

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA - UNESP  
CÂMPUS DE JABOTICABAL**

**SILÍCIO COMO ATENUANTE DOS EFEITOS DA  
SALINIDADE EM PLANTAS DE SOJA**

**Kolima Peña Calzada  
Engenheira Agrônoma**

**2021**

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA - UNESP  
CÂMPUS DE JABOTICABAL**

**SILÍCIO COMO ATENUANTE DOS EFEITOS DA  
SALINIDADE EM PLANTAS DE SOJA**

**Kolima Peña Calzada**

**Orientadora: Profa. Dra. Priscila Lupino Gratão**

**Coorientador: Prof. Dr. Renato de Melo Prado**

**Prof. Dr. Dilier Olivera Vicedo**

Tese apresentada à Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias – Unesp, Câmpus de Jaboticabal, como parte das exigências para a obtenção do título de Doutora em Agronomia, (Produção Vegetal).

**2021**

C171s	<p>Calzada, Kolima Peña</p> <p><b>SILÍCIO COMO ATENUANTE DOS EFEITOS DA SALINIDADE EM PLANTAS DE SOJA / Kolima Peña Calzada. --</b></p> <p>Jaboticabal, 2021</p> <p>84 p.</p> <p>Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista (Unesp), Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Jaboticabal</p> <p>Orientadora: PRISCILA LUPINO GRATÃO</p> <p>Coorientador: RENATO DE MELLO PRADO DILIER OLIVERA VICIEDO</p> <p>1. Agronomia. 2. Ciências agrícolas. I. Título.</p>
-------	--

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

Essa ficha não pode ser modificada.

**CERTIFICADO DE APROVAÇÃO**

TÍTULO DA TESE: SILÍCIO COMO ATENUANTE DOS EFEITOS DA SALINIDADE EM PLANTAS DE SOJA

**AUTORA: KOLIMA PEÑA CALZADA**

**ORIENTADORA: PRISCILA LUPINO GRATÃO**

**COORIENTADOR: RENATO DE MELLO PRADO**

**COORIENTADOR: DILIER OLIVERA VICIEDO**

Aprovada como parte das exigências para obtenção do Título de Doutora em AGRONOMIA (PRODUÇÃO VEGETAL), pela Comissão Examinadora:

Profa. Dra. PRISCILA LUPINO GRATÃO (Participação Virtual)   
Departamento de Biologia Aplicada à Agropecuária / FCAV / UNESP - Jaboticabal

Prof. Dr. FÁBIO LUIZ CHECCHIO MINGOTTE (Participação Virtual)   
Departamento de Ciências da Produção Agrícola / FCAV / UNESP - Jaboticabal

Prof. Dr. RAFAEL FERREIRA BARRETO (Participação Virtual)   
Universidade Federal de Mato Grosso do Sul/UFMS / Chapadão do Sul/MS

Profa. Dra. LUCIANA MARIA SARAN (Participação Virtual)   
Departamento de Tecnologia / FCAV / UNESP - Jaboticabal

Profa. Dra. MARISA DE CÁSSIA PICCOLO (Participação Virtual)   
Laboratório de Ciclagem de Nutrientes / CENA / USP - Piracicaba/SP

Jaboticabal, 03 de agosto de 2021

## **DADOS CURRICULARES DA AUTORA**

Kolima Peña Calzada, nasceu na cidade de Trinidad, Cuba em 23 de maio de 1980. Em setembro de 1998 ingressou na Universidade Central Marta Abreu das Villas, graduando-se em Engenharia Agrônômica em julho de 2003. Em 2004 começou como professora na universidade de Sancti Spíritus José Martí Pérez em Cuba. Em março de 2007 iniciou o curso de mestrado do Programa de Pós-Graduação Agricultura Sustentável na Universidade de Cienfuegos Carlos Rafael Rodríguez. Cuba, submetendo-se a defesa da dissertação em 2009. Em agosto de 2018 iniciou o curso de doutorado do Programa de Pós-Graduação em Produção Vegetal na Universidade Estadual Paulista – UNESP, Campus de Jaboticabal – SP, submetendo-se a defesa da tese em 3 de agosto de 2021. Até a data é autora e coautora de 39 artigos completos publicados em periódicos, e vários trabalhos completos e resumos expandidos publicados em anais de congressos. É revisora de três periódicos e foram outorgados 13 prêmios durante sua trajetória como professora. Foi orientadora de 25 trabalhos de conclusão de curso (TCC) e vários estudantes orientados por ela, foram premiados.

***“Destino não é questão de Sorte  
destino é questão de Escolha”***

**William Jennings Bryan**

## DEDICO

A minha mãe Mayra E. Calzada Arbolaez por sempre iluminar minha caminhada pela vida me dando carinho apoio e compreensão em cada momento que precisei, não deixando desistir mesmo diante das dificuldades encontradas ao longo de toda essa minha trajetória. Ela falou “vai filha vai para o Brasil, eu fico aqui com a sua família”. Obrigada mãe por estar presente sempre, pelo aprendizado da vida que deu para mim. Você lutou, mas não conseguiu vencer esta pandemia que chegou para tirar a felicidade das pessoas, mas eu sei mãe que está me olhando, me cuidando e sempre vai ser minha inspiração na vida.

A meu pai Norberto Peña Peña pelo carinho, apoio e todo o aprendizado de seu lado a vida toda. A meu esposo Juan Calos Rodríguez pela ajuda e compreensão para que eu pudesse chegar até aqui e pelo carinho de muitos anos. A meus filhos José Alberto Serafín Peña e Gabriela Rodríguez Peña que são o bem mais importante que eu posso ter na minha vida. A meu irmão Iván Peña pela ajuda para que eu chegasse até aqui, pela companhia nestes últimos meses que minha mãe não esteve, se não fosse pela força que ele me deu, tinha ficado pior ainda.

A meus amigos Dilier Olivera e Alexander Calero pelo carinho, apoio e ajuda em tudo o que eu precisei.

## **AGRADECIMENTOS**

A Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (Capes), pela bolsa concedida.

Ao programa de Pós-graduação em Agronomia (Produção Vegetal) da Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinária, ao qual faço parte, e ao Departamento de Biologia Aplicada a Agropecuária pela parte da infraestrutura disponibilizada.

A Unesp, câmpus de Jaboticabal, por ter me proporcionado a oportunidade de aperfeiçoar cada vez mais na minha carreira acadêmica.

A Profa. Dra. Priscila Lupino Gratão, pela orientação, pelo aprendizado durante todos esses anos e pela amizade.

A Prof. Dr. Renato de Melo Prado pela orientação, pelo aprendizado e ajuda desde planejamento até a finalização do experimento.

A Prof. Dr. Rouverson Pereira da Silva pela ajuda e a compressão.

A minha família em especial a meu esposo Juan Carlos Rodríguez e meus filhos José Alberto y Grabiela. A meus irmãos, primas e tios por sempre se fazerem presente em minha vida, por serem minha base e o meu alicerce.

A meu amigo Dilier Olivera pela ajuda para que eu pudesse chegar até aqui. Também pela ajuda nos experimentos e em tudo o que eu precisei desde que cheguei ao Brasil.

A meu amigo Alexander Calero pela ajuda nos experimentos e em tudo o que eu precisei, sempre disposto para me ajudar.

A Daymi Salas e seus filhos Diliercito e Melany pelo carinho.

A Nilda pela amizade, apoio e companhia em toda esta caminhada.

A meus amigos (as) Lucas, Mariana, Livia, Luis, Gabriela, Thiago, Solange, Cassia, João, Reginaldo, Clebson, Marcos, Bianca, Luis, Vinicius, Jonhatan, Vitor, pela amizade e por sempre se fazerem presentes tanto em momentos bons quanto não tão bons nessa minha trajetória.

A Técnica Sônia M. R. Carregari, por ter me acolhido e ter feito me sentir como membro de sua família, dedicando amor e carinho e por ter sido um grande apoio técnico durante todos esses anos de UNESP.

Aos colegas do laboratório de Fisiologia Vegetal e das disciplinas por todo esse tempo de convívio e divisão de conhecimentos.

A todos, mesmo que não estejam aqui citados que, direta ou indiretamente, colaboraram com este trabalho e com minha formação.

MUITO OBRIGADA

## SUMÁRIO

	Páginas
RESUMO	xi
ABSTRACT	xii
LISTA DE FIGURAS	xiii
LISTA DE ABREVIATURAS	xiv
1. INTRODUÇÃO	1
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	3
2.1 Salinidade do solo	3
2.2 Espécies reativas de oxigênio (ERO)	5
2.3 Mecanismos de defesa da planta ao estresse salino	6
2.4 Silício como atenuante do estresse salino	8
2.5 Soja: generalidades e importância	9
3. MATERIAL E MÉTODOS	10
3.1 Condições de cultivo e material vegetal	11
3.2 Delineamento experimental	11
3.3 Concentrações de NaCl e Si	12
3.4 Coleta e armazenamento do material	13
3.5 Parâmetros avaliados	13
3.5.1 Fotossíntese (F), transpiração (T) e condutância estomática (CE)	14
3.5.2 Eficiência quântica (Fv/Fm) e fotoquímica do fotossistema II (FV/F0)	14
3.5.3 Clorofila e carotenoides	14
3.5.4 Conteúdo relativo de água (CRA) e eficiência do uso da água (EUA)	15
3.5.5 Caracterização do estresse oxidativo	15
3.5.6 Extração e quantificação de proteínas solúveis totais	16
3.5.7 Atividade da superóxido dismutase (SOD, EC 1.15.1.1)	16
3.5.8 Atividade da glutationala peroxidase (GPOX, EC 1.11.1.9)	16

3.5.9 Atividade da ascorbato peroxidase (APX, EC 1.11.1.11)	17
3.5.10 Conteúdo de Prolina livre	17
3.5.11 Determinação dos teores e acúmulos de Si, Na e K	17
3.5.12 Determinação dos parâmetros de crescimento: massa seca e área foliar	18
3.6 Análise estatística	18
4. RESULTADOS	18
4.1 Fotossíntese (F), transpiração (T) e condutância estomática (CE)	18
4.2 Eficiência quântica (Fv/Fm) e fotoquímica (FV/F0) do fotossistema II	21
4.3 Clorofila e carotenoides	22
4.4 Conteúdo relativo de água (CRA) e eficiência do uso da água (EUA)	24
4.5 Caracterização do estresse oxidativo: conteúdo de malondialdeído (MDA)	26
4.6 Atividade antioxidante enzimática	28
4.7 Concentração de Prolina livre	30
4.8 Acúmulo de Si, Na <sup>+</sup> e K <sup>+</sup>	31
4.9 Parâmetros de crescimento: massa seca e área foliar	36
5. DISCUSSÃO	39
6. CONCLUSÃO	47
7. REFERÊNCIAS	47

## SILÍCIO COMO ATENUANTE DOS EFEITOS DA SALINIDADE EM PLANTAS DE SOJA

**RESUMO** - O cultivo da soja em diferentes regiões do mundo tem sido ampliado em solos salinos resultando em danos fisiológicos na planta que podem ser atenuados pelo silício (Si). Entretanto, as pesquisas são escassas para culturas consideradas acumuladoras intermediárias deste elemento benéfico. Assim, o presente trabalho teve como objetivo avaliar o efeito do Si sob diferentes formas de aplicação nas respostas fisiológicas e bioquímicas em plantas de soja cultivar M-Soy 8222, submetidas à salinidade. O delineamento experimental foi inteiramente casualizado, em esquema fatorial 4 x 3 com cinco repetições, sendo quatro formas de aplicação de silício (Si): controle (0 Si); 20 mmol L<sup>-1</sup> Si via pulverização foliar (F); 2,0 mmol L<sup>-1</sup> Si via radicular por solução nutritiva (R), a combinação das duas formas (F+R) combinados com três concentrações de NaCl (0, 50 e 100 mmol L<sup>-1</sup>). Os parâmetros trocas gasosas, fluorescência de clorofila, quantidade de pigmentos, conteúdo relativo da água, eficiência do uso da água, assim como conteúdo de malondialdeído (MDA), prolina, atividade antioxidante, acúmulos de Si, sódio (Na) e potássio (K) e crescimento, foram avaliados. A salinidade sem Si provocou danos fisiológicos e bioquímicos nas plantas de soja diminuindo a fotossíntese, o conteúdo e a eficiência do uso da água e conseqüentemente, o crescimento. Por outro lado, os resultados indicaram que o Si em todos os modos de aplicação desempenha papel na atenuação dos efeitos negativos do estresse salino através do aumento da fotossíntese redução da peroxidação lipídica, assim como, o aumento do conteúdo relativo de água, eficiência do uso da água, clorofila total e carotenoides, teor de prolina e atividade antioxidante, culminando com melhor crescimento das plantas. Assim, o tratamento com Si na forma radicular e combinada, pode ser uma estratégia de manejo eficiente para atenuar os efeitos deletérios do sal por aumentar a tolerância de plantas de soja sob condições de salinidade. Dentre os modos de aplicação, o uso de Si R e a aplicação de Si combinada (R+F) são as formas mais eficientes de manejo que podem ser usadas para aliviar os efeitos deletérios e aumentar a tolerância das plantas de soja em condições de estresse salino.

**Palavras chave:** aplicação exógena, atenuante, estresse abiótico, *Glicine max*,

## SILICON AS A MITIGANT OF THE EFFECTS OF SALINITY IN SOYBEAN PLANTS

**ABSTRACT** - Soybean cultivation in different regions of the world has been expanded in saline soils resulting in physiological damage to the plant that can be mitigated by silicon (Si). However, research is scarce for cultures considered intermediate accumulators of this beneficial element. Thus, the present work aimed to evaluate the effect of Si under different forms of application on physiological and biochemical responses in soybean plants, cultivar M-Soy 8222, submitted to salinity. The experimental design was completely randomized, in a 4 x 3 factorial scheme with five replications, with four forms of silicon application (Si): control (0 Si); 20 mmol L<sup>-1</sup> Si via foliar spray (F); 2.0 mmol L<sup>-1</sup> Si via root by nutrient solution (R), the combination of the two forms (F+R) combined with three concentrations of NaCl (0, 50 and 100 mmol L<sup>-1</sup>). Parameters gas exchange, chlorophyll fluorescence, amount of pigments, relative water content, water use efficiency, as well as malondialdehyde (MDA), proline, antioxidant activity, accumulations of Si, sodium (Na) and potassium (K) ) and growth were evaluated. Salinity without Si caused physiological and biochemical damage to soybean plants, decreasing photosynthesis, water content and efficiency of water use, and consequently, growth. On the other hand, the results indicated that Si in all modes of application plays a role in mitigating the negative effects of salt stress through increased photosynthesis, reduced lipid peroxidation, as well as increased relative water content, efficiency of use of water, total chlorophyll and carotenoids, proline content and antioxidant activity, culminating in better plant growth. Thus, treatment with Si in root and combined form can be an efficient management strategy to mitigate the deleterious effects of salt by increasing the tolerance of soybean plants under salinity conditions. Among the application modes, the use of Si R and the combined Si application (R+F) are the most efficient forms of management that can be used to alleviate the deleterious effects and increase the tolerance of soybean plants under stress conditions saline.

