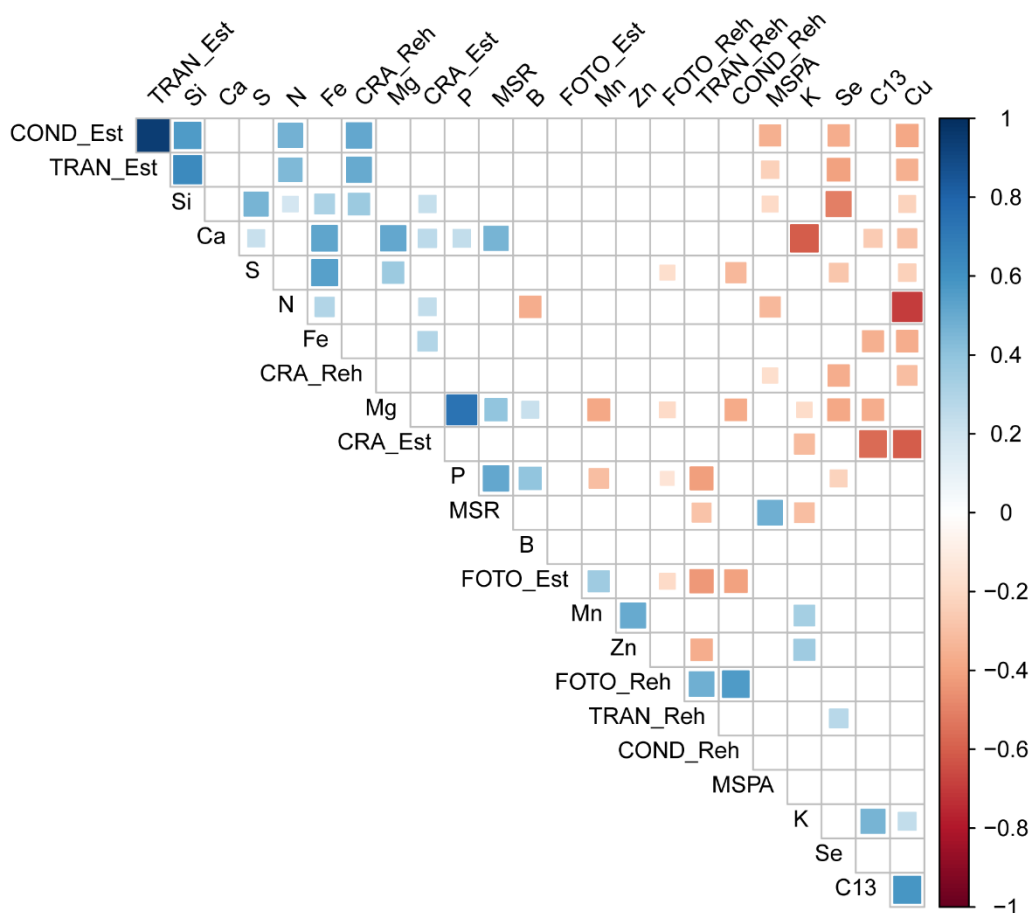
Para os micronutrientes, foram observadas diferenças significativas nos teores de Cu, Mn e Zn. As plantas tratadas com 10 g ha⁻¹ de Se e 70 mg kg⁻¹ de Si apresentaram um aumento de 206% no teor de Cu em relação ao controle (Figura 24A). Para Mn, os maiores teores foram detectados nas plantas tratadas com 10 g ha⁻¹ de Se e 35 mg kg⁻¹ de Si, com níveis semelhantes aos observados nas plantas do controle (Figura 24B). Em relação ao Zn, as plantas que receberam 10 g ha⁻¹ de Se e 35 mg kg⁻¹ de Si (Figura 24C) mostraram um aumento de 23% em comparação com aquelas que não receberam doses de Se e Si. Para os demais micronutrientes, não foram observadas diferenças significativas. Os teores médios encontrados foram: Fe (201,31 mg kg⁻¹), B (58,30 mg kg⁻¹).

Figura 24. Teores foliares para Cobre (A), Manganês (B) e Zinco (C) em *Coffea arabica* (cultivar Arara). Aos 280 dias de desenvolvimento inicial, Lavras- MG, 2023. As médias dos tratamentos com a mesma letra não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey a $\leq 5\%$. Letras minúsculas representam diferença entre tratamentos da mesma época de aplicação do Se e Si.



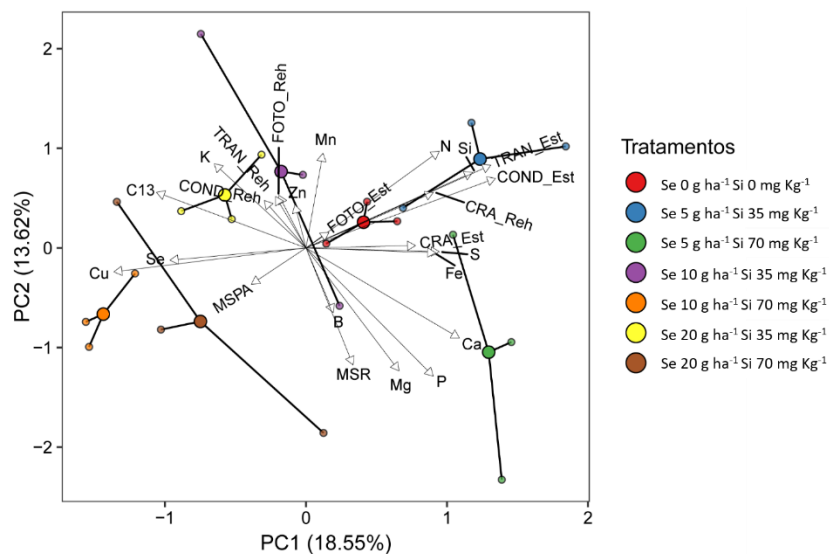
A correlação de Pearson entre as variáveis analisadas para a aplicação de doses de Se e Si está apresentada na Figura 25. Observou-se uma correlação positiva entre Si, condutância estomática, transpiração, N, S e Fe. Por outro lado, houve uma correlação negativa entre Si e os teores de Se, Cu e MSPA. Quanto ao Se, foi observada uma correlação positiva somente com a transpiração e negativa com condutância estomática, transpiração e teores de P, S e Mg.

Figura 25. Correlação de Pearson entre Teor de Se e Si na folha, teor de macro e micronutrientes (P, K, Ca, Mg, S, Mn, Fe, Cu, Zn, B), (MSPA, MSR), composição isotópica de carbono foliar ($\delta^{13}\text{C}$). Assim como Conteúdo Relativo de Água (CRA), Taxa Fotossintética (A, $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$); Condutância Estomática (gs, $\text{mol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) e Taxa Transpiratória (E, $\text{mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$), resultados dessas variáveis mostrados nos momentos do máximo estresse e reidratação das plantas de *Coffea arabica*. As legendas representam uma correlação positiva quando são apresentados círculos azuis e uma correlação negativa quando são apresentados círculos vermelhos. Círculos maiores e pintados com cores mais fortes, como o azul escuro demonstram uma correlação positiva mais forte, assim como o azul claro demonstra uma correlação positiva mais fraca.



Os resultados do análise de componentes principais (PCA) são mostrados na Figura 26. O PCA explicou os 32,17% da variação dos dados, com o primeiro eixo (PC1) explicando os 18,55% e o segundo eixo (PC2) os 13,62 %. O conteúdo de Si nas folhas mostrou uma correlação significativa com N,. Para o Se mostra-se mais uma correlação Positiva com Cu.

Figura 26. Análise de componentes principais (PCA), para época de aplicação de Se aos 240 DAT e Si 85 DAT. Os atributos incluídos foram entre Teor de Se e Si na folha, teor de macro e micronutrientes (P, K, Ca, Mg, S, Mn, Fe, Cu, Zn, B), massa seca da parte aérea e raiz (MSPA, MSR), composição isotópica de carbono foliar ($\delta^{13}\text{C}$). Assim como Conteúdo Relativo de Água (CRA), Taxa Fotossintética (A , $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$); Condutância Estomática (g_s , $\text{mol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) e Taxa Transpiratória (E , $\text{mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$), resultados dessas variáveis mostrados nos momentos do máximo estresse e reidratação das plantas de *Coffea arabica*.



Os grupos de correlação distinguiram claramente os tratamentos e suas respectivas associações. Os tratamentos com doses de 5 g ha⁻¹ de Se combinada com 35 mg kg⁻¹ mostraram uma relação mais forte e evidente com Si, corroborando os resultados apresentados anteriormente (Figura 15A), também com o CRA durante a reidratação. Asi como a relação do Cu com a doses de 10 g ha⁻¹ de Se combinada com 70 mg kg⁻¹ de Si (Figura 18A). A relação dos teores de Se com os tratamentos onde foi aplicada a maior dose (20 g há⁻¹) desse elemento.

7. DISCUSSÃO

7.1 Aplicação de Si aos 85 DAT e Se aos 95 DAT em plantas de *Coffea arabica*.

As plantas de *coffé arábica* foram capazes de absorver o Si aplicado via solo assim como absorver o Se fornecido com aplicação foliar, nas fontes de Wollastonita e Selenato de Sódio, aplicados aos 85 DAT e 95 DAT respectivamente. Os teores encontrados de Se nos tecidos das plantas tratadas com a dose de 10 g ha⁻¹ de Se, combinado com doses de 35 e 70 mg kg⁻¹ de Si (Figura 5A), estão acima do limiar de 4 mg kg⁻¹, que foi estabelecido por Carvalho e Moreira (2023) como o limite máximo no qual as plantas apresentam toxidez pelo elemento. No entanto, não foi observado sintomas de toxidez visível como: manchas pretas, manchas rosas na raiz ou branqueamento das folhas novas das plantas. Isso pode estar relacionado ao fato de que as concentrações críticas de deficiência e toxidez de Se variam consideravelmente entre espécies e, segundo Kolbert (2019), os sintomas de toxidez em plantas começam a ser percebidos a partir de 5 mg kg⁻¹ de Se.

Conforme Hattori *et al.* (2005), embora o Si seja um elemento abundante na natureza, sua disponibilidade para as plantas em solução de solo é geralmente baixa, resultando numa captação reduzida, especialmente para as dicotiledôneas, como o cafeeiro. Os incrementos mostrados de 20,5% no teor de Si nas plantas tratadas com doses de 70 e 35 mg kg⁻¹ de Si, combinadas com 5 e 10 g ha⁻¹ de Se, respectivamente, em relação ao controle (Figura 5B), pode ser atribuído ao fato de que as plantas de café não acumulam Si na parte aérea. Os teores encontrados no presente trabalho confirmam a classificação já dada ao cafeeiro como uma espécie não acumuladora de Si (Ma *et al.*, 2001; Reis *et al.*, 2007), embora não haja uma quantidade máxima definida de Si a ser aplicada nas plantas. Além disso não foi constatado o efeito tóxico deste elemento (Korndorfer *et al.* 2002), sendo assim que o Si mesmo sendo absorvido em excesso, geralmente não tem risco de toxidez nas plantas (Prado, 2023).

A dificuldade em armazenar Si está relacionada à absorção e transporte desse elemento na planta, provavelmente sendo uma consequência da ausência ou falta de transportadores de membrana do solo para a raiz (Lsi1) e da raiz para o xilema (Lsi2) nas células das raízes (Nikolic *et al.*, 2007; Yamaji; Ma, 2007; Ma e Yamaji, 2008).

Acompanhando tais resultados o incremento de 30,8% na produção de MSPA (Figura 8) na presença de teores foliares de 2,36 mg kg⁻¹ para Se e 8,09 g kg⁻¹ para Si, e mostrados quando foram aplicadas as doses de 35 mg kg⁻¹ de Si e 5 g ha⁻¹ de Se, esse aumento na MSPA

foi obtido na aplicação da dose mais baixa de Si, supõe-se que a dosagem maior pode ter elevado o pH do solo até um nível em que pode verse reduzida a disponibilidade de P para as plantas, atendendo ao efeito corretivo dos silicatos. Quando verificados os teores de P nos tecidos das plantas nesta dose foi mostrado um maior valor ($11,14 \text{ g kg}^{-1}$) em relação as plantas em que se aplicaram as demais doses de Si e Se, mostrando que a disponibilidade de fósforo é importante no crescimento das plantas de café.

Esse comportamento pode ter influenciado no menor crescimento das plantas, sendo que o P proporciona energia e também favorece o crescimento e desenvolvimento do sistema radicular. Foi observado também neste estudo que essas mesmas doses mostraram um incremento de 34,35% na produção de MSR nas plantas (Figura 8B), comparativamente quando aplicou-se essa mesma doses de Se em combinação com uma dose de Si aumentada em 100%, a produção de MSPA e MSR foi menor (Figura 8B). Avaliando o efeito de doses de Wolastonita sobre atributos de quatro solos representativos da região de cerrado, Korndörfer *et al.*, (1999) apresenta reações responsáveis na elevação do pH, onde argumenta-se que é dado pelo aumento da concentração de hidroxilas liberadas durante a dissolução do silicato de cálcio no solo.

É crucial prestar atenção ao utilizar Se na agricultura, pois ele pode interagir com os nutrientes presentes nos tecidos e alterar o equilíbrio mineral das plantas. Em concentrações elevadas, o efeito antioxidante do Se pode ser transformado em toxico, resultando no acúmulo de espécies reativas de oxigênio (ERO) e subsequente estresse oxidativo, o que pode inibir o processo de fotossíntese. (Chauhan *et al.*, 2017; Wan *et al.*, 2019), esse efeito pode ter acontecido em nosso trabalho, já que naquelas plantas que apresentaram maiores teores de Se (Figura 5A) nos tecidos foliares mostraram valores baixos para fotossínteses durante o período de reidratação (Figura 9B) o que resultou numa menor produção de MSPA e MSR (Figura 7A e B).

O maior murchamento e postramento das folhas das plantas de *Coffea arabica* quando a condição do solo foi levada para 50% ADS (Figura 6) pode estar relacionado ao fato de que houve perda de turgência das células e entraram num período de estresse causado por déficit hídrico o que sugere que a planta passou por uma desidratação do protoplasma, o que pode ter prejudicado os processos vitais de crescimento.

Em condições de seca, o CRA nas folhas tende a diminuir, pois a planta pode estar perdendo mais água através da transpiração do que pode absorver do solo (Choné, 2001). As plantas sob 50% de AD no solo em média geral apresentaram uma redução no CRA de 20,97%,

quando comparadas com as plantas no momento da reidratação. O CRA é uma boa referência das condições hídricas da planta, especialmente quando enfrentam períodos de seca, como foi observado no presente trabalho que a imposição do déficit hídrico causou redução no CRA das plantas de *Coffea arabica*.

O maior CRA mostrado nas plantas que não foram tratadas com doses de Se e Si em relação as plantas em que foram fornecidos esses elementos (Figura 7), pode relacionar-se a que quando analisadas as condições climáticas registradas na casa de vegetação durante o período de estresse, verifica-se temperaturas acima de 43 °C (Figura 4), valores muito maiores aos recomendados para a cultura de café. Os problemas causados pela alta temperatura podem ter impactado diretamente nas trocas gasosas da planta. Em nosso estudo, além do estresse hídrico imposto, pode ter ocorrido um estresse adicional por calor.

Nesse contexto, a perda de água nas plantas tratadas com doses de Si e Se não representa um desperdício, mas sim um mecanismo de proteção contra os danos térmicos. Segundo DaMatta; Ramalho (2006) as folhas das plantas de café normalmente mantem um CRA alto, independentemente da disponibilidade de água, para evitar o estresse em vez de tolera-lo. Para os autores, isso parecia estar mais relacionado à regulação estomática e à manutenção das trocas gasosas do que ao turgor. As doses que apresentaram os valores mais baixos na produção de MSPA (Figura 8A) foram as que mostraram maior CRA (Figura 7B), o que supõe que uma copa das plantas de *Coffea arabica* bem desenvolvida demandaria maior quantidade de água para suportar a evapotranspiração desta cultura (Ribeiro, 2011).

O silício, reconhecido como um elemento benéfico, que estimula a produção de várias moléculas antioxidantes, conforme demonstrado no estudo de Alzahrani *et al.*, (2018), onde argumenta-se que esse elemento melhora o estado hídrico e a fotossíntese em folhas de plantas submetidas à seca. A redução da fotossíntese durante a reidratação (Figura 9B) observada naquelas plantas que mostraram um maior teor de Si nos tecidos foliares (Figura 5B) pode estar associado a que uma maior deposição de Si nos tecidos foliares se relaciona a uma diminuição da condutância estomática, relatado também por Barros *et al.*, (2018). Já que o Si, quando é depositado nas folhas, por força da transpiração, polimeriza nos tecidos, formando cadeias grandes de ácido polisilícico, que reduzem a flexibilidade da parede dos estômatos (Luz *et al.*, 2006), foi mostrado ao examinar milho. Gao *et al.*, (2006) constataram que o tecido celular que recebe Si se torna mais espesso, com maior incidência nas células epidérmicas. Isso sugere que o Si tenha atuado como um regulador da abertura estomática, o que resulta na diminuição da disponibilidade de CO₂ e da taxa fotossintética.