**Keywords:** exogenous application, attenuating, abiotic stress, Glicine max,

<b>LISTA DE FIGURAS</b>	<b>Páginas</b>
1. Dados de temperatura e umidade relativa do ar dentro da casa de vegetação durante o período experimental.	12
2. Fotossíntese (A), transpiração (B), condutância estomática (C) em plantas de soja cultivadas na ausência de Si (Si0) e com Si aplicado via raiz na solução nutritiva (SiR), foliar (SiF) e via raiz na solução nutritiva + foliar (SiR+SiF) sob estresse salino.	20
3. Eficiência quântica (Fv/Fm) (A) e fotoquímica (Fv/Fo) (B) do fotossistema II ( $\mu\text{mol elétrons m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ) em plantas de soja cultivadas na ausência de Si (Si0) e com Si aplicado via raiz na solução nutritiva (SiR), foliar (SiF) e via raiz na solução nutritiva + foliar (SiR+SiF) sob estresse salino.	22
4. Clorofila total (A) e carotenoides (B) nas folhas de plantas de soja cultivadas na ausência de Si (Si0) e com Si aplicado via raiz na solução nutritiva (SiR), foliar (SiF) e via raiz na solução nutritiva + foliar (SiR+SiF) sob estresse salino.	23
5. Conteúdo relativo de água (CRA) (A) e eficiência do uso da água (B) em plantas de soja cultivadas na ausência de Si (Si0) e com Si aplicado via raiz na solução nutritiva (SiR), foliar (SiF) e via raiz na solução nutritiva + foliar (SiR+SiF) sob estresse salino.	25
6. Conteúdo de malondialdeído (MDA) nas folhas (A) e raiz (B) em plantas de soja cultivadas na ausência de Si (Si0) e com Si aplicado via raiz na solução nutritiva (SiR), foliar (SiF) e via raiz na solução nutritiva + foliar (SiR+SiF) sob estresse salino.	27
7. Atividade específica da SOD (A), atividade específica da GPOX (B), atividade específica da APX (C) em plantas de soja cultivadas na ausência de Si (Si0) e com Si aplicado via raiz na solução nutritiva (SiR), foliar (SiF) e via raiz solução nutritiva + foliar (SiR+SiF) sob estresse salino.	29
8. Teor de prolina nas folhas (A) e na raiz (B) em plantas de soja cultivadas na ausência de Si (Si0) e com Si aplicado via raiz na solução nutritiva (SiR), foliar (SiF) e via raiz na solução nutritiva + foliar	31

- (SiR+SiF) sob estresse salino.
9. Acúmulo de Si na parte aérea (PA) e raiz (B) em plantas de soja cultivadas na ausência de Si (Si0) e com Si aplicado via raiz na solução nutritiva (SiR), foliar (SiF) e via raiz na solução nutritiva + foliar (SiR+SiF) sob estresse salino. 33
  10. Acúmulo de Na<sup>+</sup> parte aérea (A) e raiz (B) em plantas de soja cultivadas na ausência de Si (Si0) e com Si aplicado via raiz na solução nutritiva (SiR), foliar (SiF) e via raiz solução nutritiva + foliar (SiR+SiF) sob estresse salino. 34
  11. Acúmulo de K<sup>+</sup> parte aérea (A) e raiz (B) em plantas de soja cultivadas na ausência de Si (Si0) e com Si aplicado via raiz na solução nutritiva (SiR), foliar (SiF) e via raiz solução nutritiva + foliar (SiR+SiF) sob estresse salino. 35
  12. Massa seca das folhas (A), caule (B) e raiz (C) (g planta<sup>-1</sup>) em plantas de soja cultivadas na ausência de Si (Si0) e com Si aplicado via raiz na solução nutritiva (SiR), foliar (SiF) e via raiz solução nutritiva + foliar (SiR+SiF) sob estresse salino. 37
  13. Área foliar em plantas de soja cultivadas na ausência de Si (Si0) e com Si aplicado via raiz na solução nutritiva (SiR), foliar (SiF) e via raiz solução nutritiva + foliar (SiR+SiF) sob estresse salino. 39

**LISTA DE ABREVIATURAS**

1. APX – Ascorbato peroxidase omtem
2. CRA – Conteúdo relativo de água
3. CE – Condutância estomática
4. ERO – Espécies reativas de oxigênio
5. EDTA – Ácido etilenodiaminotetracético
6. EUA – Eficiência no uso da água
7. F – Fotossínteses
8. GPOX – Glutaciona peroxidase
9. H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> – Peróxido de hidrogênio
10. MDA – Malondialdeído
11. MF – Massa fresca
12. MT – Massa túrgida
13. MS – Massa seca
14. NBT – Cloreto de nitrotetrazólio azul
15. NADPH – Nicotinamida adenina dinucleotídeo fosfato reduzida
16. T – Transpiração
17. TCA – Ácido tricloroacético
18. TBA – Ácido tiobarbitúrico
19. TBARS – teor de substâncias reativas ao ácido MDA
20. PA – Parte aérea
21. pH – Potencial Hidrogeniônico
22. PVPP – Polivinilpirrolidona
23. TBA - Ácido tiobarbitúrico
24. PL– Prolina livre
25. SOD – Superóxido dismutase
26. SiF – Aplicação de silício foliar
27. SiR – Aplicação de silício radicular
28. SiF+R – Aplicação de silício foliar + radicular

## 1. INTRODUÇÃO

A segurança alimentar global depende da produção de alimentos e o aumento dos rendimentos dos cultivos é necessário para estabilizar sua produção e demanda (MAJEED; MUHAMMAD, 2019). A necessidade de melhorar a produção agrícola tem sido mais emergente nos últimos anos devido à expansão da população, que ultrapassará 9,7 bilhões em 2050 (MAJEED; MUHAMMAD, 2019). Simultaneamente ao aquecimento global, vários estresses reduzem a produtividade das safras agrícolas (SOLIMAN et al., 2018) com destaque à salinidade reconhecida como um dos principais fatores restritivos ao crescimento e à produtividade das culturas, principalmente em regiões áridas e semiáridas (ELKEILSH et al., 2019).

Nas regiões salinas, há pouca ocorrência de chuvas e deficiências naturais de drenagem, com redução anual próxima de 1 a 2 % das áreas adequadas para a agricultura (RASOOL et al., 2012), atingindo um terço das terras cultivadas do mundo (BHARGAVA; SRIVASTAVA, 2020). O estresse salino ocorre devido ao acúmulo de altos teores de sais no solo, comprometendo o crescimento, o desenvolvimento e a produção das plantas (ABDELAAL et al., 2019), devido às mudanças nas respostas fisiológicas e vias bioquímicas nas plantas (CALERO HURTADO et al., 2020) diminuindo a área foliar, a fotossíntese e a transpiração (AL MURAD; KHAN; MUNEEB, 2020).

Outro efeito importante é o aumento da produção das espécies reativas de oxigênio (ERO), devido à desestabilização da homeostase celular, causando danos às proteínas, DNA e lipídios (ALVES et al., 2018; ELHAMID; SADAK; TAWFIK, 2014; SHARMA et al., 2012b). A redução das ERO ocorre pela ação do sistema de defesa antioxidante composto por enzimas e compostos não enzimáticos que mantêm o status redox celular (ELHAMID; SADAK; TAWFIK, 2014; GRATÃO et al., 2015).

Os danos fisiológicos da salinidade nos cultivos variam com as espécies, sendo a cultura da soja considerada moderadamente tolerante à salinidade (BUSTINGORRI; LAVADO, 2011). Embora seja uma das três principais culturas mais importantes do mundo (BELLALLOUI et al., 2013; WAQAS et al., 2014), o

crescimento e a produtividade são adversamente afetados pelo estresse salino. Alguns estudos referentes ao mecanismo de tolerância à salinidade relatam vários genes-chave relacionados ao estresse salino na soja, embora esses relatos tenham melhorado a compreensão das respostas genéticas e fisiológicas da soja ao estresse salino, as estratégias de manejo destinadas a atenuar os efeitos do estresse salino na soja mostraram pouco sucesso, apesar de vários mecanismos relatados (KIM et al., 2015; LIU et al., 2016; SHU et al., 2017).

Neste contexto, a utilização exógena de substâncias que estimulem e/ou fortaleçam os sistemas de defesa se faz necessária, de modo a garantir não um aumento da produção, mas que dentro de certos parâmetros, as plantas consigam produzir satisfatoriamente se comparadas as demais sob condições de estresse abiótico (AHMAD et al., 2017; OLIVERA VICIEDO et al., 2017, 2020; VICIEDO et al., 2019).

Estudos recentes demonstraram que dentre estas substâncias, o silício (Si) exibe efeitos no crescimento e desenvolvimento das plantas, inigualáveis por qualquer outro elemento não essencial (FREW et al., 2018). As plantas diferem na capacidade de absorver o Si, que pode ser absorvido tanto de forma ativa, quanto passivamente, dependendo da sua concentração externa e da presença de transportadores. (LIANG et al., 2007). Plantas pertencentes às famílias Poaceae, Equisetaceae, Ciperaceae e as Gramineae, são acumuladoras porque apresentam teores de Si nas folhas acima de 3 % de sua massa seca (DESHMUKH; MA; BÉLANGER, 2017) O teor de Si é baixo em leguminosas, como a soja, uma vez que estas apresentam mecanismos de exclusão, sendo classificada como acumuladora intermediária de Si, 0,5 % – 1,5 % (KHAN et al., 2019).

O fornecimento do Si aumenta a absorção e conteúdo de água nas plantas, o teor de prolina (AHMAD et al., 2019a; CALERO HURTADO et al., 2019) e reduz a peroxidação lipídica, pela eliminação das ERO através da modulação do sistema antioxidante de resposta (COSKUN et al., 2019; ROBATJAZI; ROSHANDEL; HOOSHMAND, 2020). Além disso, o Si aumenta a taxa de transpiração da parte aérea e características morfológicas das raízes (YAN et al., 2020).

O fornecimento de Si pode ocorrer tanto via foliar quanto via solução nutritiva pela raiz, sendo que a primeira pode atenuar os efeitos adversos da salinidade relatados em plantas acumuladoras do Si, como o trigo (SATTAR et al., 2017, 2018)

e em não acumuladoras, como o quiabo (ABBAS et al., 2015a, 2017a). A segunda via tem sido a mais empregada para atenuação do estresse salino em plantas acumuladoras e não acumuladoras (ALSAEEDI et al., 2019; CALERO HURTADO et al., 2019; KHAN et al., 2018).

Dentre os atenuantes, o Si é um elemento que potencializa as respostas do vegetal ao estresse salino em plantas de soja pela redução da peroxidação lipídica e a produção de ERO (FARHANGI-ABRIZ; TORABIAN, 2018). Em sistema hidropônico, a aplicação deste elemento aumenta a biomassa seca e o conteúdo de clorofila (LEE et al., 2010). Além disso, a aplicação de Si foliar e radicular e em mistura com fertilizantes proporciona aumentos na fotossíntese líquida, na taxa de transpiração e condutância estomática em soja (TRIPATHI; NA; KIM, 2021).

Esses efeitos benéficos do Si são restritos ao fornecimento via radicular e foliar e ao  $(\text{Na}_2\text{SiO}_3)$ , sendo escassos os relatos da aplicação de Si na forma  $(\text{K}_2\text{SiO}_3)$  em soja, assim como os estudos da aplicação combinada entre as via radicular e foliar. O conhecimento da melhor estratégia de fornecimento de Si em ambiente salino que possa minimizar os aspectos fisiológicos e bioquímicos pode favorecer o crescimento de espécies quanto à habilidade na absorção de Si (CALERO HURTADO et al., 2019).

Neste sentido, hipotetizamos que o Si dependendo do modo de aplicação pode atenuar os danos causados pela salinidade devido à redução da peroxidação lipídica, aumento da fotossíntese, clorofilas totais e carotenoides, conteúdo relativo de água, eficiência do uso da água, assim como o aumento da atividade enzimática antioxidante e equilíbrio na distribuição do silício, sódio e potássio nas raízes e a parte aérea da planta de soja.

Diante do exposto, o objetivo deste trabalho foi avaliar a relação do Si em diferentes formas de aplicação nas respostas fisiológicas, bioquímicas e nutricionais em plantas de sojas sob estresse salino.

## **2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

### **2.1 Salinidade do solo**

A sustentabilidade da agricultura é desafiada principalmente por várias condições de estresse ambiental devido às mudanças climáticas globais (CASSIA et al., 2018). A salinidade do solo é um dos principais problemas que influenciam o desempenho do crescimento das plantas e a produtividade agrícola (MACHADO; SERRALHEIRO, 2017). A ocorrência de salinidade devido à irrigação com água salina (CHHABRA, 2017) afeta negativamente aproximadamente 20 % das terras aráveis (METTERNICHT; ZINCK, 2003), sendo que essa tendência aumentará em 50 % até meados do século XXI (KALANAKI et al., 2020).

De acordo com os relatos disponíveis, as culturas que crescem em solos afetados pelo sal estão sujeitas a estresse osmótico, más condições físicas do solo, distúrbios nutricionais, toxicidade e redução da produtividade. Limitar as perdas de safra devido ao estresse salino é uma grande área de preocupação para lidar com o contexto de necessidades crescentes de alimentos (ETESAMI; NOORI, 2019).

Um solo salino é geralmente definido como aquele em que a condutividade elétrica (CE) do extrato de saturação (CE<sub>e</sub>) na zona da raiz excede 4 dS m<sup>-1</sup> a 25 °C e tem sódio trocável de 15 %. O rendimento da maioria das plantas de cultivo é reduzido nesta CE e, embora muitas culturas exibam redução de rendimento em CE mais baixos (JAMIL et al., 2011). Estima-se que em todo o mundo 20 % do total cultivado e 33 % das terras agrícolas irrigadas são afetadas por alta salinidade. Além disso, as áreas salinizadas estão aumentando a uma taxa de 10 % ao ano por vários motivos, incluindo baixa precipitação, alta evaporação superficial, intemperismo de rochas nativas, irrigação com água salina e práticas culturais inadequadas. Estima-se que mais de 50 % das terras aráveis seriam salinizadas até o ano de 2050 (JAMIL et al., 2011). A salinidade é um dos fatores ambientais mais brutais que limitam a produtividade das plantas cultivadas e pode diminuir o rendimento em 50 % ou mais (SHRIVASTAVA; KUMAR, 2015).

O estresse salino limita a produtividade e o crescimento das plantas devido ao estresse osmótico, desequilíbrio nutricional e estresse oxidativo (LIANG et al., 2018). A salinidade leva ao acúmulo de íons sódio (Na<sup>+</sup>) e cloreto (Cl<sup>-</sup>) no citosol, o que é prejudicial à célula (TUTEJA, 2007). Um aumento na quantidade de Na<sup>+</sup> e Cl<sup>-</sup> interrompe a interação não covalente entre os aminoácidos (ZHU, 2002) e leva à

diminuição nas concentrações de cátions como potássio ( $K^+$ ) e cálcio ( $Ca^{2+}$ ) (ZHU, 2002).

## 2.2 Espécies reativas de oxigênio (ERO)

Durante o estresses abióticos (salinidade, seca, aumento e diminuição das temperaturas, presença de metais pesados, etc.), uma das respostas imediatas da planta é a produção excessiva de espécies reativas de oxigênio (ERO), como oxigênio singlete ( $^1O_2$ ), superóxido ( $O_2^-$ ), peróxido de hidrogênio ( $H_2O_2$ ) e hidroxila (OH), que causam danos graves nas células (KIM et al., 2017).

As ERO, são moléculas altamente reativas, capazes de causar danos oxidativos à proteínas, DNA e lipídios, são continuamente produzidas por meio do metabolismo (APEL; HIRT, 2004; MILLER et al., 2010). O cloroplasto é a principal fonte de ERO com a capacidade de produzir grandes quantidades de  $O_2^-$  e  $H_2O_2$ , especialmente durante a redução da taxa de fixação de carbono fotossintético (TAKAHASHI; MURATA, 2008). Em tecidos não fotossintéticos, as mitocôndrias são a maior fonte de ERO, mas sua contribuição é considerada pequena em comparação com os cloroplastos (NAVROT et al., 2007). A terceira fonte de ERO intracelular são os peroxissomos. Eles contêm várias oxidases que produzem  $H_2O_2$  como subprodutos das reações que catalisam. A glicolato oxidase fotorrespiratória está localizada nos peroxissomos e sua função é especialmente relevante durante estresses abióticos, que muitas vezes são acompanhados por fechamento estomático e a diminuição resultante nas trocas gasosas (JASPERS; KANGASJÄRVI, 2010).

As ERO além de serem espécies químicas tóxicas também atuam como importantes moléculas de sinalização que regulam muitos processos biológicos, como crescimento, desenvolvimento e respostas a estresses abióticos e bióticos (GAO et al., 2008). Como as ERO desempenham um papel duplo nas plantas, a síntese de ERO e as máquinas de eliminação de ERO são rigidamente reguladas para atingir níveis apropriados de ERO em diferentes estágios de desenvolvimento e em diferentes ambientes de cultivo (MILLER et al., 2010).

Em condições de estresse abiótico e biótico, os níveis de ERO nos tecidos vegetais podem ser drasticamente elevados. Em particular, o estresse salino causa níveis elevados de ERO, que desempenham um papel duplo nas respostas de salinidade das plantas: (1) as ERO agem como subprodutos tóxicos causando dano oxidativo; (2) as ERO agem como moléculas de sinalização mediando a tolerância ao sal (JIANG et al., 2013; MA; BRENNAN; DIAMOND, 2012).

### **2.3 Mecanismos de defesa da planta ao estresse salino**

O excesso de sais no solo pode afetar as plantas de duas maneiras. Inicialmente, a alta concentração de sais diminui o potencial hídrico do solo, reduzindo ou até mesmo impedindo a absorção de água pela planta, uma vez que se faz necessário um gradiente de potencial hídrico para que ocorra a absorção de água (MARQUES et al., 2011). Posteriormente, ocorre o estresse iônico causado pela toxicidade dos íons cloreto e sódio absorvidos pela planta (SILVA, 2009).

Em seguida, ocorre alteração na atividade enzimática, condutância estomática e distúrbio na permeabilidade da membrana, causada pela interferência dos sais nos processos fisiológicos, reduzindo o crescimento e o desenvolvimento do vegetal (VERSLUES et al., 2006). Altas concentrações de cloreto de sódio no solo interferem na capacidade das plantas em absorver água (MUNNS, 2002), diminuindo a taxa de expansão celular e o grau de abertura estomática. Com o fechamento estomático, as concentrações de  $\text{Na}^+$  e  $\text{Cl}^-$  elevam-se, tornando-se tóxicos à planta. Dessa forma, a maquinaria fotossintética é prejudicada, provocando alterações na taxa fotossintética líquida, concentração subestomática de  $\text{CO}_2$ , condutância estomática e transpiração (TAVAKKOLI et al., 2011).

Assim, entre os efeitos da salinidade sobre as plantas está a restrição na assimilação do  $\text{CO}_2$  e queda no teor de clorofila resultando, frequentemente, na diminuição do crescimento da planta (WILLADINO et al., 2011). A redução nos teores clorofila pode ser associada a uma maior aclimatação ao estresse salino, uma vez que há diminuição na captação de energia luminosa e, conseqüentemente, menor fluxo de elétrons da cadeia de transporte de elétrons. Isso ocorre, porque

uma cadeia de transporte de elétrons altamente diminuída favorece a redução parcial do oxigênio, resultando na formação de ERO e maior degradação de clorofila (JASPERS; KANGASJÄRVI, 2010).

A resposta das plantas ao estresse salino depende da concentração salina e do tipo de sal que o está causando (BOSE et al., 2015; GUPTA; HUANG, 2014). Uma das primeiras respostas ao estresse salino é a diminuição da taxa de expansão da superfície da folha, seguida pelo fechamento estomático e, portanto, uma depressão da fotossíntese e da transpiração (MENG; FRICKE, 2017; SHAHZAD et al., 2013). Um ajuste osmótico ajuda as plantas a reter água apesar da alta pressão osmótica externa e, assim, a aliviar o estresse osmótico. Isso é realizado por meio da síntese de osmólitos orgânicos e do acúmulo no citosol (ABBAS et al., 2015b; YIN et al., 2013b).