O aumento no CRA nas plantas no momento da reidratação (Figura 7B) resultou numa elevação na taxa fotossintética (Figura 9B) em plantas que passaram por o déficit hídrico (20 dias), em que particularmente as aplicações de 35 mg kg⁻¹ de Si em combinação com 5 e 20 g ha⁻¹ de Se, apresentaram teores embaixo do limiar de toxidez (4 mg.kg⁻¹), esse aumento na taxa fotossintética pode ser atribuído a que o Se em concentrações reduzidas nos tecidos tem um papel no aumento da atividade de enzimas do sistema antioxidante (Cartes *et al.*, 2005; Silva *et al.*, 2018), podendo ser que na presença de teores de 3,23 e 2,91 mg kg⁻¹ de Se nos tecidos foliares das plantas de *Coffea arabica* ativaram-se enzimas como SOD, CAT e APX atuando nos mecanismos de proteção, diminuindo o estresse oxidativo mediante a redução dos níveis de ERO e consequentemente protegendo a função das membrana (Desoky *et al.*, 2021; Bhadwal ; Sharma, 2022). Estudos relatam esse efeito em azevém (Cartes *et al.*, 2005), alface (Hartikainen *et al.*, 1997; Xue *et al.*, 2001), trevo branco (Mora *et al.*, 2008) e soja (Djanaguiraman *et al.*, 2005). Além disso, o fornecimento de Si está associado ao aumento na capacidade fotossintética das plantas, efeito indireto atribuído ao seu papel no desenvolvimento da arquitetura foliar, permitindo que as folhas permaneçam mais eretas e menos suscetíveis a danos causados por fatores bióticos ou abióticos, quando o elemento está presente nos tecidos das plantas (Menegale; Castro *et al.*, 2015).

A fotossíntese e, consequentemente, a respiração dependem de um fluxo constante de CO₂ e O₂ que entra e sai da célula, esse fluxo livre varia de acordo com a concentração de CO₂ e O₂ nos espaços intercelulares, que são controlados pela abertura estomática, sendo esta a principal responsável pelo fluxo de gases (Messinger *et al.*, 2006). Ela em grande parte pode ser controlada pela turgescência das células-guarda (controlando a abertura dos estômatos) e também pelas células epidérmicas dos estômatos (Humble; Hsiao, 1970).

As plantas de *Coffea arabica* durante o período de estresse hídrico (Figura 10), exibiram um comportamento semelhante ao descrito por Oliveira (2005) em feijão, para condutância estomática, onde esse autor relatou que apesar da interação de vários fatores que afetam os estômatos e consequentemente a condutância estomática, o estresse hídrico tem um efeito evidente sobre esse parâmetro, mostrando uma baixa atividade durante o período de estresse, mas constatou-se que, a aplicação de 70 mg kg⁻¹ de Si combinada com aplicação de 5 g ha⁻¹ de Se, favorece uma maior condutância estomática nas plantas de café em estresse por déficit hídrico (Figura 10A), o que pode ser negativo em vista que essas plantas. Já no período da reidratação (Figura 10B) as plantas tratadas com essas doses não conseguiram manter ou elevar

essa condição, podendo dever-se a um maior esgotamento da planta por não ter controle do que estava acontecendo no meio.

Em situações quando as plantas são expostas ao déficit hídrico, como em neste estudo, o fechamento dos estômatos é o mecanismo principal de controle das trocas gasosas. (Damatta; Ramalho, 2006). As doses de 10 g ha⁻¹ de Se com 35mg kg⁻¹ de Si, propiciaram um maior incremento na condutância estomática (Figura 10B) no momento da reidratação das plantas.

O nível da abertura estomática modifica em consequência a transpiração, sendo que essa participa da regulação térmica das plantas, permite a absorção e o particionamento de nutrientes, assim como resfriamento das folhas (Araus *et al.* 2003). A diminuição da transpiração é influenciada pelo fechamento dos estômatos (responsáveis pelo fluxo de entrada e saída de água e CO₂). Assim, uma menor abertura aumenta a resistência estomática, o que reduz a transpiração (Taiz; Zeiger, 2004). Nesse sentido quando as plantas foram tratadas com 70 mg kg⁻¹ de Si combinados com 5 g ha⁻¹ de Se, foi mostrado que durante o estresse hídrico exibiram maior taxa transpiratória (Figura 11A), o que pode favorecer a perda de água. No entanto plantas tratadas com 35 mg kg⁻¹ de Si nas doses 5 g ha⁻¹ de Se mostraram baixa taxa de transpiração no momento da reidratação (Figura 11A), podendo ser uma estratégia para evitar a perda de água.

O estado fisiológico das plantas ao longo de um ciclo pode ser medido mediante a determinação de $\delta^{13}\text{C}$. Por sua relação com as condições ambientais e devido às variações de fotossínteses e condutância estomática (Anderson *et al.*, 1996) tem sido empregado como uma ferramenta para determinar plantas tolerantes à seca (Farquhar; Ehleringer; Hubick, 1989). Nesse sentido, Ngugi *et al.* (2003); Yin; Pang; Chen (2009), relatam que plantas sob uma condição de seca apresentam valores mais altos de $\delta^{13}\text{C}$ (menos negativos) assim como um menor teor de água nos tecidos das folhas. Adicionalmente, as plantas que toleram a seca apresentam valores mais baixos de $\delta^{13}\text{C}$ do que aquelas que não são tolerantes (Damatta *et al.*, 2003). Nesse sentido das sete doses aplicadas nas plantas duas delas mostraram tolerância ao estresse causado por déficit hídrico, sendo as plantas em que foram aplicadas doses 5 e 10 g ha⁻¹ de Se combinadas com 35 mg kg⁻¹ de Si, apresentando valores de $\delta^{13}\text{C}$ de -27,19 e -27,20 ‰ respectivamente (Figura 12).

Farquhar; Richards (1984) e Mateus (2019) argumentam que quando se apresentam situações de estresse hídrico como disponibilidade limitada de água, a captação de CO₂ será limitada, o que resultara numa diminuição na concentração intercelular de CO₂ na folha em

relação ao carbono atmosférico e a um aumento em $\delta^{13}\text{C}$ na planta. Constituiu-se assim um ótimo indicador para avaliar a resposta da planta quando submetida ao estresse hídrico, principalmente em avaliar o seu potencial para tolerar à escassez de água.

O incremento de 56,5% no teor de K (Figura 13A) mostrado mediante a aplicação de 70 mg kg⁻¹ de Si em combinação com 20 g ha⁻¹ de Se, em relação ao controle, pode estar relacionado à aplicação de Si via solo, ainda a interação entre o Si e o K nas plantas tem sido menos explorada em comparação com o N e o P. Estudos indicam que o Si pode influenciar a concentração de K nos tecidos vegetais, promovendo maior absorção desse nutriente e melhorando o desempenho fisiológico das plantas (Pavlovic *et al.*, 2021). Tendo em conta que a absorção de K nas raízes é um processo ativo, que é mediado por uma H⁺ ATPase, a maior absorção observada pode estar relacionada à uma maior ativação dessa proteína transmembrana pelo suprimento dessa dose de Si (Liang, 1999).

Aparecido (2021) informou que com a aplicação de doses baixas de Si em plantas de café aos 330 DAT, obtém-se uma maior absorção de Fe pela planta, argumentando que pode dever-se a um antagonismo de ferro em relação ao Si quando se tem menor disponibilidade hídrica, comportamento similar foi mostrado em nosso trabalho onde plantas tratadas com 35 mg Kg⁻¹ de Si com 5 g ha⁻¹ de Se mostraram uma maior absorção de Fe (Figura 13B).

7.2 Aplicação de Si aos 85 DAT e Se aos 240 DAT em plantas de *Coffea arabica*.

O teor encontrado de Se (4,21 mg kg⁻¹) nos tecidos das plantas tratadas com a dose de 20 g ha⁻¹ de Se, combinado com 70 mg kg⁻¹ de Si (Figura 16A), encontra-se acima do limiar de 4 mg kg⁻¹, que foi estabelecido por Carvalho e Moreira (2023) como o limite máximo no qual as plantas apresentam toxidez pelo elemento. No entanto, não foram observados sintomas de toxidez visíveis como: manchas pretas, manchas rosas na raiz ou branqueamento das folhas novas das plantas. Isso pode estar relacionado ao fato de que as concentrações críticas de deficiência e toxidez de Se variam consideravelmente entre espécies e, segundo Kolbert (2019), os sintomas de toxidez em plantas começam a ser percebidos a partir de 5 mg kg⁻¹ de Se.

O aumento significativo de 13% no teor de Si (9,10 mg kg⁻¹) quando foram aplicadas doses de 35 mg kg⁻¹ de Si com 5 g ha⁻¹ de Se (Figura 16B), pode atribuir-se a que as plantas de

café não acumulam Si na parte aérea. Embora sem diferença significativa o incremento de 0,2% na produção de MSPA (Figura 19A) nas plantas que se trataram com 10 g ha⁻¹ combinadas com Si 70 mg kg⁻¹, assim como o incremento de 8,57% na produção de MSR nas plantas (Figura 19B) da plantas tratadas com essa mesma dose de Si e Se, quando comparadas com o controle, pode dever-se a que as plantas conseguem desenvolver um sistema radicular complexo e adaptável para buscar água no solo, um recurso essencial para seu crescimento e desenvolvimento.

E reconhecido que o Si tem efeito benéfico no acúmulo de fitomassa em plantas cultivadas está associado a modificações na estrutura das plantas, propiciando uma melhor captação de energia solar (Riveiro, 2011), nesse sentido, as plantas utilizam mecanismos como a hidrotropia que é um crescimento em resposta ao gradiente de umidade (Takahashi; Scott, 1993). As plantas nesta dose quando detectaram a deficiência hídrica do solo podem ter iniciado respostas fisiológicas e morfológicas para aumentar a absorção de água. Isso inclui um aumento no crescimento de raízes para uma maior exploração do volume de solo, efeito mostrado em detrimento do crescimento da parte aérea. Em condições de estresse hídrico, o selênio pode atuar como um antioxidante eficaz, ajudando as plantas a mitigar os danos oxidativos nas células das raízes, promovendo crescimento em plantas e rendimento das culturas (Luo *et al.*, 2020).

A perda de turgência das células, demonstrou que as plantas entraram em estresse causado por déficit hídrico o que sugere que a planta passou por uma desidratação do protoplasma, o que pode ter prejudicado os processos vitais de crescimento. Evidenciado com o maior murchamento e postramento das folhas das plantas de *Coffea arabica* quando a condição do solo foi levada para 50% AD no solo (Figura 17).

O leve aumento de 2,5% apresentado no CRA (Figura 18B) no momento do máximo estresse, quando aplicou-se 35 mg kg⁻¹ de Si e uma aplicação de 5 g ha⁻¹ de Se, e os valores baixos do CRA podem-se atribuir às condições climáticas, já que os registros dentro da casa de vegetação durante o período de estresse mostram que atingiram-se temperaturas acima de 43 °C (Figura 4), valores muito maiores aos recomendados para a cultura de café. Os problemas causados pela alta temperatura podem ter impactado diretamente nas trocas gasosas da planta.

Em condições de seca, o CRA nas folhas tende a diminuir, pois a planta pode estar perdendo mais água através da transpiração do que pode absorver do solo (Choné, 2001). As plantas sob 50% de ADS em média geral apresentaram uma redução no CRA de 25,60%, quando comparadas com as plantas no momento da reidratação (Figura 18 A e B). O CRA é

uma boa referência das condições hídricas da planta, especialmente quando as plantas enfrentam períodos de seca, no presente trabalho observa-se que a imposição do déficit hídrico causou redução no CRA das plantas de *Coffea arabica*, sendo um indicador que a condição hídrica imposta ao solo afetou o conteúdo de água nas folhas das plantas.

Para esta época de aplicação de Se, além do estresse hídrico aplicado, também é possível que as plantas tenham enfrentado um estresse adicional devido ao calor. Em relação à perda de água observada nas plantas tratadas com diferentes doses de Si e Se, não devemos interpretá-la como um desperdício, mas sim como um mecanismo de proteção contra danos térmicos.

O silício, reconhecido como um elemento benéfico, que estimula a produção de várias moléculas antioxidantes, conforme demonstrado no estudo de Alzahrani *et al.* (2018), que melhora o estado hídrico e a fotossíntese em folhas de plantas submetidas à seca, observou-se uma maior taxa fotossintética (Figura 20B) quando as plantas foram reidratadas, podendo ser consequência que essas plantas neste momento elevaram a taxa transpiratória (Figura 22B) tendo assim uma maior entrada de CO₂ para o processo fotossintético, essas plantas mostraram um maior teor de Si nos tecidos foliares (Figura 16B) quando tratadas com 5 g ha⁻¹ de Se combinada com 35 mg kg⁻¹ de Si.

Como um efeito indireto é observado o aumento na capacidade fotossintética quando as plantas recebem uma nutrição com uma fonte de Si. Como o Si é incorporado na parede celular das folhas, fortalecendo-as e proporcionando maior rigidez, isso faz que as folhas mantenham mais eretas o que permite uma melhor exposição à luz solar, o que aumenta a eficiência na captura de luz para a fotossíntese também são menos danificadas por agentes bióticos e abióticos (Silva, 2020). Neste caso o silício pode ter atuado mais na parte física da planta.

O aumento no CRA nas plantas no momento da reidratação (Figura 18B) resultou numa elevação na taxa fotossintética (Figura 20B) em plantas que passaram por o déficit hídrico (20 dias) em que particularmente as aplicações de 35 mg kg⁻¹ de Si em combinação com aplicações de 5 e 20 g ha⁻¹ de Se, apresentaram-se teores abaixo do limiar de toxidez (4 mg.kg⁻¹). É comprovado que o Se em concentrações reduzidas nos tecidos tem um papel no aumento da atividade de enzimas do sistema antioxidante (Cartes *et al.*, 2005; Silva *et al.*, 2018), podendo ser que na presença de teores de 3,08 e 3,62 mg kg⁻¹ de Se nos tecidos foliares das plantas ativaram-se enzimas como SOD, CAT e APX atuando nos mecanismos de proteção, diminuindo o estresse oxidativo mediante a redução dos níveis de ERO e consequentemente protegendo a função das membrana (Desoky *et al.*, 2021; Bhadwal; Sharma, 2022), em nosso estudo essas doses apresentaram o incremento da taxa fotossintética. Estudos relatam esse efeito

em culturas como azevém (Cartes *et al.*, 2005), alface (Hartikainen *et al.*, 1997; Xue *et al.*, 2001), trevo branco (Mora *et al.*, 2008) e soja (Djanaguiraman *et al.*, 2005), onde o Se atuou como estimulador de mecanismos que reduziram o estresse oxidativo no aparato fotossintético das plantas, aprimorando seu desenvolvimento.

Esse efeito pode estar associado a alterações na estrutura das plantas, permitindo uma maior captação de energia solar e como consequência tendo aumentado a capacidade fotossintética, efeito atribuído ao seu papel no estímulo no teor de clorofila nos tecidos foliares, alterando a arquitetura das plantas, tornando-as mais eretas e evitando o autossombreamento excessivo, atrasando a senescência, aumentando a rigidez estrutural dos tecidos. (Epstein; Bloom, 2006; Ma; Yamaji, 2008).

Foi observado que no momento do estresse causado por déficit hídrico é favorecida uma maior condutância estomática (Figura 21A) nas plantas em que foi aplicada a dose de 35 mg kg⁻¹ de Si combinada com aplicação de 5 g ha⁻¹ de Se, o que levou a uma maior transpiração (Figura 22A). Já no período de reidratação das plantas foi mostrada uma maior abertura dos estômatos (Figura 21B) na dose de 35 mg kg⁻¹ de Si combinada com aplicação de 10 g ha⁻¹ de Se, mas não apresentou alta taxa de transpiração. Em situações quando as plantas são expostas ao déficit hídrico, como em neste estudo, o fechamento dos estômatos é o mecanismo principal de controle das trocas gasosas. (Damatta; Ramalho, 2006). Assim, uma menor abertura aumenta a resistência estomática, o que reduz a transpiração (Taiz; Zeiger, 2013).

Em condições de disponibilidade adequada de água, maximizar a absorção de CO₂ para a fotossíntese se torna mais crucial do que reduzir a transpiração, em termos de manter a produtividade sob condições de seca (DaMatta, 2003), nesse sentido uma maior taxa transpiratória foi observada no momento da reidratação das plantas em que se aplicou 35 mg kg⁻¹ de Si com aplicação de 5 e 20 g ha⁻¹ de Se (Figura 22B). O nível da abertura estomática modifica também como consequência a transpiração, sendo que essa participa da regulação térmica das plantas e permite a absorção e o particionamento de nutrientes. Segundo Araus *et al.* (2003), uma das principais funções da transpiração é o resfriamento das folhas.