A ativação do sistema de defesa contra o dano oxidativo é uma parte fundamental da tolerância da planta a condições desfavoráveis. A geração de espécies reativas de oxigênio é limitada por um sistema antioxidante (ABBAS et al., 2015b; ZAVARIYAN; RAD; ASGHARI, 2015). A primeira linha de defesa de antioxidantes se caracteriza por uma neutralização rápida de moléculas que tenham potencial de se desenvolver como ERO ou com capacidade de induzir a produção de outras ERO, destacando-se três enzimas: a superóxido dismutase, catalase e a glutaciona peroxidase (GILL; TUTEJA, 2010; IGHODARO; AKINLOYE, 2018). A superóxido dismutase (SOD, EC 1.15.1.1) é responsável pela dismutação do superóxido à  $O_2$  e espécies menos reativas, como o peróxido de hidrogênio ( $H_2O_2$ ). O  $H_2O_2$  liberado pode ser reduzido à água pela catalase (CAT, EC 1.11.1.6) ou glutaciona peroxidase (GPOX, EC 1.11.1.9) (GRATÃO et al., 2005; HIPPLER et al., 2015; LIU et al., 2015b), a (APX EC 1.11.1.11) participa diretamente do ciclo ascorbato-glutaciona, onde o  $H_2O_2$  formado pela SOD é reduzido pelo ascorbato (ALVES et al., 2018).

Outro mecanismo para neutralizar o estresse salino é diminuir a toxicidade iônica, distribuindo íons dentro da célula ou reduzindo sua absorção (YIN et al., 2013b). Entre os nutrientes minerais, o  $K^+$  é muito dinâmico e um importante contribuinte para a regulação osmótica e outras funções metabólicas da planta (RIZWAN et al., 2012). O conteúdo de  $K^+$  nos tecidos vegetais diminui progressivamente com o aumento da salinidade. Portanto, manter um nível

adequado de  $K^+$  é essencial para a sobrevivência das plantas sob estresse salino (AHMAD, 2014). A capacidade da cultura em diminuir a absorção de  $Na^+$ , mantendo as concentrações de  $K^+$  no citoplasma nos níveis necessários para cumprir as funções desse elemento na planta, poderia contribuir para o aumento do crescimento das culturas (BOSE et al., 2015; ZHU; GONG, 2014).

#### 2.4 Silício como atenuante do estresse salino

O silício (Si) é o segundo elemento mais abundante no solo, onde sua disponibilidade para as plantas pode chegar a 10 % da massa seca total da planta. O acúmulo/transporte de Si ocorre na direção ascendente e foi identificado em várias plantas. A aplicação de Si tem sido conhecida por melhorar o crescimento e o desenvolvimento das plantas em condições normais e estressantes nas últimas duas décadas (KIM et al., 2017).

O Si geralmente existe como sílica ( $SiO_2$ ) em condições naturais. Também existe na forma de ácido silícico  $[Si(OH)_4]$  e silicato ( $xM^{1/2}OySiO_2$ ), dependendo do pH do solo (EPSTEIN, 1999). O  $[Si(OH)_4]$  é a única forma conhecida absorvida pelas plantas (MA; YAMAJI, 2008). Ele entra nas raízes das plantas principalmente por difusão através da via apoplástica, mas requer a presença de aquaporinas específicas, NIP2s, para entrar nas vias simplásticas e ser eventualmente translocado para órgãos aéreos através do xilema (GUERRIERO; HAUSMAN; LEGAY, 2016).

A aplicação exógena de Si induz tolerância ao estresse, regulando a geração de ERO, reduzindo o vazamento eletrolítico e os conteúdos de malondialdeído (MDA) e imobilizando e diminuindo a absorção de íons tóxicos como  $Na^+$ , sob condições estressantes. No entanto, a interação do Si e do sistema enzimático antioxidante vegetal permanece pouco compreendida (KIM et al., 2017).

De acordo com KIM et al. (2014b), a aplicação de Si em plantas de arroz sob salinidade diminuiu o conteúdo de MDA e aumentou a atividade dos antioxidantes enzimáticos e não enzimáticos. Por outro lado, (TORABI; MAJD; ENTESHARI, 2015) observaram que quando aplicaram Si na planta de borraja (*borago officianalis* L.)

sob estresse salino a atividade de SOD aumentou significativamente, mas a atividade de CAT e APX diminuíram. No entanto, (SHEKARI; ABBASI; MUSTAFAVI, 2017) encontraram que a atividade da CAT, APX, SOD e POD foram maiores sob a aplicação de Si com NaCl em plantas de *Anethum graveolens*. O mesmo padrão de atividade SOD, GPX, APX, GR e CAT foi observado nas plantas de cevada e pepino com aplicação de Si sob salinidade (LIANG et al., 2003; ZHU et al., 2004a).

Por outro lado, aplicação de Si pode estar relacionada a tolerância ao sal por meio da melhoria das tensões osmóticas e iônicas em *Sorghum bicolor* (YIN et al., 2013b). Em sorgo e girassol, este elemento atenuou os efeitos da salinidade, aumentou o acúmulo de K e diminuiu o acúmulo de Na<sup>+</sup> nos órgãos e a peroxidação lipídica. Além disso, foram observados aumentos no teor relativo de água na folha, atividades de enzimas antioxidantes, área foliar e massa seca da parte aérea nas culturas (CALERO HURTADO et al., 2020).

Em cana de açúcar (*Saccharum officinarum* L.) sob estresse salino o Si diminui a absorção de Na<sup>+</sup> pelas raízes e sua translocação para os brotos (ASHRAF et al., 2010) além de melhorar o rendimento e a qualidade do suco. Em Canola (*Brassica napus* L.). O Si provocou um maior crescimento, conteúdo reduzido de lignina, menor conteúdo de peroxidação lipídica, menor acúmulo de Na<sup>+</sup>, maior conteúdo de clorofila e atividade de enzimas antioxidantes (HASHEMI; ABDOLZADEH; SADEGHIPOUR, 2010). Outros autores encontraram que o Si em Sorgo (*Sorghum bicolor* L.) alivia o estresse osmótico induzido pelo sal, mantém uma alta taxa de fotossíntese líquida e reduz o teor de prolina (YIN et al., 2013a).

Em soja sob cultivo hidropônico, o Si melhorou os atributos de crescimento da planta, ou seja, altura da planta, biomassa fresca e seca da planta, temperatura foliar e conteúdo de clorofila (LEE et al., 2010; CHUNG et al., 2020). Além disso, a aplicação de Si diminui os genes associados com as ERO e espécies reativas de nitrogênio (ERN) e aumentou os antioxidantes enzimáticos e não enzimáticos das plantas tratadas. Por outro lado, o uso de diferentes concentrações de nano-silício melhoraram os efeitos do estresse salino sobre as atividades antioxidantes e o crescimento em mudas de soja (FARHANGI-ABRIZ; TORABIAN, 2018).

## **2.5 Soja: generalidades e importância**

A soja [*Glycine max* (L.) Merrill] cultivada comercialmente hoje é uma planta herbácea, com o mecanismo de fixação de carbono do tipo C3, incluída na classe Dicotyledoneae, ordem *Rosales*, Família *Leguminosae*, subfamília das *papilionoideae*, gênero *Glycine* L. É uma planta com grande variabilidade genética, tanto no ciclo vegetativo (período compreendido da emergência da plântula até a abertura das flores), como no reprodutivo (período do início da floração até o fim do ciclo da cultura), sendo também influenciada pelo meio ambiente (GOMES, 1990; BORÉM, 2005).

A soja é uma das principais culturas oleaginosas do mundo (BELLALLOUI et al., 2013; WAQAS et al., 2014). Com uma área plantada no mundo de 127,842 milhões de hectares e produção de 362,947 milhões de toneladas na safra 2020/2021 (RUAS; SALVADOR; AMAZONAS, 2020). A soja é de grande importância para a agricultura brasileira, sendo a principal cultura do agronegócio no país. De fato, o Brasil destaca-se como um dos maiores produtores, sendo responsável pela produção de 135,409 milhões de toneladas em uma área de 38 502 milhões de hectares, resultando em uma média de produtividade de 3,517 kg/ha (RUAS; SALVADOR; AMAZONAS, 2020). O cultivo de soja é a principal atividade responsável pela expansão da fronteira agrícola no país, principalmente, em regiões de cerrado no nordeste brasileiro, que possui a maior concentração de solos salinos e baixos índices pluviométricos (PETTER et al., 2014).

A cultivar M-SOY 8222 é de ciclo rápido (108 a 110 dias), indicada para o plantio antecipado na região Norte do Mato Grosso, o que permite o cultivo de milho safrinha. É considerada tolerante ao Nematóide de Galha. Teve sua origem genética produzida na unidade da Monsanto em Morrinhos (GO), mas foi em Sorriso (MT) que teve suas pesquisas finalizadas. É um produto de alto desempenho agrônômico e alta produtividade, que pode ser semeado pelos produtores do Mato Grosso e possibilita o cultivo de milho safrinha na sequência, em razão de sua precocidade” (VIEIRA et al., 2018).

### **3. MATERIAL E MÉTODOS**

### 3.1 Condições de cultivo e material vegetal

O experimento foi desenvolvido em casa de vegetação no Departamento de Biologia Aplicada à Agropecuária da Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias (FCAV)– câmpus de Jaboticabal-SP. No presente trabalho, a cultivar de soja [*Glycine max* (L.) Merr], M-Soy 8222, foi utilizada. Este cultivar é de ciclo rápido é um produto de alto desempenho agrônômico e alta produtividade, mas é pouco cultivado na região do nordeste pela salinidade dos solos (VIEIRA et al., 2018). As sementes foram semeadas em vaso plástico (diâmetro inferior: 12 cm; diâmetro superior; 24 cm e altura; 35 cm) contendo 5 dm<sup>3</sup> de areia de textura média. Os vasos tiveram o fundo perfurado e foram colocados sobre recipientes coletores da solução nutritiva. Foram cultivadas duas plantas por vaso. A areia foi lavada com água corrente e em seguida com água deionizada e solução de ácido clorídrico ao 1 % e água deionizada novamente (EMBRAPA, 2018).

Após a emergência, a solução nutritiva de Hoagland e Arnon (1950) foi aplicada. A concentração iônica da solução nutritiva foi incrementada seguindo o desenvolvimento fenológico da cultura, iniciando-se com 10 % seis dias após a emergência, utilizando-se concentração de 75 % até final do experimento. O valor pH das soluções foi ajustado para  $5,7 \pm 0,2$ , com solução de HCl ou NaOH 1,0 mol L<sup>-1</sup>.

### 3.2 Delineamento experimental

Foi utilizado o delineamento inteiramente casualizado em esquema fatorial 4 x 3 com cinco réplicas, sendo 12 tratamentos: controle sem Si (0); pulverização F (20 mmol L<sup>-1</sup>), aplicação R com solução nutritiva (2,0 mmol L<sup>-1</sup>) e a associação F+R; combinados com dois concentrações de NaCl (50 e 100 mmol L<sup>-1</sup>) e com a ausência de NaCl. Os dados meteorológicos foram coletados durante o período experimental (Figura 1AB). A temperatura e umidade relativa do ar no momento da pulverização foi em média de 22,9 °C e 82,3 % respectivamente.

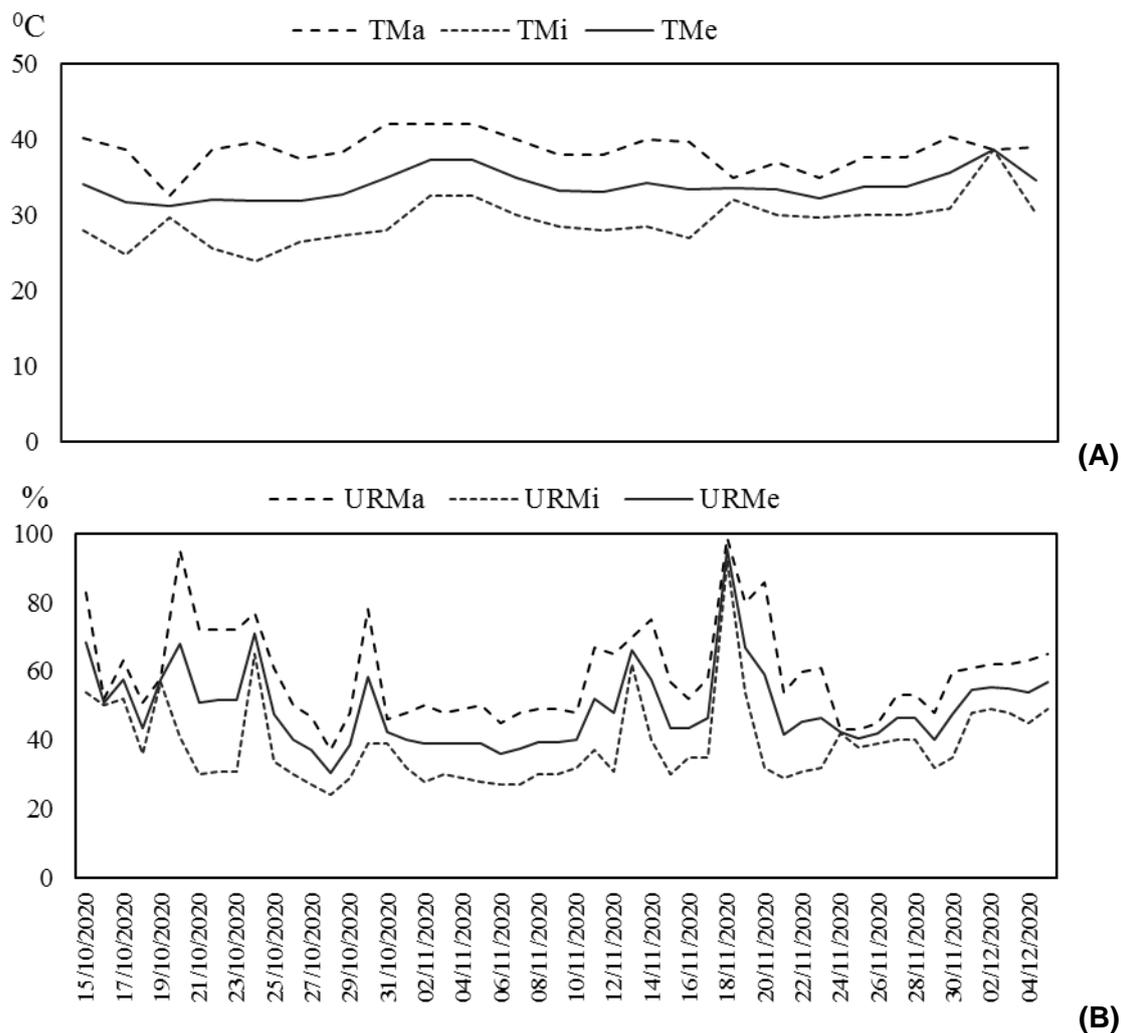


Figura 1. Dados de temperatura, (A) temperatura (°C). TMa: temperatura máxima, TMi: temperatura mínima, TMe: temperatura média. (B) Umidade relativa (%) URMa: umidade relativa máxima, URMi: umidade relativa mínima, URMe: umidade relativa média dentro da casa de vegetação durante o período experimental.

### 3.3 Concentrações de NaCl e Si

As plantas de soja foram submetidas ao estresse salino na fase V3 até V5, com uma condutividade elétrica aproximada de 5 e 10 dS m<sup>-1</sup> causado pela adição de NaCl via solução nutritiva e mantida até final do experimento. Neste mesmo período, a pulverização foliar foi realizada com calda tendo 20 mmol L<sup>-1</sup> de Si com valor pH

ajustado para  $6,5 \pm 0,1$  nos estádios fenológicos V3, V4, V5. A areia foi coberta com papel toalha e foi usado um aspersor manual de 500 ml de capacidade. O fornecimento do Si via solução nutritiva ( $2,0 \text{ mmol L}^{-1}$ ) foi realizado em todo período experimental. A fonte de Si utilizada para compor a solução nutritiva e a aplicação foliar foi o silicato de potássio ( $128 \text{ g L}^{-1}$  de Si;  $126,5 \text{ g L}^{-1}$  de  $\text{K}_2\text{O}$ ). As fontes solúveis de Si mais comuns são o silicato de sódio e o silicato de potássio. Utilizamos o silicato de potássio para que não houvesse interferência no Na em relação aos tratamentos com salinidade, sendo o potássio equilibrado entre os tratamentos com KCl.

### **3.4 Coleta e armazenamento do material**

A coleta das plantas ocorreu após 15 dias do início do estresse salino, correspondendo a 50 dias após emergência a partir da diferença visual entre os tratamentos. As plantas segmentadas em seus órgãos foram utilizadas para análises bioquímicas, parâmetros biométricos e determinações dos teores e acúmulos de Si,  $\text{Na}^+$  e  $\text{K}^+$ .

As plantas destinadas aos parâmetros biométricos foram lavadas para a retirada de qualquer resíduo. Foi usada a solução detergente ao 0,2 %, solução de ácido clorídrico 0,1 % e água deionizada (PRADO, 2021). As plantas foram divididas em raízes, folhas e caules, e posteriormente colocadas separadamente em sacos de papel conduzidos à estufa de ventilação forçada à temperatura constante de  $65 \text{ }^\circ\text{C}$ , até atingir massa constante. As amostras frescas de raízes e folhas (excluindo pecíolos) foram coletadas, imediatamente imersas em  $\text{N}_2$  líquido e armazenadas a  $-80^\circ\text{C}$  para as análises bioquímicas de peroxidação lipídica, prolina e atividade antioxidante.