O estado fisiológico das plantas ao longo de um ciclo pode ser medido mediante a determinação de $\delta^{13}\text{C}$. Por sua relação com as condições ambientais e devido às variações de fotossínteses e condutância estomática (Anderson *et al.*, 1996) tem sido empregado como uma ferramenta para determinar plantas tolerantes à seca (Farquhar; Ehleringer; Hubick, 1989). Das sete doses aplicadas nas plantas duas delas mostraram tolerância ao estresse causado por déficit

hídrico, evidenciado que aquelas plantas em que foram aplicadas doses de 5 e 20 g ha⁻¹ de Se com 35 e 70 mg kg⁻¹ de Si respectivamente, apresentaram valores de $\delta^{13}\text{C}$ de -27,76 e -27,79 ‰ (Figura 23).

Nesse sentido, Ngugi *et al.* (2003) e Yin, Pang; Chen (2009), relatam que plantas sob uma condição de seca apresentam valores mais altos de $\delta^{13}\text{C}$ (menos negativos) assim como um menor teor de água nos tecidos das folhas. Adicionalmente, as plantas que toleram a seca apresentam valores mais baixos de $\delta^{13}\text{C}$ do que aquelas que não são tolerantes (Damatta *et al.*, 2003). Em situações de estresse hídrico, a captação de CO₂ será limitada, tendo assim uma menor concentração intercelular de CO₂ na folha em relação ao carbono atmosférico e a um aumento em $\delta^{13}\text{C}$ na planta. Constituiu-se assim um ótimo indicador para avaliar a resposta da planta, principalmente em avaliar o seu potencial para tolerar à escassez de água (Farquhar; Richards, 1984; Mateus, 2019).

O incremento de 206% no teor de Cu mostrado mediante a aplicação de 70 mg kg⁻¹ de Si em combinação com 10 g ha⁻¹ de Se (Figura 24A), em relação ao controle, pode estar relacionado a aplicação de Si via solo, já foram relatados aumentos em *C. canéfora*, sendo que o Cu é o quinto micronutriente mais acumulado com um percentual de 2% do total de micronutrientes distribuídos entre os vários órgãos (Bragança; Prezotti; Lani, 2007). Além disso, é mostrado que em plantas de arroz as aplicações de Si promoveram uma maior translocação de Zn do sistema radicular para a parte aérea da planta (Mehrabanjoubani *et al.*, 2015), mostrado também em nosso trabalho em que se teve um incremento do 23% no teor de Zn, conseguido com a aplicação de 35 mg kg⁻¹ de Si em combinação com 10 g ha⁻¹ de Se (Figura 24B). O aumento no teor de Mn (Figura 24C), também foi observado em plantas de sorgo, resultando em melhor atividade fotossintética e produção de matéria seca (Oliveira, 2017), devido a que o Si também aumenta a tolerância interna ao excesso de Mn nos tecidos (Accioly *et al.*, 2009).

8 CONCLUSÕES

A condição de 50% de água disponível no solo impôs um estresse causado por déficit hídrico nas plantas de *Coffea Arábica*, resultando no postramento das folhas após 4 dias de exposição a essa condição, quando o Si foi aplicado com 170 dias de antecedência (85 DAT) e Se foi fornecido 160 dias antes (95 DAT) como aplicação com apenas 15 dias (240 DAT) de antecedência ao período de déficit hídrico, conclui-se que:

1. O fornecimento de Se combinado com Si revelou grande potencial para reduzir os efeitos adversos do estresse causado por déficit hídrico, imposto nas plantas com 255 DAT, em que o isótopo $\delta^{13}\text{C}$ indicou que plantas tratadas com doses de 35 mg kg^{-1} de Si combinadas com 5 e 20 g ha^{-1} de Se mostraram maior tolerância, nas duas épocas (antecipação de 160 e 15 dias) de aplicação de Se, frente ao período de restrição hídrica.
2. Plantas tratadas com 35 mg kg^{-1} de Si combinadas com 5 g ha^{-1} de Se, resultaram numa maior produção de MSPA e MSR, ganho obtido com aplicações antecipadas de 160 dias para Se e 170 dias para Si, frente ao período de déficit hídrico, essas plantas apresentaram um maior incremento na taxa fotossintética no dia 5 do período de reidratação, após estresse, evidenciando uma recuperação e tolerância.
3. Aplicações antecipadas com 160 dias para Se e 170 dias para Si em relação a um período de déficit hídrico, demonstraram ser benefício-as para o desenvolvimento das plantas de *Coffea arabica* em comparação a um fornecimento de Se próximo (15 dias de antecedência) a uma condição adversa, destacando a importância da sincronização das aplicações desses elementos na preparação das plantas para responder ante situações ambientais desfavoráveis, como déficit hídrico.
4. Aplicações de doses baixas de Si (35 mg Kg^{-1}) combinadas com 5 g ha^{-1} de Se em plantas de café aos 280 DAT, obtém-se uma maior absorção de Fe pela planta, o que pode dever-se a um antagonismo de ferro em relação ao Si quando se tem menor disponibilidade hídrica.

9 CONSIDERAÇÕES.

Este estudo teve como objetivo avaliar a influência do Si e Se na atenuação do estresse hídrico no primeiro ano de desenvolvimento de plantas de *Coffea arabica*, visando verificar se aplicações desses elementos, tanto antecipadas quanto próximas a um período de déficit hídrico, fornecerão maior resistência às plantas, assim como testar diferentes doses combinadas desses elementos para serem usadas na atenuação do estresse hídrico nas plantas de café.

Os resultados indicaram que as aplicações de 35 mg kg⁻¹ de Si, combinadas com aplicações antecipadas de 160 dias (95 DAT) de 5 g ha⁻¹ de Se, propiciam maior produção de MSPA e MSR, sendo favoráveis para a formação da planta sob condições de restrição hídrica. Esse achado sugere que a aplicação antecipada de Se e Si pode ser uma estratégia viável para aumentar a resiliência de culturas importantes como o cafeeiro, especialmente em regiões suscetíveis a períodos de seca.

Uma limitação deste estudo foi as altas temperaturas alcançadas na casa de vegetação durante a realização do experimento, que pode ter refletido na fisiologia da planta e além de um estresse por déficit também foi imposto um estresse por calor, sendo o cafeeiro uma cultura muito sensível as variações de temperatura.

Pesquisas futuras poderiam estudar os efeitos a longo prazo da aplicação combinada e antecipada de Si e Se em diferentes variedades de *Coffea arabica*, incluindo a indução de mais de um período de déficit hídrico, bem como explorar a interação do Si com outros nutrientes essenciais no solo ao final do experimento, considerando o efeito corretivo dos silicatos, sendo o cafeeiro uma planta não acumuladora de Si.

Em resumo, este estudo contribui para o entendimento do comportamento do Se nas plantas e fornece informações de que, quando aplicado antecipadamente a um período de déficit hídrico, este elemento permanece na planta e pode promover mecanismos de resistência. Além disso, seu efeito combinado com o Si aplicados em baixas doses favorece a produção de biomassa tanto da parte aérea quanto das raízes. A formação de uma arquitetura inicial robusta da planta beneficia o processo fotossintético, o que, por sua vez, melhora a resiliência e produtividade das culturas diante das mudanças climáticas.

REFERÊNCIAS

- ACCIOLY, A.M.A.; SOARES, C.R.F.S.; SIQUEIRA, J.O. Silicato de cálcio como amenizante da toxidez de metais pesados em mudas de eucalipto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.44, n.2, p.180-188, 2009.
- ALZHRANI, Y.; KUSVURAN, A.; ALHARBY, H. F.; KUSVURAN, S.; RADY, M. M. The defensive role of silicone in wheat against stress conditions induced by drought, salinity or cádmium. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, v. 154, p. 187-196, 2018.
- ANDERSON, J. Correlations Between Carbon Isotope Discrimination and Climate of native habitats for Diverse Eucalyps Taxa Growing a Common Garden. **Funtional Plant Biology**, **Melbourne**, v. 23, n 3, p 311, 1996.
- APARECIDO, F. Utilização de silício em *coffea arabica l.* e *coffea canephora pierre* cultivados em diferentes regimes hídricos. **Tese de doutorado**. Campus de Ilha Solteira Programa de pós-graduação em agronomia. 66p, 2021.
- ARAUS J. L.; BORT, J.; STEDUTO, P.; VILLEGAS, D.; ROYO, C. Breeding cereals for Mediterranean conditions: ecophysiological clues for biotechnology application. **Annals of Applied Biology**, v. 142, p. 129-141, 2003.
- AUGUSTO AGUILAR DANTAS, A.; GONSAGA DE CARVALHO, L.; FERREIRA, E. comunicação classificação e tendências climáticas em lavras, mg Climatic classification and tendencies in Lavras region, **MGCiênc. agrotec.** 2007.
- BHADWAL, S., SHARMA, S. Selenium alleviates carbohydrate metabolism and nutriente composition in arsenic stressed rice plants. **Rice Science**, v. 29, n. 4, p. 385-396, 2022.
- BARRIE, A. N. D. R. E. W., AND S. J. P. "Automated analysis of light-element stable isotopes by isotope ratio mass spectrometry." **Mass spectrometry of soils**. New York, Marcel Dekker, 1-46, 1996.
- BARROS, T. C.; PRADO, R. DE M.; ROQUE, C. G.; BARZOTTO, G. R.; WASSOLOSCKI, C. R. Silicon and salicylic acid promote diferente responses in legume plants. **Journal of Plant Nutrition**, p. 01-10, 2018.
- BUEGE, J.A.; AUST, S.D. Microsomal lipid peroxidation. **Methods in Enzymology**, **Pasadena**, v.52, p.302-310, 1978.
- BOWLING, D.R.; MCDOWELL, N.G.; BOND, B.J.; LAW, B.E.; EHLERINGER, J. ¹³C content of ecosystem respiration is linked to precipitation and vapor pressure deficit. **Oecologia**, New York, v. 131, p. 113-124, 2002.
- BRAGANÇA, S. M.; PREZOTTI, L. C.; LANI, J. A. *Nutrição do Cafeeiro Conilon*. Livro Café Conilon - cap 11 - pag 296 a 327. 2007.
- CARTES, P.; GIANFREDA, L.; MORA, M.L. Uptake of selenium and its antioxidante activity in ryegrass when applied as selenate and selenite forms. **Plant and Soil**, The Hague, 1360 v. 276, p. 359-367, 2005.
- CARVALHO, WP; MOREIRA A.L. Nutrição Mineral de Plantas. Livro eletrônico. 1. ed. Piracicaba, SP. 37 p. 2023.

CENTURION, J. F.; ANDREOLI, I. Regime hídrico de alguns solos de Jaboticabal. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 24, n. 4, p. 701-709. 2000.

CERNUSAK, L. A.; WINTER, K, DALLING J, HOLTUM B , CARLOS JARAMILLO J , KÖRNER C, LEAKEY A, RICHARD J. NORBY F , POULTER B, TURNER B AND WRIGHT J. Tropical forest responses to increasing atmospheric CO₂: current knowledge and opportunities for future research. **Plant Biology**. 40. 531-521. 2013.

CHAUHAN, R., AWASTHI, S., TRIPATHI, P., MISHRA, S., DWIVEDI, S., NIRANJAN, A., TRIPATHI, R. D. Selenite modulates the level of phenolics and nutrient element to alleviate the toxicity of arsenite in rice (*Oryza sativa* L.). **Ecotoxicology and Environmental Safety**, 138, 47–55, 2017

CHONÉ, X. Stem Water Potential is a Sensitive Indicator of Grapevine Water Status. **Annals of Botany**, 87, n. 4, p. 477-483, 2001.

CRAIG, H. Isotopic standard for carbon and oxigen and correction factors for mass-spectrometric analysis of carbono dioxide. **Geochimica et Cosmochimica Acta**. New York. V.12, p. 133-149, 1957.

CONAB - COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. *Acompanhamento da safra brasileira: café*. Disponível em: <https://www.conab.gov.br/infoagro/safras/seriehistorica-das-safras> .

COSTA, G.F.; MARENCO, R.A. Fotossíntese, condutância estomática e potencial hídrico foliar em árvores jovens de andiroba (*Carapa guianensis*). **Acta Amazônica**, v.37, n.2, p.229-234, 2007.

COSTE, R. Les Caféiers et les cafés dans lê monde. Paris: Larose, 365 p. 1955.

DAMATTA, F. M. Drought tolerance of two field-grown clones of coffea canéfora. **Plant Science**, Lausanne, v. 164, n. 1, p. 11-117, 2003.

DAMATTA, F. M. et al. Impacts of drought and temperature stress on coffee physiology and production: a review Braz. J. **Plant Physiol.** 2006.

DAMATTA, F. M. Exploring drought tolerance in coffee: a physiological approach with some insights for plant breeding. **Brazilian Journal of Plant Physiology**, São Paulo, v. 16, p. 1-6, 2004.

DAMATTA, E.M. Ecophysiological constraints on the production of shaded and unshadedcoffee: a review. **Field Crops Research**, v. 86, p. 99-114, 2004.

DAMATTA, F. M.; RAMALHO, J. D. C. Impacts of drought and temperature stress on coffee physiology and production: a review. **Brazilian Journal of Plant Physiology**, Campos dos Goytacazes, v. 18, n. 1, p. 55-81, 2006.

DECHEN, A. R.; NACHTIGALL, G. RIBEIRO. Elementos requeridos à nutrição de plantas. Fertilidade do Solo, cap. 3, p. 91-133, 2006.

DJANAGUIRAMAN, M.; DURGA DEVI, D.; SHANKER, A.; SHEEBA, A.J.; SHANKER, A.K.; BANGARUSAMY, U. Selenium – an antioxidative protectant in soybean during senescence. **Plant and Soil**, The Hague, v. 272, 2005.

DEREN, C.W.; DATNOFF, L.E.; ZINDER, G.H.; MARTÍN, F. Silicon concentration disease response and yield components of rice genotypes grown on flooded organic Histosols. **Crop Science**, v.34, p.733-737, 1994.

DESOKY, E. S., MERWAD, A. R., ABO EL-MAATI, M. F., MANSOUR, E., ARNAOUT, S. M., AWAD, M. F., RAMADAN, M. F., IBRAHIM, A. S. Physiological and biochemical mechanisms of exogenously applied selenium for alleviating destructive impacts induced by salinity stress in bread wheat. **Agronomy**, v. 11, p. 926- 932, 2021.

EPSTEIN, E. Silicon. Annual Review of plant Physiology and Plant Molecular Biology, Palo Alto, v. 50, p. 641-664, 1999.

EPSTEIN, E. The anomaly of silicon in plant biology. Disponível em: <<https://www.pnas.org>>.1994.

EPSTEIN, E.; BLOOM, A. Nutrição mineral de plantas: Princípios e perspectivas. Londrina, PR: Planta. 2006.

ENGELBRECHT, B. M. J.; COMITA, L. S.; CONDIT, R.; KURSAR, T. A.; TYREE, M.T.; TURNER, B. L. et al. Drought sensitivity shapes species distribution patterns in tropical forests. **Nature**, v.447, p. 80-2, 2007.

FARQUHAR, G. D.; J. R. SHARKEY, T.D. Estomacal Conductance and Photosynthesis. **Annual Riview and Plant physiology**, Palto Alto vol. 33, p 317-345. 1982.

FARQUHAR, G. D.; RICHARDS, R. A. Isotopic composition of plant carbon correlates with water-use efficiency of wheat genotypes. **Australian Journal of Plant Physiology**, 11(6), 539–552, 1984.

FARQUHAR, G.D.; EHLENGER, J.R.; HUBICK, K. T. Carbon Isotope Discrimination and Photosynthesis. **Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology**, Palo Alto, v. 40, p. 503-537, 1989.

FAO – Organização das Nações Unidas para Alimentação e Agricultura. Disponível em: **ESTADO DE LA TIERRA, EL SUELO Y EL AGUA** <http://https://www.fao.org/3/cb7654es/online/src/html/chapter-1-3.html>. 2023.

FOX, J. P., CAPEN, J. D., ZHANG, W., MA, X., ROSSI, L. Effects of cerium oxide nanoparticles and cadmium on corn (*Zea mays* L.) seedlings physiology and root anatomy. **NanoImpact**, v. 20, p. 100264, 2020.

GAO, X.; ZOU, C.; WANG, L.; ZHANG, F. Silicon decreases transpiration rate and conductance from stomata of maize plants. **Journal of Plant Nutrition**, v. 29, p. 1637-1647, 2006.

GOLOB, A.; NOVAK, T.; MARŠIĆ, N.K.; ŠIRCELJ, H.; STIBILJ, V.; JERŠE, A.; KROFLIČ, A.; GERM, M. Biofortification with selenium and iodine changes morphological properties of *Brassica oleracea* L. var. gongylodes and increases their contents in tubers. **Plant Physiology and Biochemistry**, v. 150, p 234-243, 2020.