### **3.5 Parâmetros avaliados**

### **3.5.1 Fotossíntese (F), condutância estomática (CE), transpiração**

As avaliações da fotossíntese (F), condutância estomática (CE), transpiração (T) ocorreram após 13 dias do início do estresse salino e foram realizadas com analisador portátil de gás infravermelho (IRGA), modelo SD-ADC biotecnológica LCpro (Sistema Serial No.33726) usando fonte de luz LED (azul e vermelho) com intensidade de luz  $2,000 \text{ mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$  na terceira folha completamente desenvolvida de cima para embaixo. A temperatura da câmara foi mantida entre 26 e 27 °C. Foi usada concentração de  $\text{CO}_2$  atmosférico e as medidas foram realizadas entre 09:30 - 11:30 am.

### **3.5.2 Eficiência quântica (Fv/Fm) e fotoquímica do fotossistema II (Fv/Fo)**

As medidas da eficiência quântica do fotossistema II (PSII) ocorreram após 14 dias do início do estresse salino e foram realizadas na primeira folha completamente desenvolvida utilizando um fluorômetro portátil (Opti Sciences, Os30P). As folhas ficaram no escuro com os cliques, 30 min antes da avaliação (LICHTENTHALER; BUSCHMANN; KNAPP, 2005).

### **3.5.3 Clorofila e carotenoides**

Amostras de 0,25 a 0,30 g da terceira folha bem desenvolvida foram coletadas e colocadas imediatamente em tubos de 2 mL com acetona 80 % e mantido por 72 horas protegidos da luz. Posteriormente, as leituras foram realizadas em espectrofotômetro em cubeta de quartzo em 470 nm para carotenoides, 645 nm e 662 nm para as clorofilas a e b, respectivamente (LICHTENTHALER, 1987).

### 3.5.4 Conteúdo relativo de água (CRA) e eficiência do uso da água (EUA)

O conteúdo relativo de água (CRA) foi determinado pelo método descrito por (BARRS; WEATHERLEY, 1962), com algumas modificações. Vinte discos foliares de 10 mm de diâmetro foram retirados de cada planta, utilizando-se para isso, um vazador de aço-inoxidável. A massa fresca (MF) dos discos foi obtida em balança analítica. Para a obtenção da massa túrgida (MT), os discos foram transferidos para uma placa de petri contendo 35 mL de água destilada e deixados à temperatura ambiente (25 °C) por 12 horas, e em constante iluminação (densidade do fluxo de radiação fotossinteticamente ativa de aproximadamente  $40 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ). Após esse período, os discos foliares foram removidos da placa de petri e colocados em folhas de papel de filtro para retirar o excesso de água. Imediatamente os discos foram pesados, e a MT foi determinada. Para a determinação da massa seca (MS) os discos foram colocados em sacos de papel e levados à estufa de ventilação forçada de ar à  $65 \pm 5$  °C, por 24h. Os resultados foram expressos em porcentagem, conforme fórmula abaixo (CRA). A eficiência do uso da água foi determinada pela da relação entre a fotossínteses e a transpiração (F/T).

$$\text{CRA (\%)} = (\text{MF} - \text{MS}) / (\text{MT} - \text{MS}) \times 100$$

### 3.5.5 Caracterização do estresse oxidativo

A caracterização do estresse oxidativo foi realizada pela análise da peroxidação lipídica a partir da quantificação do conteúdo de substâncias reativas ao ácido tiobarbitúrico (TBA), dentre as quais se destaca o malondialdeído (MDA). O teor de substâncias reativas ao ácido (TBARS) foi quantificado como produto final do processo de peroxidação de lipídios, com leituras a 535 e 600 nm. O teor de MDA foi calculado conforme a equação específica para a reação (MIHARA; UCHIYAMA; FUKUZAWA, 1980).

### **3.5.6 Extração e quantificação de proteínas solúveis totais**

As amostras de material vegetal fresco foram maceradas em N<sub>2</sub> líquido e homogeneizadas em tampão fosfato de potássio 100 mmol (pH 7,5) contendo 1 mmol L<sup>-1</sup> EDTA, 3 mmol L<sup>-1</sup> DTT e 4 % PVPP. A mistura foi centrifugada a 10.000 g por 30 min a 4°C. O sobrenadante foi dividido em alíquotas e mantidas a -80°C para serem utilizadas nos ensaios enzimáticos (NETO et al., 2005). A quantificação de proteína total foi realizada utilizando-se albumina sérica bovina (BRADFORD, 1976).

### **3.5.7 Atividade da superóxido dismutase (SOD, EC 1.15.1.1)**

A atividade da SOD foi determinada espectrofotometricamente pelo método do cloreto de nitrotetrazólio azul (GIANNOPOLITIS; RIES, 1977). O meio de ensaio continha 50 mmol de tampão fosfato de potássio (pH 7,8), 50 mmol de metionina, 10 mmol de ácido etilenodiaminotetracético (EDTA), 1 mmol de cloreto de nitrotetrazólio azul (NBT) e 0,1 mmol de riboflavina e extrato vegetal. Uma unidade de atividade enzimática foi definida como a quantidade de enzima necessária para inibir fotoquimicamente a redução de NBT em 50 % a 560 nm. A atividade da SOD é expressa como U SOD mg<sup>-1</sup> de proteína.

### **3.5.8 Atividade da glutatona peroxidase (GPOX, EC 1.11.1.9)**

A atividade de GPOX foi determinada adicionando o extrato vegetal a um meio reacional consistindo de 100 mmol de tampão fosfato de potássio (pH 7,0), 3 mmol de EDTA, 0,24 U GR/mL, 10 mmol de GSH, e 1 mmol de azida sódica. Esta mistura foi incubada a 37°C durante 10 min. A reação foi catalisada pela adição de 1,5 mmol de NADPH e 1,5 mmol H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>. A oxidação de NADPH foi monitorada durante 5 minutos a 340 nm. A atividade enzimática foi calculada utilizando o

coeficiente de extinção molar de  $6,22 \text{ mmol}^{-1} \text{ cm}^{-1}$  (ANDERSON; DAVIS, 2004), e os resultados foram expressos em  $\mu\text{mol min}^{-1} \text{ mg}^{-1}$  de proteína.

### **3.5.9 Atividade da ascorbato peroxidase (APX, EC 1.11.1.11)**

A atividade da ascorbato peroxidase (APX) foi determinada em um meio reacional constituído por 50 mmol de tampão fosfato de potássio contendo 0,1 mmol de  $\text{H}_2\text{O}_2$ , 0,5 mmol de ascorbato e 25  $\mu\text{L}$  de extrato enzimático em um volume final de 2 mL. A atividade da APX foi monitorada pela taxa de oxidação do ascorbato a 290 nm a  $28^\circ\text{C}$  (NAKANO; ASADA, 1981).

### **3.5.10 Conteúdo de Prolina livre**

Os teores de prolina foram determinados pela adaptação do método de (BATES; WALDREN; TEARE, 1973). Amostras de folhas foram homogeneizadas em ácido sulfossalicílico a 3 %. A mistura foi filtrada, misturada com 1 mL de ácido ninidrina e ácido acético glacial e foi mantida por 1 h em água fervente. À mistura foi adicionado tolueno (4 mL) e a absorbância medida em 520 nm e calculada como mmol g massa fresca.

### **3.5.11 Determinação dos teores e acúmulos de Si, Na, K**

Para a determinação do teor de Si foi realizada a digestão úmida, pela adição de peróxido de hidrogênio ( $\text{H}_2\text{O}_2$ ) e hidróxido de sódio (NaOH), com a reação induzida em autoclave a  $123^\circ\text{C}$ . A leitura do teor de silício foi realizada em espectrofotômetro a 410 nm, pelo método de colorimetria com ácido clorídrico, ácido oxálico e molibdato de amônio (KRASKA; BREITENBECK, 2010). Foi realizada a

avaliação dos teores de  $\text{Na}^+$  e  $\text{K}^+$  da parte aérea das culturas, conforme metodologia descrita por (BATAGLIA et al., 1978).

### **3.5.12 Determinação dos parâmetros de crescimento: massa seca e área foliar**

Após a coleta foi determinada a massa seca dos órgãos como aparece descrito no item 3.4. A área foliar foi quantificada eletronicamente no equipamento LICOR 3100.

## **3.6 Análise estatística**

Aplicou-se a análise fatorial para testar os efeitos dos quatro níveis de aplicação de Si, das três concentrações de NaCl e suas interações (Si x NaCl). Os dados obtidos foram analisados assumindo a normalidade e a homogeneidade da variância com os testes de Shapiro-Wilk e Levene, respectivamente. Uma vez verificados esses pressupostos, os dados foram submetidos à análise de variância de duas vias com base no nível de significância no teste F ( $p < 0,05$ ). As médias foram comparadas pelo teste de t de Student (LSD) ( $p < 0,05$ ). Todas as análises foram realizadas aplicando-se o software estatístico Agroestat (BARBOSA; MALDONADO, 2015)

## **4. RESULTADOS**

### **4.1 Fotossíntese, transpiração e condutância estomática**

Para a fotossíntese, o efeito da interação do NaCl e Si dentre e entre as concentrações de NaCl foi observado (Figura 2A). Na ausência de Si, as plantas apresentaram redução da fotossíntese nas três concentrações de salinidade. Quando o Si foi aplicado, independentemente da forma de aplicação, houve diminuição da fotossíntese líquida proporcional as concentrações de NaCl, mas com o Si, essa diminuição foi menos acentuada e o Si beneficiou as plantas na condição sem NaCl.

Além disso, diferentes respostas foram observadas em função da forma de aplicação do Si e concentrações de NaCl. Plantas controle (na ausência de NaCl), apresentaram maior fotossíntese líquida com diferenças independente da forma de aplicação de Si, com incremento médio de 14 % em relação às plantas sem aplicação de Si. As melhores respostas ocorreram com a combinação dos métodos de aplicação foliar e radicular em plantas submetidas a 50 mmol L<sup>-1</sup> de NaCl. Por outro lado, plantas submetidas a maior concentração de NaCl 100 mmol L<sup>-1</sup> e com a combinação de ambas as aplicações (F+R) e aplicação radicular (R) de Si, mostraram-se mais eficientes, quando comparadas as plantas sem silício e com aplicação foliar (F) (Figura 2A).

O efeito da interação entre os fatores Si e NaCl também foi observado para a transpiração (Figura 2B). Tanto na ausência, quanto na presença de NaCl (0; 50 e 100 mmol L<sup>-1</sup>), as diferentes formas de aplicação de Si aumentaram a taxa transpiratória nas plantas. A transpiração foi reduzida nas plantas proporcionalmente as concentrações de NaCl, independentemente das formas de aplicação do Si.

Para os valores da condutância estomática (CE) houve interação entre os fatores Si e NaCl (Figura 2C). A CE foi menor nas plantas proporcionalmente ao aumento das concentrações de NaCl, independentemente das formas de aplicação de Si. Nas concentrações de 0 e 50 mmol L<sup>-1</sup> NaCl as melhores respostas foram alcançadas nas plantas que receberam o tratamento combinado, Si F+R. E na concentração (100 mmol L<sup>-1</sup> NaCl) a maior resposta foi de Si R e Si R+F.

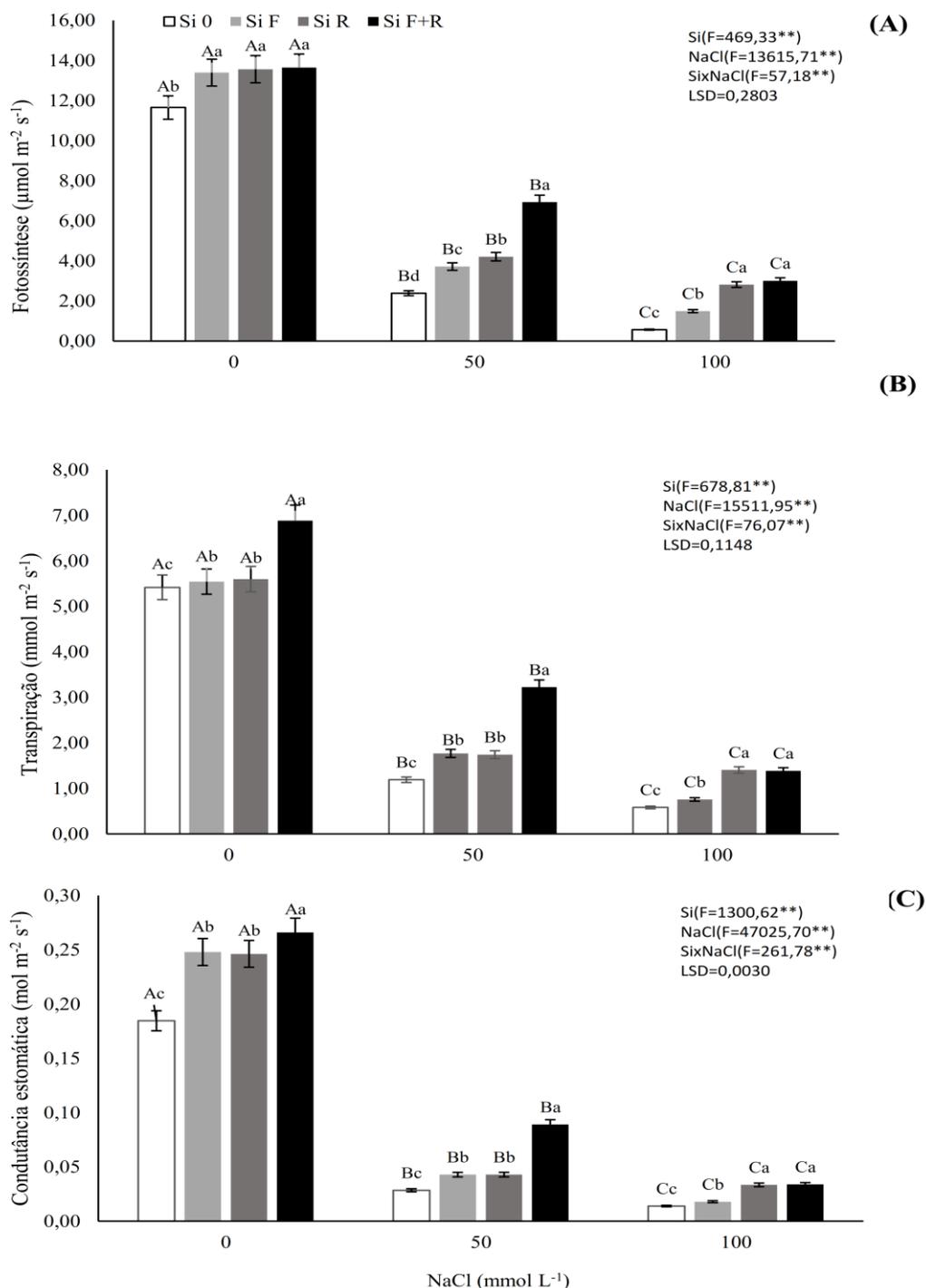


Figura 2: Fotossíntese (A), transpiração (B), condutância estomática (C) em plantas de soja cultivadas na ausência de Si (Si0) e com Si aplicado via raiz na solução nutritiva (SiR), foliar (SiF) e via raiz na solução nutritiva + foliar (SiR+SiF) sob estresse salino. Letras maiúsculas diferentes indicam diferenças significativas na forma de aplicação entre as diferentes concentrações de NaCl e letras minúsculas indicam diferenças significativas entre as formas de aplicação de Si dentro de cada

concentração de NaCl, de acordo com o teste de T de Student ( $p < 0,05$ ) \* ( $p < 0,01$ )

\*\* .

#### 4.2 Eficiência quântica ( $F_v/F_m$ ) e fotoquímica ( $F_v/F_0$ ) do fotossistema II

A aplicação do Si independente da condição de estresse (50 ou 100 mmol L<sup>-1</sup> de NaCl) proporcionou aumentos da eficiência quântica e fotossintética, respectivamente (Figuras 3AB). As plantas de soja sob estresse salino apresentaram diminuição da eficiência quântica do FII (Figura 3A). Foi observado efeito da interação do Si e NaCl, houve redução da eficiência quântica proporcionalmente ao aumento das concentrações de NaCl, independentemente da forma de aplicação do Si.

Na ausência do NaCl, a maior resposta da eficiência quântica foi das plantas com Si, independentemente da forma de aplicação. Plantas submetidas à concentração de 50 mmol L<sup>-1</sup> de NaCl não apresentaram diferenças significativas com a aplicação de Si (R) e Si (F+R). A mesma tendência foi observada nas plantas submetidas à concentração de 100 mmol L<sup>-1</sup> NaCl, e aplicações de Si de forma combinada e radicular (Figura 3A).

Os resultados indicam interação entre os fatores Si e NaCl, com incremento médio na eficiência fotoquímica do fotossistema II de 21 %, em relação ao tratamento sem Si (Figura 3 B). Entretanto, sob estresse salino, a aplicação combinada de Si R e Si F+R resultou em maior eficiência fotossintética, quando comparado à condição controle (sem aplicação de Si). Os valores comparados as plantas sem Si correspondem a 14 e 13 % para 50 mmol L<sup>-1</sup> NaCl e 25 e 21 % para 100 mmol L<sup>-1</sup> NaCl.