GUIMARÃES FA, DE SOUZA J, DE ALENCAR SCHIAVI S **Revista Gestão da Produção Operações e Sistemas** 15(2) 227-252p, 2020

GUPTA, N.; RAM, H.; KUMAR, B. Mechanism of zinc absorption in plants: uptake, transport, translocation and accumulation. **Reviews in Environmental Science and Biotechnology**, v. 15, n. 1, p. 89–109, 2016.

- HARTIKAINEN, H.; EKHOLM, P.; PIIRONEN, V.; XUE, T.; KOIVU, T.; YLI-HALLA, M. Quality of the ryegrass and lettuce yields as affected by selenium fertilization. **Agricultural and Food Science in Finland**, [s. l.], v. 6, p. 5-6, 1997.
- HASSAN ETESAMI; BYOUNG RYONG JEONG. 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, 2018.
- HATTORI, T. et al. Application of silicon enhanced drought tolerance in *Sorghum bicolor*. **Physiologia Plantarum**, v. 123, n. 4, p. 459-466, 2005.
- HAVIR, E.A.; McHALE, N.A. Biochemical and development characterization of multiples forms of catalase in tobacco leaves. **Plant Physiology**, v. 84, p. 450-455, 1987.
- HEITOR CANTARELLA *et al.* **BOLETIM 100**: Recomendações de adubação e calagem para o estado de São Paulo. 500p. 2022.
- HERMITA EMILIA MARTINEZ, J. F. S. R. B. E S. **coleta das folhas**. 2003.
- HOAGLAND, D. R.; ARNON, D.I. The water culture method for growing plants without soil. Berkeley, Calif. Agric. Exp.Station, 32p. 1950.
- HSIAO, T. C. Plant Responses to Water Stress. **Annual Review of Plant Physiology**, v. 24, n. 1, p. 519-570, 1973.
- HUMBLE G, D ; HSIAO T. C. Light-dependent Influx and Efflux of Potassium of Guard Cells during Stomatal Opening and Closing. **Plant Physiology**. v 46, p, 483-487, 1970.
- KOLBERT, Z.; MOLNÁR, Á.; FEIGL, G.; VAN HOEWYK, D. Plant selenium toxicity: proteome in the crosshairs. **Journal of Plant Physiology**, Bethesda, v. 232, p. 291-300, 2019
- KORNDÖRFER, G.H.; ARANTES, V.A.; CORRÊA, G.F. & SNYDER, G.H. Efeito do silicato de cálcio no teor de silício no solo e na produção de grãos de arroz de sequeiro. R. Bras. Ci. Solo, 23:635-641, 1999.
- KORNDORFER, PEREIRA G.H.; SILVA H.S.; GAMA M.F.; MELO A.J.M., S.P.; CAMARGO M.S. **Avaliação de fontes de silício por meio de testes de incubação FERTBIO** - Rio de Janeiro, 2002.
- KRISHAN K. VERMA, PRATIKSHA SINGH, XIU-PENG SONG, MUKESH KUMAR MALVIYA, RAJESH KUMAR SINGH, GAN-LIN CHEN, SUSHIL SOLOMON, AND YANG-RUI LI. "Mitigating Climate Change for Sugarcane Improvement: Role of Silicon in Alleviating Abiotic Stresses" **Sugar tech** v. 22, p. 741-749, 2020.
- LIANG, Y. Effects of silicon on enzyme activity and sodium, potassium and calcium concentration in barley under salt stress. **Plant and Soil**, v. 209, p. 217-224, 1999.
- LIANG, Y. C., SUN, W., ZHU, Y. G. & CHRISTIE, P. Mechanisms of silicone mediated alleviation of abiotic stress in higher plants: a review. **Environmental Pollution**, 147, 422-428. 2007.
- LUO, H., HE, L., DU, B., PAN, S., MO, Z., DUAN, M., TIAN, H. Y TANG, X. Biofortification with chelating selenium in fragrantrice: Effects on photosynthetic rates, aroma, grain quality and yield formation. **Field Crops Research**. 2020.

LUZ, J. M. Q.; GUIMARÃES, S. T. M. R.; KORNDÖRFER, G. H. Hidroponic production of lettuce in hidroponic solution with or without silicon. *Horticultura Brasileira*, v. 24, p. 295-300, 2006.

MA, J.F.; MIYAKE, Y. & TAKAHASHI, E. Silicon as a beneficial element for crop plant. In: DATNOFF, L.E.; SNYDER, G.H. & KORNDÖRFER, G.H., eds. *Silicon in agriculture*. Amsterdam, Elsevier. p.17-39, 2001.

MA, J.F. & YAMAJI, N. Functions and transport of silicon in plants. *Cellular and Molecular Life Sciences.*, 65:3049-3057, 2008.

MEHRABANJOUBANI, A. A.; SADEGHIPOUR H. R.; AGHDASI, M. Silicon Affects Transcellular and Apoplastic Uptake of Some Nutrients in Plants, **Pedosphere**, 25(2), p. 192–201 2015

MALAVOLTA, E.; VITTI, G. C.; OLIVEIRA, S. A. **Avaliação do estado nutricional das plantas: Princípios e aplicações**. 2.ed. Piracicaba, Potafos, 319 p. 1997

MARTINEZ, H. E. P.; MENEZES, J. F. S.; SOUZA, R. B.; VENEGAS, V. H. A.; GUIMARÃES, P. T. G. Faixas críticas de concentrações de nutrientes e avaliação do estado nutricional de cafeeiros em quatro regiões de Minas Gerais. **Pesquisa Agropecuária Brasileira, Brasília**, v. 38, n. 6, p. 703-713, 2003.

MARTINATI, J. C., Aspectos bioquímicos em plantas de cafeeiro tratadas com silício. **Tese de Doutorado** defendido no Centro de Energia Nuclear na Agricultura da Universidade de São Paulo. Piracicaba. p, 113, 2008

MATEUS, N. S. Partial Substitution of K by Na Alleviates Drought Stress and Increases Water Use Efficiency in Eucalyptus Species Seedlings. Tese de mestrado Universidade de São Paulo. Piracicaba. p, 76. 2019

MATIELLO, J. B., SANTINATO, R., GARCIA, A. W. R., ALMEIDA, S. R., FERNANDES, D. R. Cultura de café no Brasil: novo manual de recomendações. 2. ed. Rio de Janeiro: MAPA/Procafé. Varginha: Fundação Procafé. 2005

MATIELLO ALMEIDA -Engs Agrs Fundação Procafé J Renato Dias Lucas Franco -Engs Agrs Fdas Sertãozinho, J. S. Cultivar de café arara, **CAMPEÃ DE QUALIDADE**. 1p. 2018.

MENEGALE M. L.; CASTRO G. S.; CUZATO MANCUSO M.A. Silício: interação com o sistema solo-planta. **Journal of Agronomic Sciences**, Umuarama, v.4, n. especial, p.435-454, 2015.

MENZIES, J. G.; EHRET, D. L.; GLASS, A D. M.; HELMER, T.; KOCH, C.; SEYWERD, F. The influence of silicon on cytological interactions between *Sphaerotheca fuligine* and *Cucumis sativus*. **Physiology Molecular Plant Pathology**, London, v. 39, n. 4, p. 403-414, 1991.

MOSTOFA, M.G.; HOSSAIN, M.A.; SIDDIQUI, M.N.; FUJITA, M.; TRAN, L-S.P. Phenotypical, physiological and biochemical analyses provide insight into selenium-induced phytotoxicity in rice plants. **Chemosphere**, Oxford, v. 178, p. 212-223, 2017.

MORA, M...L.; PINILLA, L.; ROSAS, A.; CARTES, P. Selenium uptake and its influence on the antioxidative system of white clover as affected by lime and phosphorus fertilization. **Plant and Soil**, The Hague, v. 303, p. 139-149, 2008.

NAKANO, Y; ASADA, K. Hydrogen peroxide scavenged by ascorbate specific peroxidase in spinach chloroplasts. **Plant and Cell Physiology**, v. 22, p. 867-880, 1981.

NIKOLIC, M.; NIKOLIC, N.; LIANG, Y.; KIRKBY, E.A. & RÖMHELD, V. Germanium-68 as an adequate tracer for silicon transport in plants. Characterization of silicon uptake in different crop species. **Plant Physiol.**, 143:495- 503, 2007.

NGUGI, MR.; et al. Leaf water relations water of Eucalyptus cloeziana and Eucalyptus argophloia in response to wáter déficit. **Tree Physiology**, Oxford, v.23, p.335-343, 2003.

NORMAN MORA. **Ministerio de Agricultura y Ganadería Dirección Regional Huetar Norte Agrocadena de Café**. 69p. 2018.

OLIVEIRA, A. D.; FERNANDES, E. J.; RODRIGUES, T. J. D. Condutância estomática como indicador de estresse hídrico em feijão, **Eng. Agríc.**, Jaboticabal, v.25, n.1, p.86-95,. 2005.

OLIVEIRA, R. L. Aplicação de silício na fisiologia, na produção e na mitigação de estresse causado pela deficiência de manganês em plantas de sorgo granífero. **Dissertação de mestrado**, Universidade Estadual Paulista. 2017

ONU- United Nations Organization. Efectos del cambio climático sobre la polinización y la producción agrícola en América tropical. vol.26. 2023.

PAVLOVIC, J., KOSTIC, L., BOSNIC, P., KIRKBY, E. A.; NIKOLIC, M. Interactions of silicon with essential and beneficial elements in plants. **Frontiers in Plant Science**, 12. 2021.

PELOSO, A. et al. Limitações fotossintéticas em folhas de cafeeiro arábica promovidas pelo déficit hídrico photosynthetic limitations in leaves of arabic coffee promoted by the water deficit **Coffee Science**. 2016.

PILON-SMITS, E.A.H.; QUINN, C.F.; TAPKEN, W.; MALAGOLI, M.; SCHIAVON, M. Physiological functions of beneficial elements. **Current Opinion in Plant Biology**, v.12, p. 267–274, 2009.

PILON-SMITS, E. A. et al. **Physiological functions of beneficial elements. Current Opinion in Plant Biology**, 2015.

POZZA, A. A. A. et al. Efeito do Silício no Controle da Cercosporiose em Três Variedades de Cafeeiro*. 5 p. 2004.

PRADO, R. DE M. *Benefits of Silicon in the Nutrition of Plants*. Springer, 2023.

RADY, M.M.; BELAL, H.E.E.; GADALLAH, F.M.; SEMIDA, W.M. Selenium application in two methods promotes drought tolerance in *Solanum lycopersicum* plant by inducing the antioxidant defense system. **Scientia Horticulturae**, Amsterdam, v. 266, 2020.

REIS, T.H.P.; GUIMARÃES, P.T.G.; FIGUEIREDO, F.C.; POZZA, A.A.A.; NOGUEIRA, F.D. & RODRIGUES, C.R. O silício na nutrição e defesa de plantas. Belo Horizonte, Epamig, (Boletim Técnico, 82), 120p. 2007

REIS, H. P. G. *et al.* Agronomic biofortification with selenium impacts storage proteins in grains of upland rice. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, v. 100, n. 5, p. 1990–1997, 2020

- RIVEIRO R V.; Silva L.; Ramos R A.; Andrade CA.; Bachiega FE.; Pereira S P. O alto teor de silício no solo inibe o crescimento radicular de cafeeiros sem afetar as trocas gasosas foliares. **Revista. Brasileira Ciência do Solo**. p, 10. 2011.
- RONCHI, C.P.; DaMATTA, F.M. Aspectos fisiológicos do Café Conilon. In: FERRÃO, R. G.; FONSECA, A.F.A.et al. (Ed.). Café Conilon. Vitória, ES: Incaper, p. 95-119. 2007.
- RODRIGUES, ANGÉLICA LINO. Efeito da reidratação nos aspectos ecofisiológicos da *Copaifera langsdorffii* Desf. 2013. 85 f. **Dissertação (mestrado)** - Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Instituto de Biociências de Botucatu, 2013. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/11449/108600>>.
- ROJO JIMÉNEZ, E. Café I (G. Coffea). Reduca (Biología). **Serie Botánica**, v. 7, n. 2, p. 113–132, 2014.
- SUSILUOTO S, BERNINGER F **Interactions between morphological and physiological drought responses in *Eucalyptus microtheca***. Pag.Silva Fenn 1;13 (2007)
- SILVA JUNIOR, E. C. *et al.* Natural variation of selenium in Brazil nuts and soils from the Amazon region. **Chemosphere**, v. 188, p. 650–658, 2017.
- SILVA, V.M.; BOLETA, E.H.M.; LANZA, M.G.D.B.; LAVRES, J.; MARTINS, J.T.; SANTOS, E.F.; SANTOS, F.L.M.; PUTTI, F.F.; FURLANI JUNIOR, E.; WHITE, P.J. BROADLEY M.R.; CARVALHO, H.W.P.; REIS, A.R. Physiological, biochemical, and ultrastructural characterization of selenium toxicity in cowpea plants. **Environmental and Experimental Botany**, Elmsford, v. 150, p. 172-182, 2018.
- SILVA, A.P.R.; BOAS, R. L. V.; FERNADES, D. M. Silício no solo e na planta: efeito de fontes e métodos de aplicação. **IV congresso internacional das ciencias agrarias** p. 14, 2020
- SONOBE, K.;HATTORI, T;AN,P. TSUJI, W.;ENEJI, AE. KOBAYASHI, S.KAWAMURA, Y,; TANAKA, K INAGA, S. **Efeet of silicon aplication on sorgum root respnses to wáter stress**. Jplant nutr. 34;71-82, 2011.
- SOUSA GF, SILVA MA, DE MORAIS EG, VAN OPBERGEN GAZ, VAN OPBERGEN GGAZ, DE OLIVEIRA RR, AMARAL D, BROWN P, CHALFUN-JUNIOR A AND GUILHERME LRG. Selenium enhances chilling stress tolerance in coffee species by modulating nutrient, carbohydrates, and amino acids content. **Frontiers in Plant Science**. p. 15, 2022.
- TAIZ, L.; ZEIGER, E. (Org.). *Fisiologia Vegetal*. 5ª edição, São Paulo: Artmed Editora Ltda, Grupo Educação,918 p, 2013.
- TAKAHASHI, H., & SCOTT, T. K. *Hydrotropism: the current status of our knowledge*. **Journal of Plant Growth Regulation**, 12(3), 197-205. 1993.
- TARDIEU, F. Plant tolerance to water deficit: physical limits and possibilities for progress. **Comptes Rendus Geoscience**, Paris, v. 337, n. 1-2, p. 57-67. 2005.
- THOMAZIELLO, R. A., FAZUOLI, L. C., PEZZOPANE, J. R. M., FAHL, J. I., CARELLI, M. L. C. Cafe arábica: cultura e técnicas de produção. Campinas: Instituto Agrônômico. 86p. 2000.
- VALLEJO B., L., Y ALVARADO OCHOA, S.P. **Rol del silicio en la fertilidad de los suelos y la nutrición vegetal**. Revista Rumipamba, 1-14p. 2011.

- VELIKOVA, V.; YORDANOV, I.; EDREVA, A. Oxidative stress and some antioxidant systems in acid rain-treated bean plants. **Plant Science - PLANT SCI**, 151, p. 59-66. 2000.
- WAN, Y., WANG, K., LIU, Z., YU, Y., WANG, Q., LI, H. Effect of selenium on the subcellular distribution of cadmium and oxidative stress induced by cadmium in rice (*Oryza sativa* L.). **Environmental Science and Pollution Research**, v. 26, p. 16220-16228, 2019.
- WAN, Y., WANG, K., LIU, Z., YU, Y., WANG, Q., LI, H. Effect of selenium on the subcellular distribution of cadmium and oxidative stress induced by cadmium in rice (*Oryza sativa* L.). **Environmental Science and Pollution Research**, v. 26, p. 16220-16228, 2019.
- WEATHERLEY, P.E. Studies in the water relations of the cotton plant. I. The field measurement of water deficits in leaves. **New Phytologist**, 49:81-87, 1950.
- WHITE, P.J. Selenium accumulation by plants. **Annals of Botany**, London, v. 117, p. 217–235, 2016.
- YAMAJI, N. & MA, J.F. Spatial distribution and temporal variation of the rice silicon transporter Lsi1. **Plant Physiol.**, 143:1306-1313, 2007
- YIN, C.; PANG, X.; CHEN, K. The effects of water, nutrient availability and their interaction on the growth, morphology and physiology of two poplar species. **Environmental and Experimental Botany**. Oxford, v 67, p. 196-203, 2009.
- XUE, T.; PIIRONEN, V.; HARTIKAINEN, H. Antioxidative and growth-promoting effect of selenium on senescing lettuce. **Plant and Soil**, The Hague, v. 237, p. 55-61, 2001.