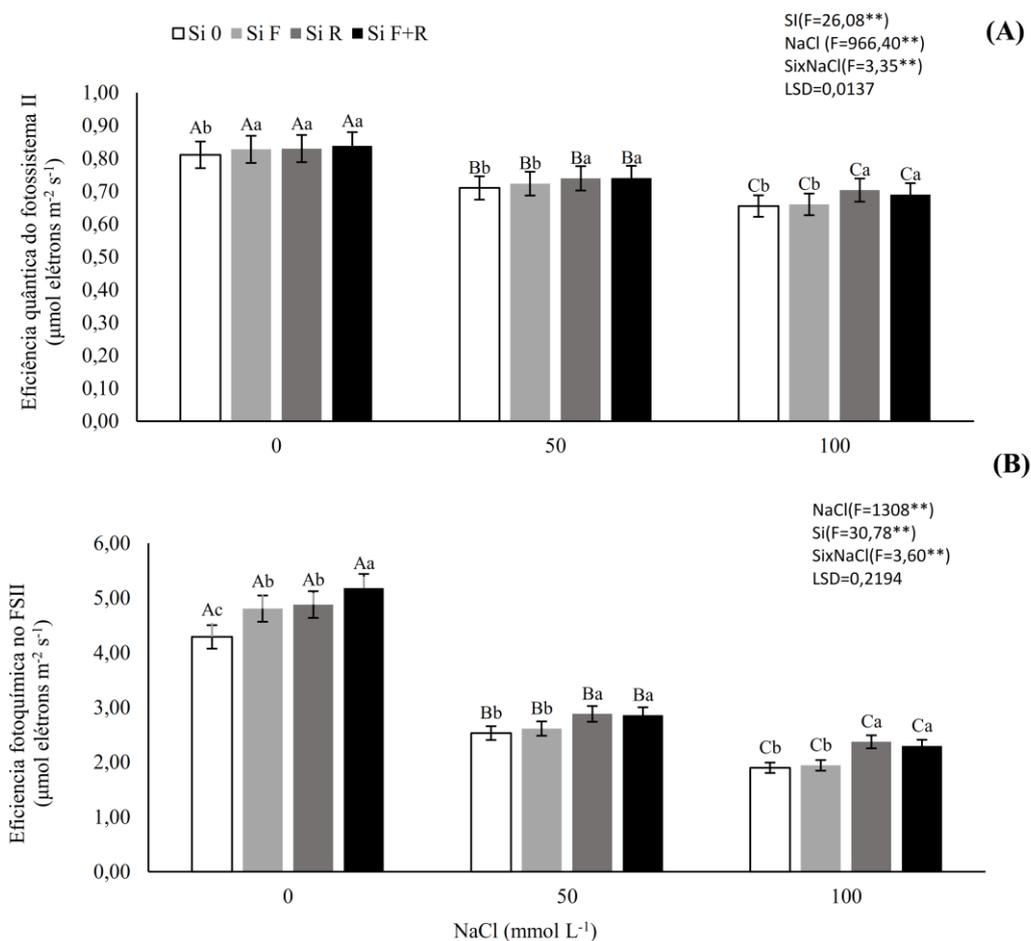


Figura 3: Eficiência quântica (Fv/Fm) (A) e fotoquímica (Fv/Fo) (B) do fotossistema II ( $\mu\text{mol elétrons m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ) em plantas de soja cultivadas na ausência de Si (Si0) e com Si aplicado via raiz na solução nutritiva (SiR), foliar (SiF) e via raiz na solução nutritiva + foliar (SiR+SiF) sob estresse salino. Letras maiúsculas diferentes indicam diferenças significativas na forma de aplicação de Si, entre as diferentes concentrações de NaCl e letras minúsculas indicam diferenças significativas entre as formas de aplicação de Si dentro de cada concentração de NaCl, de acordo com o teste de T de Student ( $p < 0,05$ ) \* ( $p < 0,01$ ) \*\*.

### 4.3 Clorofila e carotenoides

O teor de clorofila total foi afetado pela interação entre os fatores Si e NaCl (Figura 4A). Tanto na ausência quanto na presença de NaCl (50 e 100  $\text{mmol L}^{-1}$ ), as

formas de aplicação de Si, aumentaram o teor de clorofila total nas plantas. Porém, a redução do teor de clorofila foi proporcional as concentrações de NaCl utilizadas, independentemente da forma de aplicação de Si.

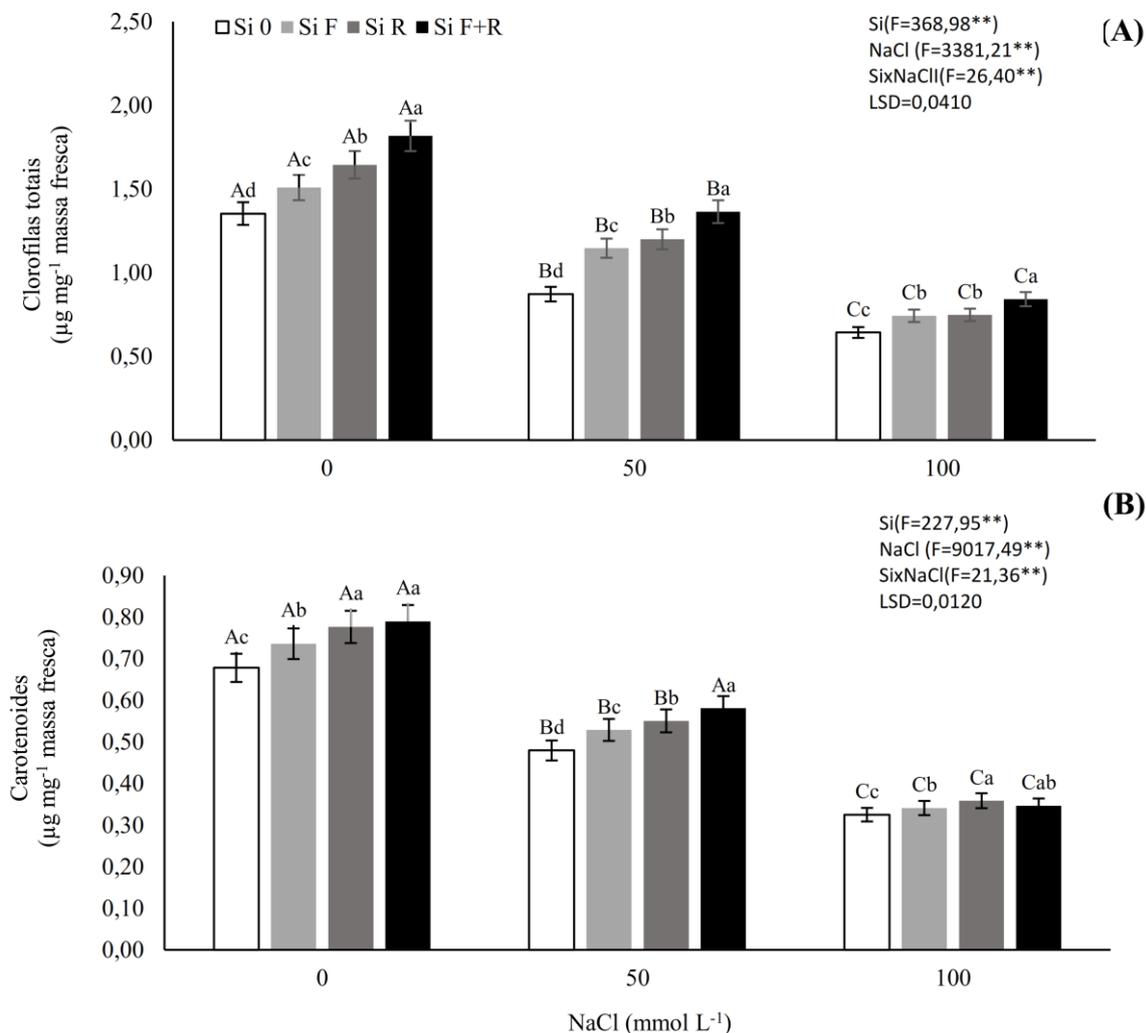


Figura 4: Clorofila total (A) e carotenoides (B) nas folhas de plantas de soja cultivadas na ausência de Si (Si0) e com Si aplicado via raiz na solução nutritiva (SiR), foliar (SiF) e via raiz na solução nutritiva + foliar (SiR+SiF) sob estresse salino. Letras maiúsculas diferentes indicam diferenças significativas na forma de aplicação de Si, entre as diferentes concentrações de NaCl e letras minúsculas indicam diferenças significativas entre as formas de aplicação de Si dentro de cada concentração de NaCl, de acordo com o teste de T de Student ( $p < 0,05$ ) \* ( $p < 0,01$ ) \*\*.

O maior teor de clorofila total foi obtido pelas plantas com aplicação de Si de forma combinada (R+F), independentemente da concentração de NaCl. O aumento do teor de clorofila total neste tratamento foi de 35 % para 0 NaCl; 56 % para 50

mmol L<sup>-1</sup> NaCl e 31 % para 100 mmol L<sup>-1</sup> NaCl. A aplicação de Si foliar e radicular aumentou os teores de clorofilas, comparado ao tratamento sem Si, independentemente da concentração de NaCl (Figura 4A).

Assim como o teor de clorofila total, o efeito da interação entre Si e NaCl também foi observado para o teor de carotenoides (Figura 4B). Nas diferentes concentrações de NaCl (50 e 100 mmol L<sup>-1</sup>) e sem NaCl, o teor de carotenoides aumentou nas plantas de soja onde foi utilizado o Si sob diferentes formas de aplicação. Porém, houve redução do teor de carotenoides com o aumento da concentração de NaCl.

Plantas com Si (R) e a combinação de Si (R+F) apresentaram os maiores teores de carotenoides nas condições sem NaCl e 50 mmol L<sup>-1</sup> de NaCl. Na concentração de 50 mmol L<sup>-1</sup> NaCl, plantas com a combinação dos dois modos de aplicação de Si (R+F) apresentaram os maiores teores de carotenoides 21 % acima quando comparadas as plantas sem aplicação de Si. Por outro lado, plantas submetidas a 100 mmol L<sup>-1</sup> de NaCl e aplicação de Si apresentaram maior incremento do teor de carotenoides independentemente da forma de aplicação (Figura 4B).

#### **4.4 Conteúdo relativo de água (CRA) e eficiência do uso da água (EUA)**

O efeito da interação entre os fatores Si e NaCl também foi observado para a eficiência do uso da água (CRA). Tanto na ausência, quanto na presença de NaCl (50 e 100 mmol L<sup>-1</sup>), as formas de aplicação de Si (F; R; F+R) resultaram em aumento no CRA (Figura 5A).

O conteúdo relativo de água (CRA) decresceu proporcionalmente com o aumento da concentração de NaCl independentemente das formas de aplicação de Si. Entretanto, plantas controle com aplicação de Si (R) e Si (F+R) apresentaram maior CRA quando comparadas as plantas sem aplicação de Si, correspondendo a 14 e 12 %, respectivamente (Figura 5A).

Plantas submetidas às concentrações de 50 e 100 mmol L<sup>-1</sup> de NaCl e com a aplicação de Si (R e R+F) apresentaram os maiores valores do CRA quando

comparadas as plantas controle sem Si, sendo os valores respectivamente de 8 % para a concentração de 50 mmol L<sup>-1</sup> de NaCl e 10 e 11 % para concentração de 100 mmol L<sup>-1</sup> de NaCl. Plantas com aplicação de Si foliar diferiram significativamente das plantas sem aplicação de Si (Figura 5A).

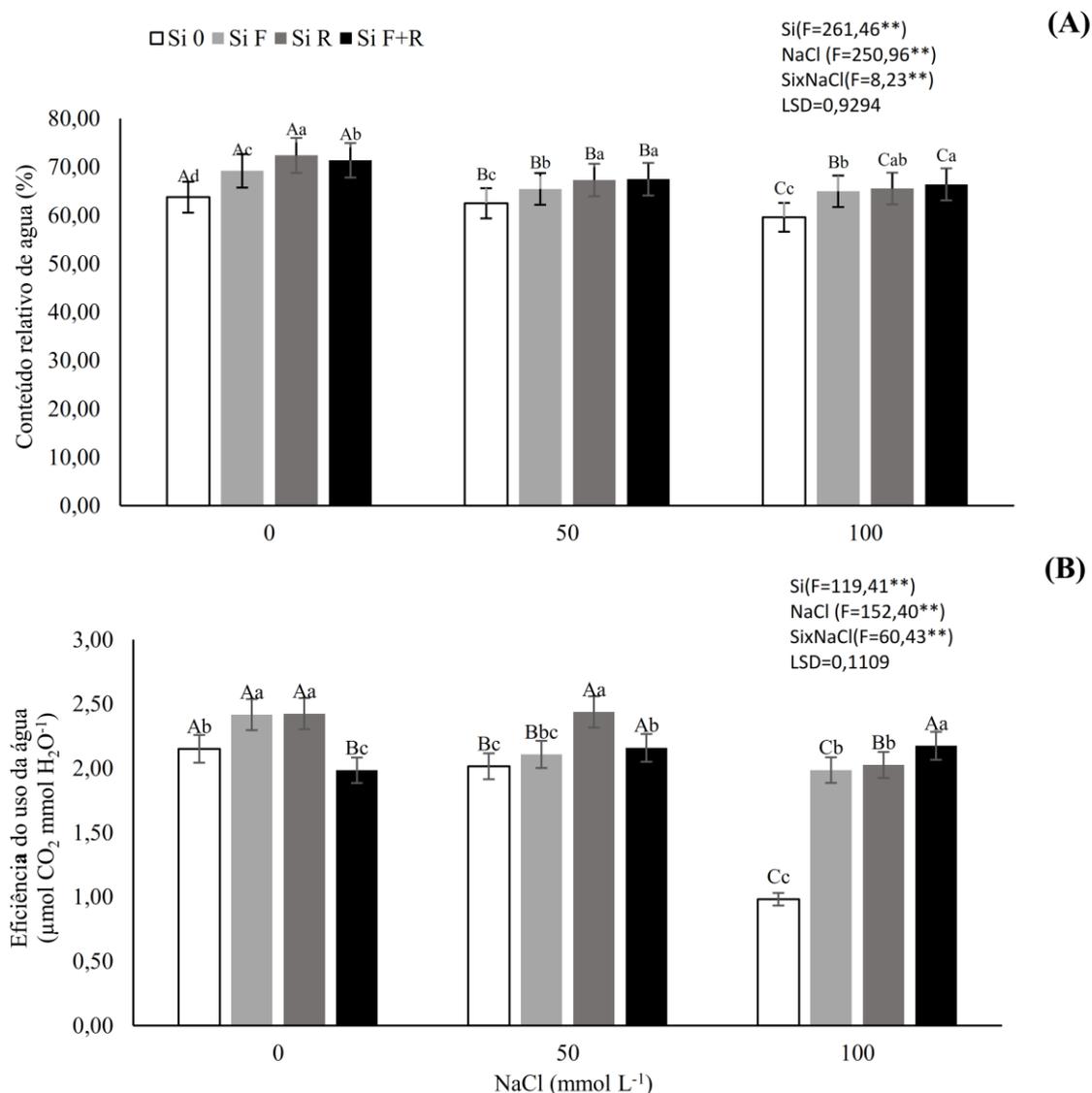


Figura 5: Conteúdo relativo de água (CRA) (A) e eficiência do uso da água (B) em plantas de soja cultivadas na ausência de Si (Si0) e com Si aplicado via raiz na solução nutritiva (SiR), foliar (SiF) e via raiz na solução nutritiva + foliar (SiR+SiF) sob estresse salino. Letras maiúsculas diferentes indicam diferenças significativas na forma de aplicação de Si, entre as diferentes concentrações de NaCl e letras minúsculas indicam diferenças significativas entre as formas de aplicação de Si dentro de cada concentração de NaCl, de acordo com o teste de T de Student ( $p < 0,05$ ) \* ( $p < 0,01$ ) \*\*.

A eficiência do uso da água (EUA) também foi afetada significativamente pela interação entre os fatores Si e NaCl. As plantas que não foram tratadas tiveram menor EUA proporcionalmente ao aumento das concentrações de NaCl. Todavia, plantas que receberam Si R demonstraram menor EUA quando submetidas a 100 NaCl. Plantas submetidas as concentrações de 50 e 100 mmol L<sup>-1</sup> NaCl que receberam Si (R+F), demonstraram os maiores valores do EUA, quando comparadas às plantas controle sem NaCl (Figura 5 B).

Plantas controle submetidas ao Si F e Si R apresentaram os maiores valores de EUA quando comparadas a plantas sem a presença do Si, com aumento de 13 % em ambos casos. Na concentração de 50 mmol L<sup>-1</sup> NaCl, o maior valor de EUA foi demonstrado pelas plantas com Si. Entretanto, plantas submetidas a maior concentração de NaCl (100 mmol L<sup>-1</sup>) demonstraram maiores valores do EUA, nas plantas com Si nas três formas de aplicação (Figura 5 B).

#### **4.5 Caracterização do estresse oxidativo: conteúdo de malondialdeído (MDA)**

A peroxidação lipídica, expressa como o teor de MDA, foi semelhante nas raízes e folhas em plantas de soja sob estresse salino, onde foi observado efeito da interação Si e NaCl (Figura 6AB). Folhas e raízes com Si demonstraram redução no teor de MDA, independente da concentração de NaCl.

Nas folhas, houve diferenças no teor de MDA entre as formas de aplicação na ausência de NaCl, (Figura 6A). Plantas tratadas com Si demonstraram menores valores do teor de MDA. Plantas submetidas a 50 mmol L<sup>-1</sup> de NaCl e com aplicações de Si R e Si F+R demonstraram os menores valores de MDA correspondendo a 29 e 50 %, em relação as plantas sem Si respectivamente. Além disso, as plantas expostas a 100 mmol L<sup>-1</sup> de NaCl apresentaram o maior teor de MDA nas folhas no tratamento sem Si. Houve uma diminuição na produção de MDA nas plantas com Si quando comparadas a plantas sem Si, correspondendo a 11 % (Si F), 11 % (Si R) e 12 % (Si R+F), quando expostas a 100 mmol L<sup>-1</sup> de NaCl.

Nas raízes, houve aumentos no teor de MDA proporcional as concentrações de NaCl, independentemente das formas de aplicação do Si e interação entre os fatores

Si e NaCl (Figura 6B). Todas as formas de aplicação de Si demonstraram diferenças significativas, independentemente da concentração de NaCl. Os menores valores de MDA foram obtidos nas plantas com Si F+R com ausência de NaCl, com uma diminuição do conteúdo de MDA de 32 % Si R (50 mmol L<sup>-1</sup> NaCl), 42 %, Si R+F (50 mmol L<sup>-1</sup> NaCl) 47 % quando comparadas as plantas sem Si e submetidas ao estresse.

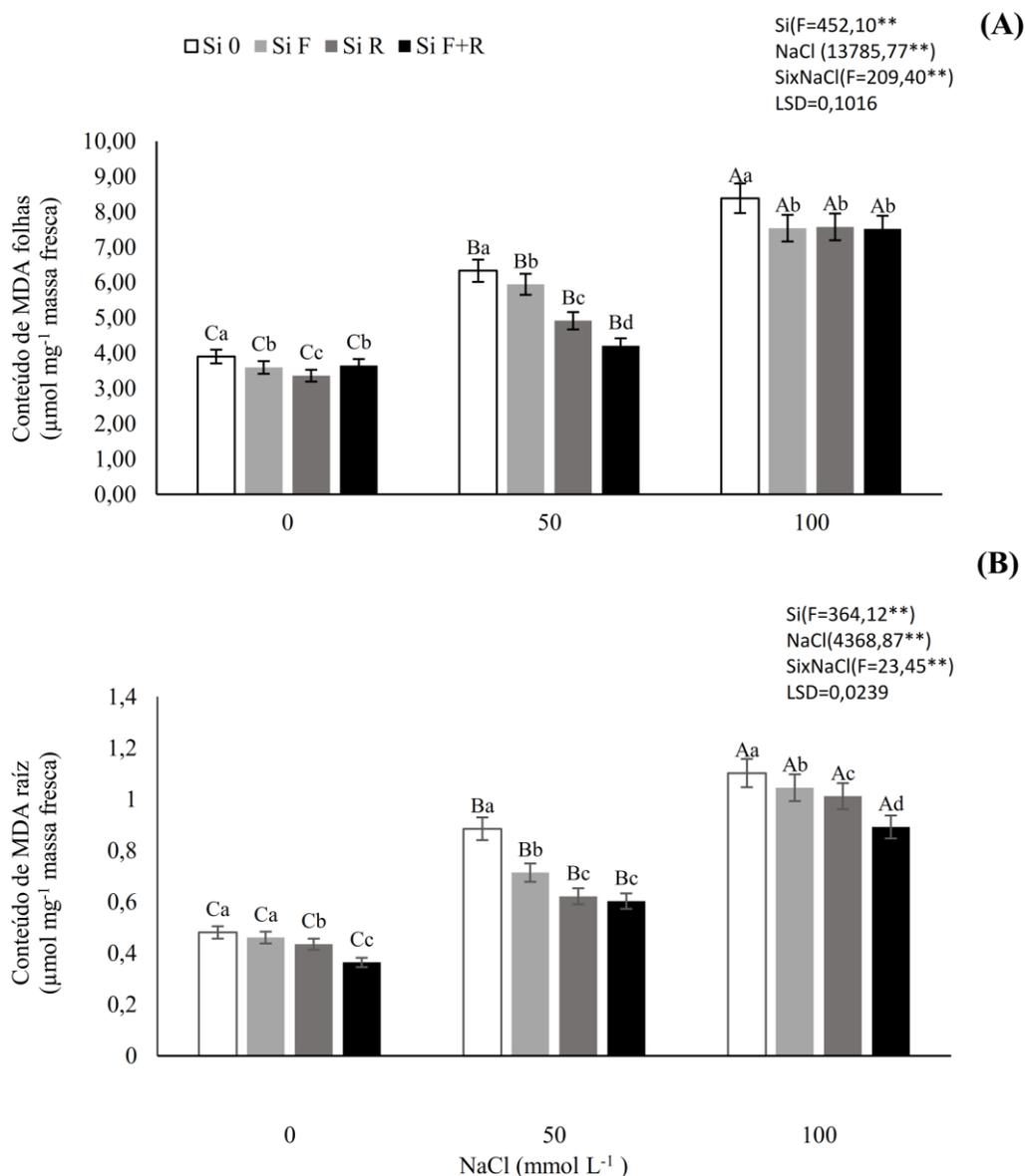


Figura 6: Conteúdo de malondialdeído (MDA) nas folhas (A) e raiz (B) em plantas de soja cultivadas na ausência de Si (Si0) e com Si aplicado via raiz na solução nutritiva (SiR), foliar (SiF) e via raiz na solução nutritiva + foliar (SiR+SiF) sob estresse salino. Letras maiúsculas diferentes indicam diferenças significativas na forma de aplicação

de Si, entre as diferentes concentrações de NaCl e letras minúsculas indicam diferenças significativas entre as formas de aplicação de Si dentro de cada concentração de NaCl, de acordo com o teste de T de Student ( $p < 0,05$ ) \* ( $p < 0,01$ ) \*\* .

#### 4.6 Atividade antioxidante enzimática

O efeito da interação entre os fatores Si e NaCl também foi observado para a atividade antioxidante enzimática da SOD, GPOX e APX nas folhas das plantas de soja sob estresse salino (Figura 7ABC). A atividade da SOD aumentou com a aplicação de Si independentemente dos níveis de salinidade (Figura 7A). A melhor resposta foi obtida com a aplicação de Si R e Si R+F nos três níveis de salinidade. A maior atividade da SOD foi observada no tratamento Si R+F ( $50 \text{ mmol L}^{-1}$  NaCl) quando comparada com plantas sem Si e  $50 \text{ mmol L}^{-1}$  de NaCl.

Entretanto, a atividade da GPOX também foi favorecida pela aplicação de Si independentemente das concentrações de NaCl. Plantas submetidas a ( $50$  e  $100 \text{ mmol L}^{-1}$  NaCl) e com aplicações de Si F+R apresentaram os maiores valores de GPOX correspondendo a 24 e 14 % a mais, quando comparadas com Si 0 ( $50$  e  $100 \text{ mmol L}^{-1}$  NaCl), respectivamente. Todas as formas de aplicação de Si demonstraram diferenças significativas, independentemente da concentração de NaCl e a maior atividade enzimática foi obtida nas plantas que receberam  $100 \text{ mmol L}^{-1}$  NaCl (Figura 7B).

A aplicação de Si independentemente da forma e da concentração salina, favoreceu a atividade da APX (Figura 7C). Os maiores valores foram obtidos nas concentrações de ( $50$  e  $100 \text{ mmol L}^{-1}$  NaCl) e não houve diferenças entre as formas de aplicação do Si em concentrações salinas diferentes. Os aumentos dos tratamentos com o Si em relação ao Si 0 ( $50 \text{ mmol L}^{-1}$  NaCl) foram de 25 % Si F; 34 % Si R; 38 % Si F+R e em relação a ( $100 \text{ mmol L}^{-1}$  NaCl) de 38 % Si F; 40 % Si R; 42 % Si F+R respectivamente.

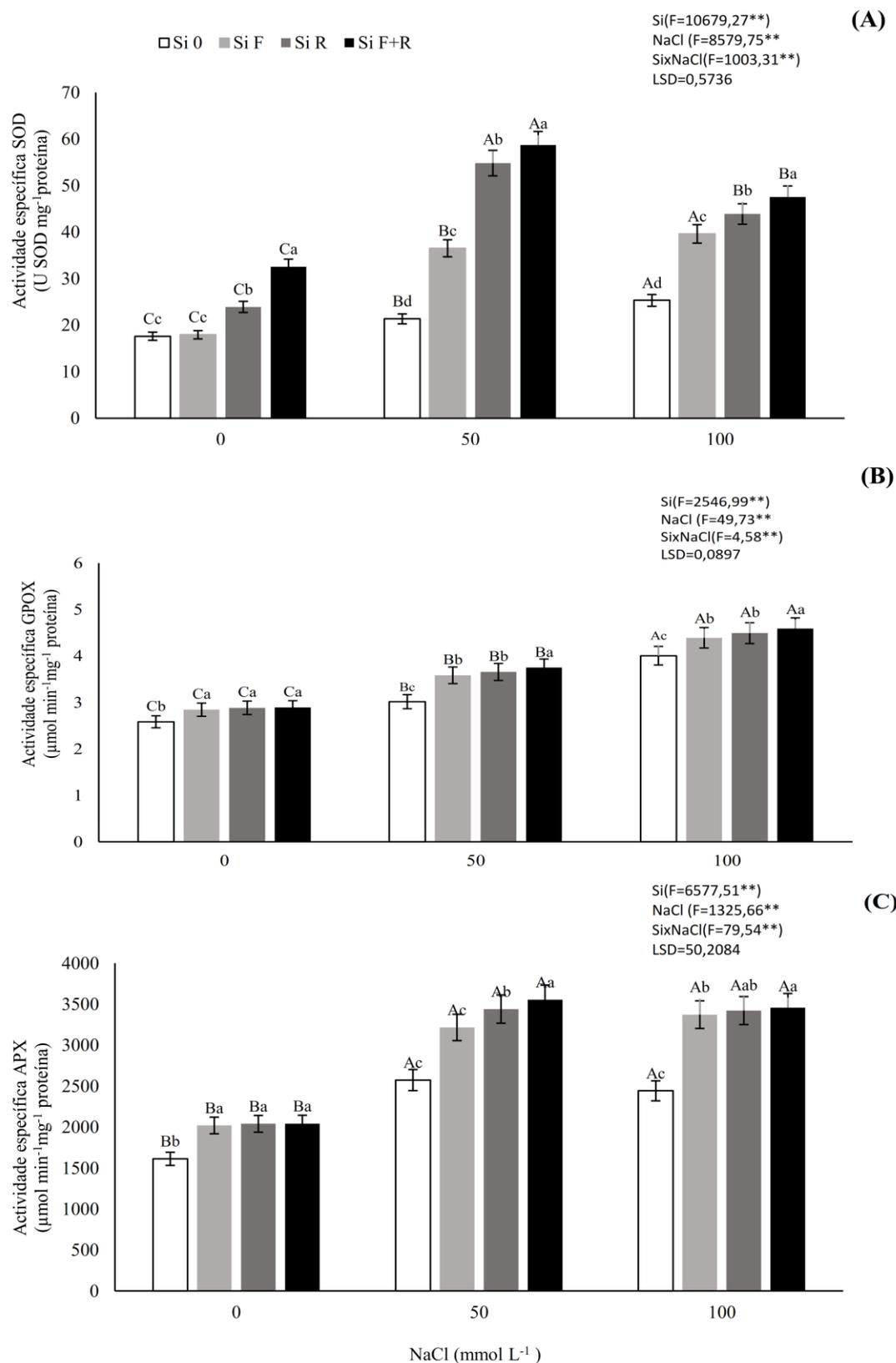


Figura 7: Atividade específica da SOD (A), atividade específica da GPOX (B), atividade específica da APX (C) em plantas de soja cultivadas na ausência de Si (Si0) e com Si aplicado via raiz na solução nutritiva (SiR), foliar (SiF) e via raiz

solução nutritiva + foliar (SiR+SiF) sob estresse salino. Letras maiúsculas diferentes indicam diferenças significativas na forma de aplicação de Si, entre as diferentes concentrações de NaCl e letras minúsculas indicam diferenças significativas entre as formas de aplicação de Si dentro de cada concentração de NaCl, de acordo com o teste de T de Student ( $p < 0,05$ ) \* ( $p < 0,01$ ) \*\*.

#### 4.7 Concentração de prolina livre

O efeito da interação entre os fatores Si e NaCl também foi observado para a concentração de prolina livre (PL) nas folhas e raiz de plantas de soja sob estresse salino. Na presença de NaCl (50 e 100 mmol L<sup>-1</sup>), as formas de aplicação de Si (F; R; F+R) apresentaram aumento na PL nas folhas (Figura 8A). Entretanto, houve aumento no teor de prolina proporcional as concentrações de NaCl nas raízes, independentemente das formas de aplicação do Si e interação entre os fatores Si e NaCl (Figura 8B).

Nas folhas, não houve diferença na produção de prolina na ausência de NaCl. Entretanto, um aumento de 15 % foi observado no tratamento Si F, sendo superiores a 80 % para o Si R e o Si F+R NaCl (50 mmol L<sup>-1</sup>). Na maior concentração de NaCl, os aumentos em relação ao tratamento sem Si foram de 22 % Si F; 29 % Si R e de 59 % para a aplicação combinada Si F+R (Figura 8A). Na raiz a maior produção de PL foi obtida com os tratamentos Si R e Si R+F tanto na ausência quanto na presença de NaCl 50 e 100 mmol L<sup>-1</sup>. Os maiores teores alcançados foram com o Si R e Si R+F NaCl (100 mmol L<sup>-1</sup>) em relação ao tratamento sem Si de 68 % Si F e de 76 % para Si F+R.

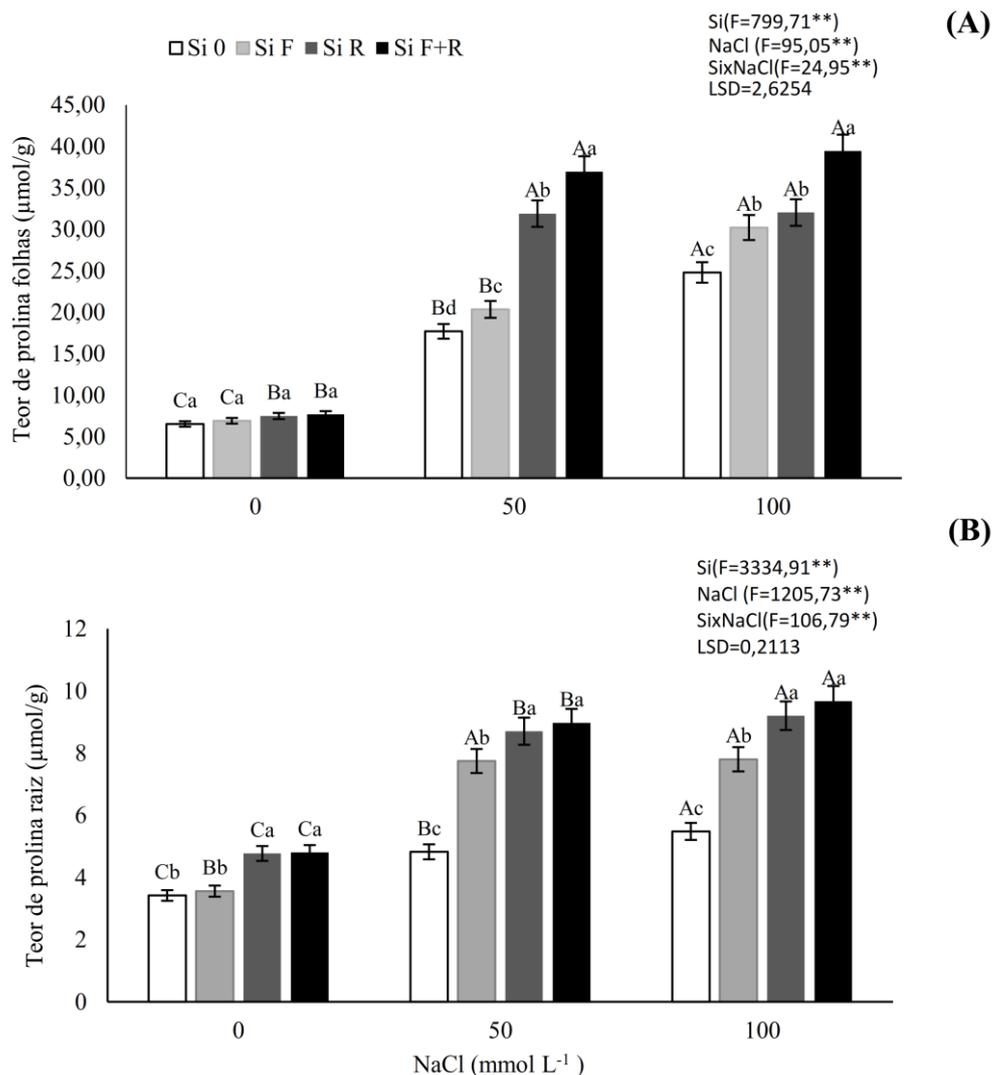


Figura 8: Teor de prolina nas folhas (A) e na raiz (B) em plantas de soja cultivadas na ausência de Si (Si0) e com Si aplicado via raiz na solução nutritiva (SiR), foliar (SiF) e via raiz na solução nutritiva + foliar (SiR+SiF) sob estresse salino. Letras maiúsculas diferentes indicam diferenças significativas na forma de aplicação de Si, entre as diferentes concentrações de NaCl e letras minúsculas indicam diferenças significativas entre as formas de aplicação de Si dentro de cada concentração de NaCl, de acordo com o teste de T de Student ( $p < 0,05$ ) \* ( $p < 0,01$ ) \*\*.

#### 4.8 Acúmulo de Si, Na<sup>+</sup> e K<sup>+</sup>

Para o acúmulo de Si na parte aérea (PA) e raízes houve interação entre as concentrações de Si e NaCl. Quando as plantas foram submetidas às concentrações maiores de NaCl, o acúmulo de Si não foi reduzido, independentemente do tipo de aplicação do Si. Plantas que receberam aplicação foliar de Si apresentaram redução no acúmulo Si nas concentrações de 0 e 100 mmol L<sup>-1</sup> NaCl, enquanto plantas que receberam a aplicação radicular de Si, demonstraram redução no acúmulo de Si apenas na concentração de 100 mmol L<sup>-1</sup> NaCl comparadas com 0 e 50 mmol L<sup>-1</sup> NaCl. Entretanto, plantas com a aplicação combinada dos métodos (F+R) não demonstraram diferença significativa no acúmulo de Si na parte aérea, independente da concentração de NaCl (Figura 9A).

Nas raízes, houve interação entre os fatores (Figura 9B), sendo que o maior acúmulo de Si foi demonstrado no tratamento controle com as aplicações de Si R e Si F+R. Entretanto, o maior acúmulo de Si foi observado nas plantas que foram submetidas às concentrações de 50 e 100 mmol L<sup>-1</sup> NaCl e receberam a aplicação de Si (F+R).

Na concentração de 100 mmol L<sup>-1</sup> de NaCl, as plantas não tiveram diferenças significativas quanto ao acúmulo de Si na parte aérea. Entretanto, o acúmulo de Si foi menor nas raízes proporcionalmente ao aumento das concentrações de NaCl, com exceção apenas para a aplicação combinada do Si F+R (Figura 9 AB).

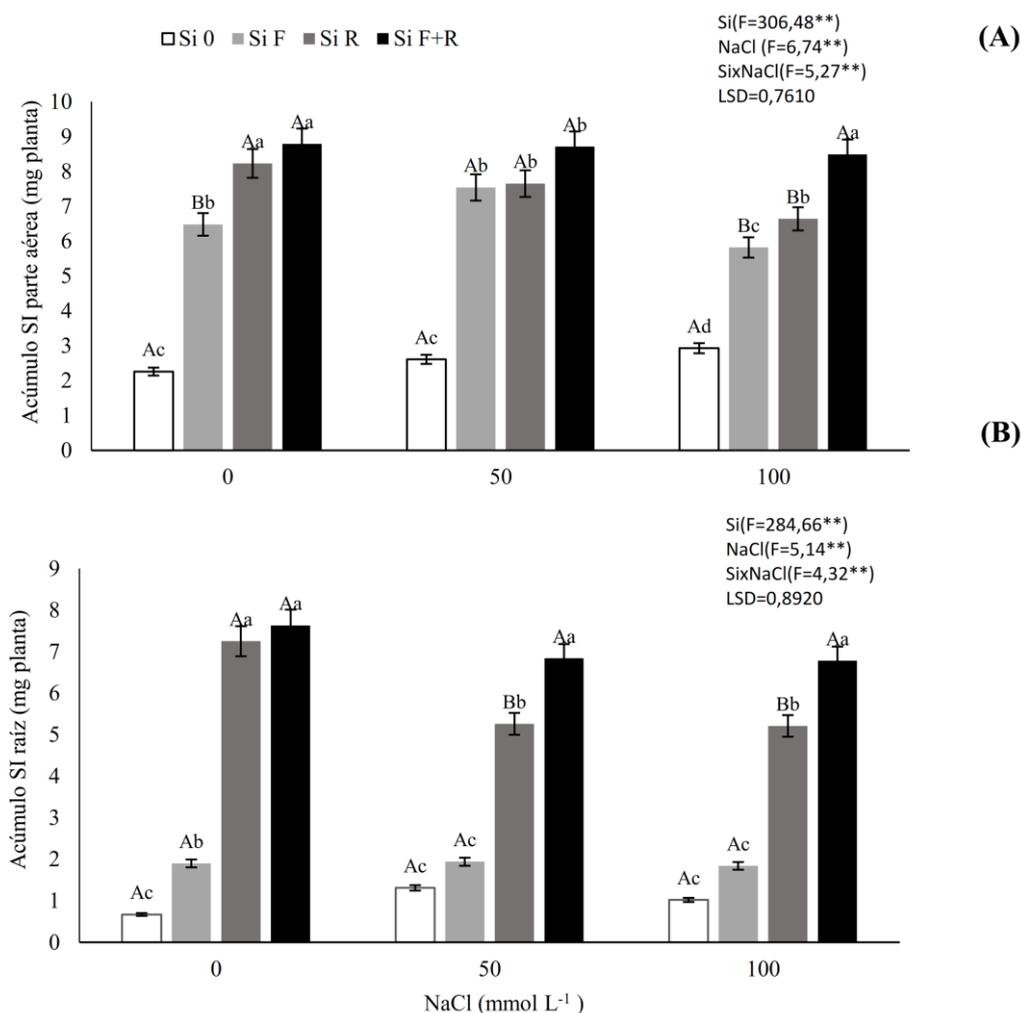


Figura 9: Acúmulo de Si na parte aérea (PA) e raiz (B) em plantas de soja cultivadas na ausência de Si (Si0) e com Si aplicado via raiz na solução nutritiva (SiR), foliar (SiF) e via raiz na solução nutritiva + foliar (SiR+SiF) sob estresse salino. Letras maiúsculas diferentes indicam diferenças significativas na forma de aplicação de Si, entre as diferentes concentrações de NaCl e letras minúsculas indicam diferenças significativas entre as formas de aplicação de Si dentro de cada concentração de NaCl, de acordo com o teste de T de Student ( $p < 0,05$ ) \* ( $p < 0,01$ ) \*\*.

Para o acúmulo de Na<sup>+</sup> na (PA) e raízes houve interação entre as concentrações de Si e NaCl. Quando as plantas foram submetidas às concentrações maiores de NaCl, o acúmulo de Na aumentou, independentemente do modo de aplicação do Si (Figura 10AB). Na (PA), houve redução do acúmulo de Na<sup>+</sup> provocado pela aplicação de Si quando comparado como o tratamento sem Si (50 mmol L<sup>-1</sup> NaCl). As plantas acumularam menos Na sendo 17 % Si F, 30 % Si R e 73 % Si F+R (Figura 10A) quando comparado como o tratamento sem Si. Da mesma

forma, na concentração de 100 mmol L<sup>-1</sup> NaCl, o acúmulo de Na<sup>+</sup> foi menor com a aplicação de Si. O tratamento de maior efeito atenuante foi Si F+R (100 mmol L<sup>-1</sup> NaCl) com redução de 65 % de Na<sup>+</sup> na PA quando comparado como o tratamento sem Si (Figura 10A).

Na raiz, houve acúmulo de Na<sup>+</sup> quando as plantas foram submetidas às concentrações maiores de NaCl. Plantas submetidas a 50 mmol L<sup>-1</sup> de NaCl e com aplicações de Si F+R demonstraram os menores valores de acúmulo de Na<sup>+</sup> correspondendo a 33 % quando comparadas com o tratamento sem Si. Todavia, plantas que receberam Si R e Si R+F demonstraram menor acúmulo de Na<sup>+</sup> quando submetidas a 100 NaCl correspondendo a 17 % Si R e 26 % Si R+F, respectivamente (Figura 10B).

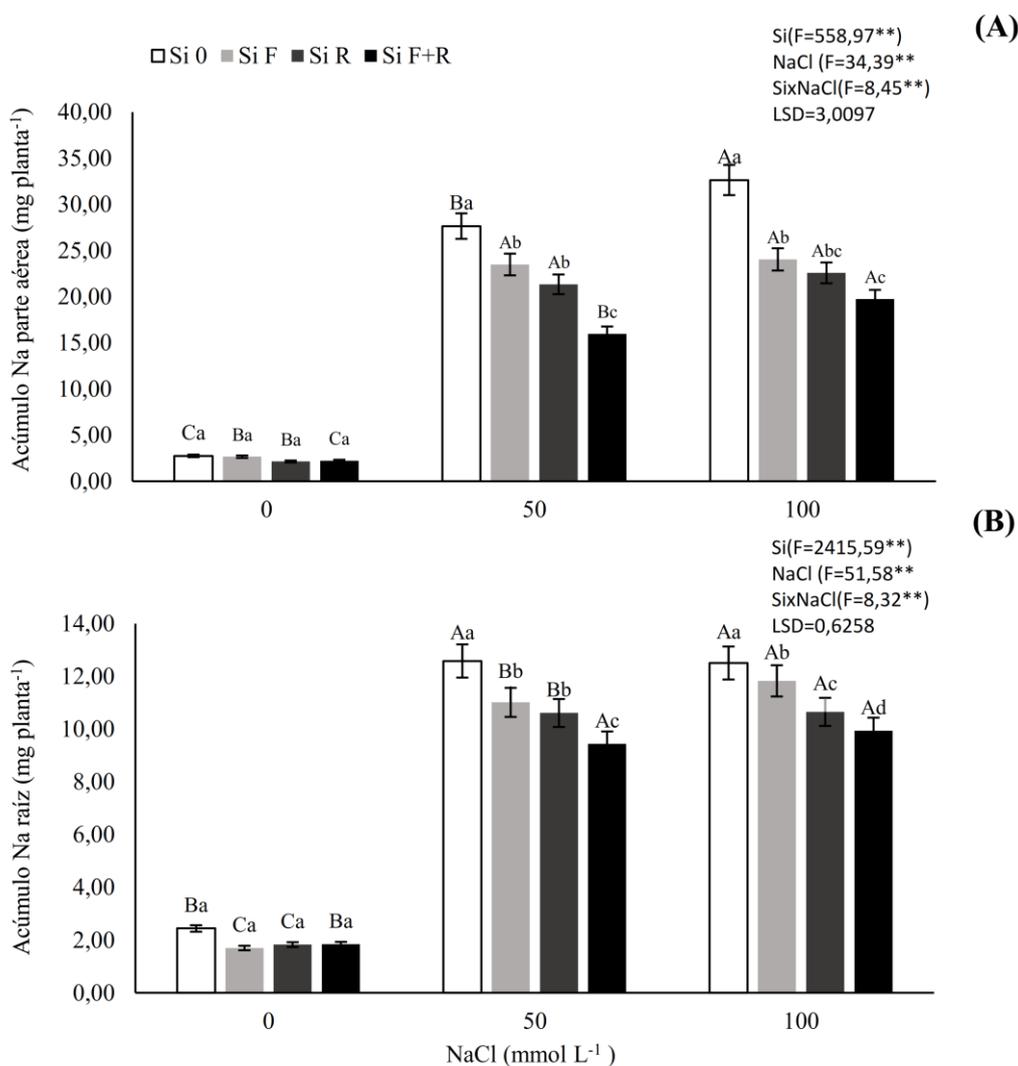


Figura 10: Acúmulo de Na<sup>+</sup> parte aérea (A) e raiz (B) em plantas de soja cultivadas na ausência de Si (Si0) e com Si aplicado via raiz na solução nutritiva (SiR), foliar

(SiF) e via raiz solução nutritiva + foliar (SiR+SiF) sob estresse salino. Letras maiúsculas diferentes indicam diferenças significativas na forma de aplicação de Si, entre as diferentes concentrações de NaCl e letras minúsculas indicam diferenças significativas entre as formas de aplicação de Si dentro de cada concentração de NaCl, de acordo com o teste de T de Student ( $p < 0,05$ ) \* ( $p < 0,01$ ) \*\*.

Para o acúmulo de  $K^+$  na (PA) e raízes houve interação entre as concentrações de Si e NaCl. O maior acúmulo de  $K^+$  na PA foi nas plantas sem salinidade (Figura 11A). Entretanto, plantas submetidas a 50 e 100  $\text{mmol L}^{-1}$  de NaCl acumularam menos  $K^+$ . O aumento comparado com as plantas sem Si foi de 32 % (Si F 50  $\text{mmol L}^{-1}$  Na Cl), 60 % (Si R 50  $\text{mmol L}^{-1}$  Na Cl), 80 % (Si F+R 50  $\text{mmol L}^{-1}$  Na Cl) 34 % (Si F 100  $\text{mmol L}^{-1}$  Na Cl), 63 % (Si R 100  $\text{mmol L}^{-1}$  Na Cl), 83 % (Si F+R 100  $\text{mmol L}^{-1}$  Na Cl).

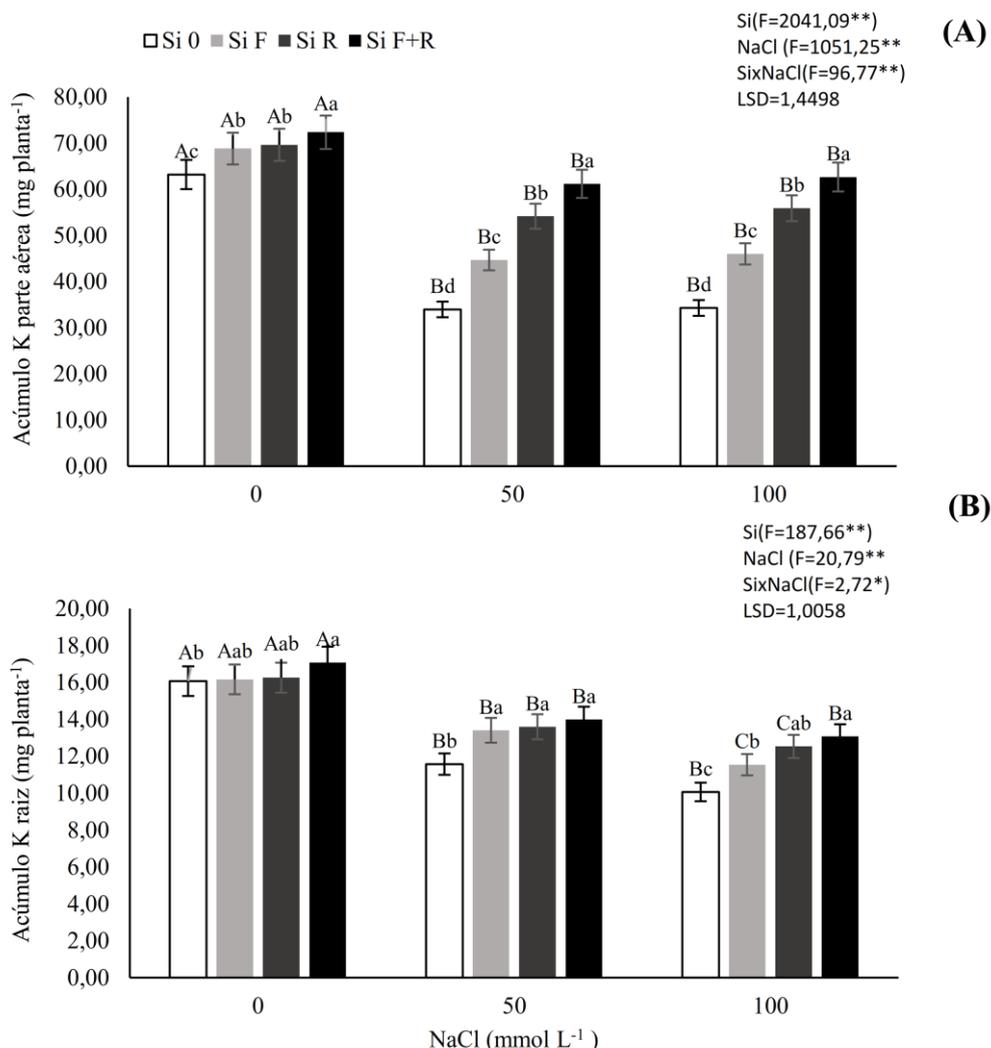


Figura 11: Acúmulo de  $K^+$  parte aérea (A) e raiz (B) em plantas de soja cultivadas na ausência de Si (Si0) e com Si aplicado via raiz na solução nutritiva (SiR), foliar (SiF) e via raiz solução nutritiva + foliar (SiR+SiF) sob estresse salino. Letras maiúsculas diferentes indicam diferenças significativas na forma de aplicação de Si, entre as diferentes concentrações de NaCl e letras minúsculas indicam diferenças significativas entre as formas de aplicação de Si dentro de cada concentração de NaCl, de acordo com o teste de T de Student ( $p < 0,05$ ) \* ( $p < 0,01$ ) \*\*.

Na raiz, o acúmulo de  $K^+$  foi maior nas plantas quando não foram submetidas ao sal (Figura 11B). O Si melhorou o acúmulo de  $K^+$  nas plantas sob estresse salino. Os aumentos em relação as plantas controle foram de 16 % (Si F 50 mmol L<sup>-1</sup> Na Cl), 17 % (Si R 50 mmol L<sup>-1</sup> Na Cl), 21 % (Si F+R 50 mmol L<sup>-1</sup> Na Cl) e 15 % (Si F 100 mmol L<sup>-1</sup> Na Cl), 25 % (Si R 100 mmol L<sup>-1</sup> Na Cl), 30 % (Si F+R 100 mmol L<sup>-1</sup> Na Cl).

#### 4.9 Parâmetros de crescimento: massa seca e área foliar

Para a massa seca das folhas, caule e raiz, (Figura 12A), foi observado interação entre os fatores Si e NaCl. A massa seca das folhas foi reduzida nas plantas submetidas as concentrações de NaCl. Entretanto, a massa seca das folhas foi maior quando o Si R e o Si F+R foram aplicados nas plantas submetidas a concentração 50 mmol L<sup>-1</sup> NaCl em na ausência de NaCl. A massa seca das folhas das plantas com aplicação de Si foliar também diferiu significativamente do tratamento sem Si, nas duas concentrações de NaCl. Na concentração 100 mmol L<sup>-1</sup> NaCl, o maior valor de massa seca foliar foi observado nas plantas com aplicação combinada de Si R+F, com aumento de 45 % quando comparado ao tratamento sem Si. Ainda pode-se observar que a massa seca de folhas não diferiu estatisticamente entre as concentrações de NaCl quando se aplicou a combinação de Si (F+R) nas plantas (Figura 12A).

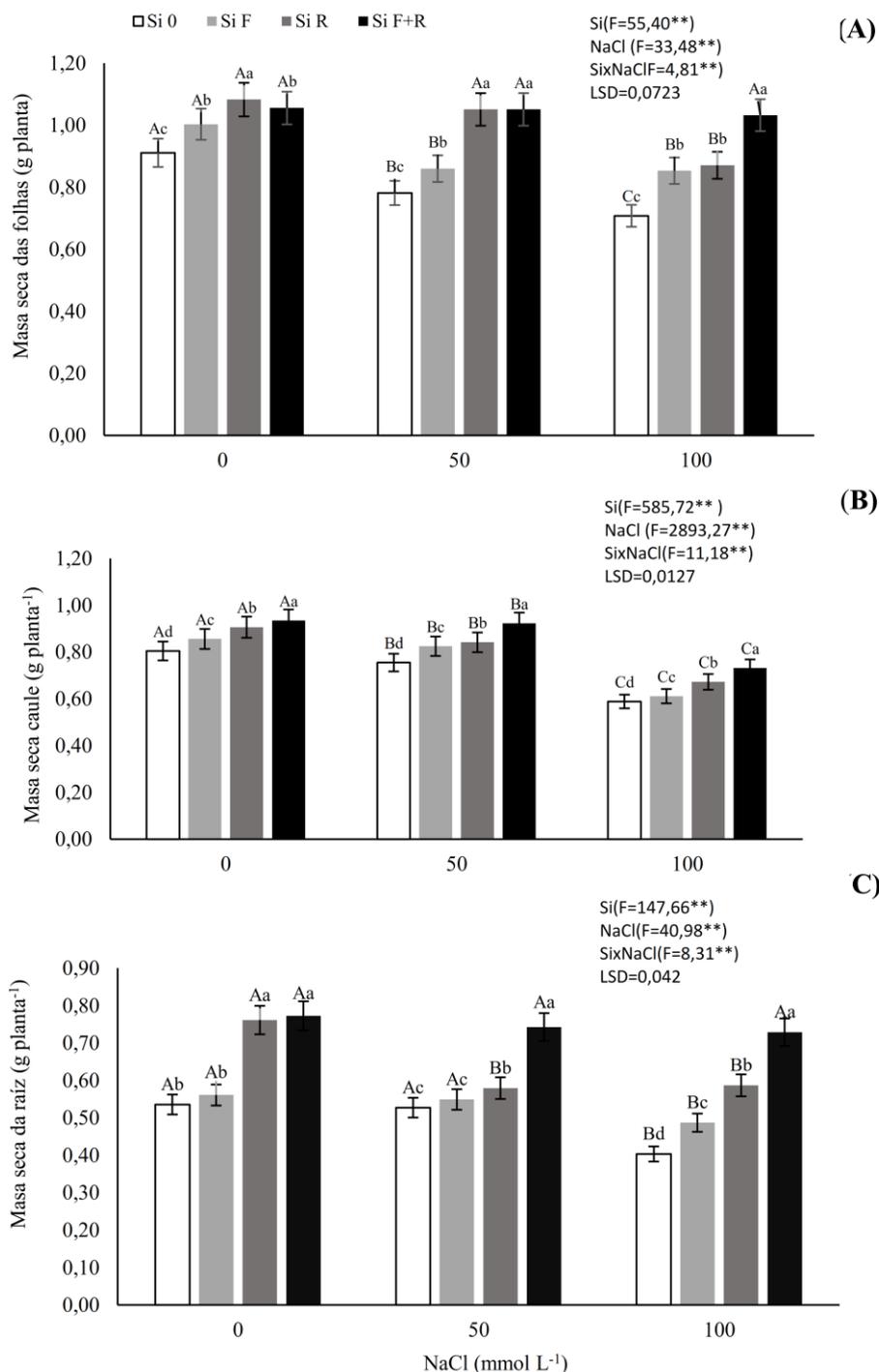


Figura 12: Massa seca das folhas (A), caule (B) e raiz (C) (g planta<sup>-1</sup>) em plantas de soja cultivadas na ausência de Si (Si0) e com Si aplicado via raiz na solução nutritiva (SiR), foliar (SiF) e via raiz solução nutritiva + foliar (SiR+SiF) sob estresse salino. Letras maiúsculas diferentes indicam diferenças significativas na forma de aplicação de Si, entre as diferentes concentrações de NaCl e letras minúsculas indicam diferenças significativas entre as formas de aplicação de Si dentro de cada

concentração de NaCl, de acordo com o teste de T de Student ( $p < 0,05$ ) \* ( $p < 0,01$ )

\*\* .

Entretanto, a massa seca do caule das plantas foi reduzida quando as plantas foram submetidas às concentrações de 50 e 100 mmol L<sup>-1</sup> NaCl, independente do tratamento com Si (Figura 12B). Todas as formas de aplicação com Si diferiram significativamente do tratamento sem Si para esta variável, nas concentrações de NaCl que foram submetidos (50 e 100 mmol L<sup>-1</sup> de NaCl) e na ausência de NaCl. Os maiores valores foram demonstrados pelas plantas que receberam a aplicação combinada de Si R+F, independente da concentração de NaCl, sendo este aumento de 16 % sem NaCl, 23 % (50 mmol L<sup>-1</sup> NaCl) e 24 % (100 mmol L<sup>-1</sup> NaCl), comparados com as plantas sem Si dentro dos respectivos tratamentos.

A massa seca da raiz foi maior nas plantas com Si, independentemente da concentração de NaCl (Figura 12C). O maior valor observado foi da aplicação combinada SiF+R com incrementos de 43 % na ausência de NaCl, 40 % (50 mmol L<sup>-1</sup> NaCl) e 81 % (100 mmol L<sup>-1</sup> NaCl), quando comparados às plantas sem aplicação de Si.

Para os dados de área foliar (Figura 13), houve efeito da interação Si com NaCl. Nas concentrações de NaCl a maior área foliar foi observada pelas plantas que receberam o Si, independente da forma de aplicação. Entretanto, a área foliar foi reduzida proporcionalmente ao aumento da concentração de NaCl. O maior valor foi demonstrado pelas plantas que receberam as aplicações de Si R e Si F+R sob todas as condições de estresse salino. Os aumentos observados foram de 19 % Si R, 26 % Si F+R na ausência de NaCl, 25 % Si R, 24 % Si F+R (50 mmol L<sup>-1</sup> NaCl) e 11 % Si R, 27 % Si F+R (100 mmol L<sup>-1</sup> NaCl), quando comparados às plantas sem aplicação de Si.

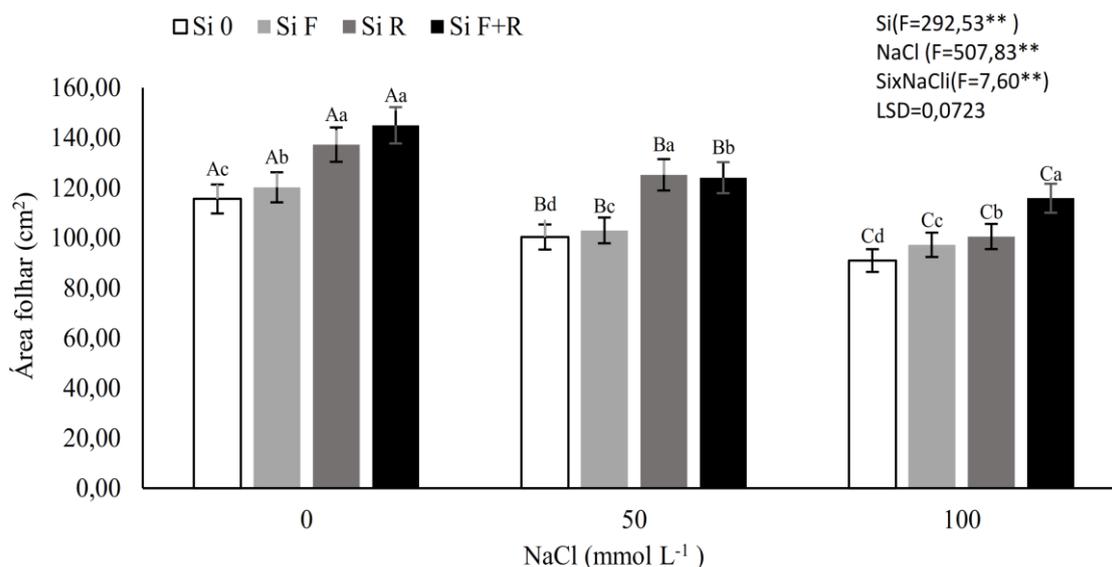


Figura 13: Área foliar em plantas de soja cultivadas na ausência de Si (Si0) e com Si aplicado via raiz na solução nutritiva (SiR), foliar (SiF) e via raiz solução nutritiva + foliar (SiR+SiF) sob estresse salino. Letras maiúsculas diferentes indicam diferenças significativas na forma de aplicação de Si, entre as diferentes concentrações de NaCl e letras minúsculas indicam diferenças significativas entre as formas de aplicação de Si dentro de cada concentração de NaCl, de acordo com o teste de T de Student ( $p < 0,05$ ) \* ( $p < 0,01$ ) \*\*.

## 5. DISCUSSÃO

O estresse salino retarda o crescimento desenvolvimento e produção das plantas de soja. Afeta o potencial hídrico, o potencial osmótico, aumenta o teor de MDA e diminui o conteúdo relativo da água, assim como a eficiência do seu uso. Diminui o conteúdo de pigmento e a fluorescência da clorofila, a condutância estomática e afeta processos como a transpiração e a fotossíntese (MALEKZADEH, 2015; SADAK et al., 2020; SHETEIWY et al., 2020).

A fotossíntese é o processo mais importante nas plantas para a produção de energia para completar seu ciclo de vida (EVANS, 2013). A redução da fotossíntese, transpiração e da condutância estomática são os efeitos comuns causados pelo estresse salino nas plantas de soja (CHUNG et al., 2020). Os resultados gerais

indicaram que quando as plantas foram expostas às condições de salinidade (50 e 100 mmol de NaCl) a fotossíntese, transpiração e a condutância estomática foram reduzidas. Entretanto, a aplicação do Si atenuou os efeitos da salinidade, o que refletiu na redução destes efeitos nas variáveis analisadas.

Outros estudos que abordam a cultura da soja obtiveram resultados similares quando usaram o Si como atenuante (CHUNG et al., 2020). Além disso, o Si melhora a taxa fotossintética, que está associada à ultraestrutura da folha, clorofila e atividade de ribulose bifosfato carboxilase (HAMAYUN ABDUL WALI KHAN et al., 2010a). Resultados semelhantes também foram relatados para outras espécies como ervilha, arroz, sorgo e girassol (CALERO HURTADO et al., 2020; KIM et al., 2014a; TRIPATHI et al., 2015).

A transpiração e a condutância estomática foram maiores nas plantas tratadas com Si para todas as concentrações de NaCl. Isso sugere que a aplicação de Si atenuou o efeito do estresse salino, regulando a condutância estomática e a taxa de transpiração (Figura 2BC). Quando as plantas são submetidas ao estresse por salinidade, os estômatos se fecham para minimizar a absorção de  $\text{Na}^+$  e  $\text{Cl}^-$  do solo (HANIN et al., 2016; KIM et al., 2018a). Portanto, os resultados confirmam a hipótese de que as plantas de soja reconhecem o estresse salino no tratamento com 50 e 100  $\text{mmol L}^{-1}$  NaCl e, conseqüentemente, fecham os estômatos para impedir o acúmulo de  $\text{Na}^+$  e  $\text{Cl}^-$  nas células vegetais.

A diminuição da fotossíntese pode estar relacionada à diminuição do teor de pigmentos. O estresse provocado pela salinidade dos solos provoca a diminuição dos pigmentos fotossintéticos, como a clorofila total e os carotenoides, que quando são diminuídos, podem refletir em menor crescimento das plantas (GOMES et al., 2017). Os resultados mostraram aumento no teor de pigmentos com todas as formas de aplicação avaliadas. Outros autores tiveram resultados similares em mudas de soja, trébol de Alejandria (*Trifolium alexandrinum*) e castanheira (*Castanea spp.*) (ABDALLA, 2011; SHEN et al., 2010; ZHANG et al., 2013).

A função e estrutura de diferentes componentes fotossintéticos influenciam diretamente na eficiência de alguns pigmentos fotossintéticos, como a clorofila-a, que atua nos centros de reação tanto do fotossistema I como do fotossistema II (PSI e PSII) e desempenha um papel crucial entre outros pigmentos fotossintéticos (XING et al., 2013) na eficiência quântica (SAYYAD-AMIN et al., 2016). A clorofila é um

pigmento importante para a coleta de fótons no fotossistema II (PSII) e no fotossistema I (PSI) durante a fotossíntese (CAFFARRI et al., 2014). Assim, a mudança do conteúdo de clorofila na folha é amplamente utilizada como um indicador do estado da planta sob condições de estresse abiótico (ABDEL LATEF; TRAN, 2016).

A eficiência quântica é considerada adequada em um intervalo de 0,75 a 0,85  $\mu\text{mol elétrons m}^{-2} \text{s}^{-1}$  e a eficiência fotoquímica pode ser utilizada como um indicador da eficiência máxima do processo fotoquímico no fotossistema II e da atividade fotossintética potencial, apresentando valores normais médios entre 4 e 6  $\mu\text{mol elétrons m}^{-2} \text{s}^{-1}$  (BOLHÀR-NORDENKAMPF; ÖQUIST, 1993).

De acordo com os resultados, tanto a eficiência quântica quanto a fotoquímica foram reduzidas nas plantas de soja submetidas ao estresse salino, porém as plantas com o Si tiveram um comportamento significativamente favorável. Este resultado pode estar relacionado com a diminuição dos pigmentos, clorofilas a e b, clorofilas totais e carotenoides devido possivelmente ao excesso de energia que não pode ser convertido em fluxo de elétrons capaz de causar danos ao aparelho fotossintético (XING et al., 2013).

Além disso, outros estudos mostraram que quando as plantas estão submetidas a condições estressantes como a salinidade, as ROS são acumuladas nos cloroplastos, mitocôndrias e retículo endoplasmático, o que poderia destruir a membrana celular (CAFFARRI et al., 2014; KIM et al., 2018a). Por esta razão, as plantas tratadas com NaCl apresentaram uma diminuição significativa da eficiência quântica quanto a fotoquímica, mas as aplicações de Si R e Si R+F foram capazes de atenuar tais efeitos nas condições de 50 e 100  $\text{mmol L}^{-1}$  de NaCl.

Outros parâmetros como a redução no CRA e EUA nas plantas são efeitos comuns causados pela salinidade (ALOMRAN et al., 2012; CALERO HURTADO et al., 2020; ZHANG; SENGE; DAI, 2016). Sob estresse salino, a redução do CRA é uma resposta geral das plantas que indica que as plantas estão sob estresse osmótico (FAHAD et al., 2015). Os resultados obtidos neste trabalho demonstram que houve uma redução das variáveis na medida em que ocorreu aumento da concentração de NaCl. Este efeito foi atenuado pela aplicação de Si R e Si R+F (Figura 4AB) nas concentrações de 50 e 100  $\text{mmol L}^{-1}$  NaCl. O Si tem um papel fundamental na melhoria do estado da água nas plantas, isto pode estar explicado

pelo aumento do conteúdo de  $K^+$ , e diminuição do  $Na^+$ , além da diminuição da transpiração e o aumento da condutância hidráulica nas raízes (CALERO HURTADO et al., 2020; LIU et al., 2015a). Outros autores afirmam que o Si aumenta a atividade antioxidante e diminui o estresse oxidativo o que favorece o aumento do conteúdo de água na planta e a sua eficiência (ABDELAAL; MAZROU; HAFEZ, 2020; KUMAR et al., 2017; MAHMOOD et al., 2016).

Além disso, os resultados indicam que o Si pode diminuir o conteúdo de malondialdeído (MDA) em plantas de soja sob estresse salino (figura 6AB). A peroxidação de lipídios é um processo induzido nas membranas celulares pelo NaCl. Os danos peroxidativos decorrem principalmente da deterioração oxidativa de ácidos graxos insaturados das membranas pela ação das ERO, como o peróxido de hidrogênio, presentes no interior das células. Este aumento na peroxidação de lipídios tem sido considerado como um sintoma da ocorrência de danos oxidativos nas células, e pode ser considerado como um indicador dos mesmos. Em culturas submetidas ao estresse salino, ocorre a inibição diferencial da síntese de algumas proteínas. Além disso, as ERO, por serem moléculas extremamente reativas, podem causar danos metabólicos irreversíveis pela oxidação de ácidos nucleicos, desnaturação de proteínas e peroxidação de lipídios, podendo resultar em perda de viabilidade celular, comprometendo de forma drástica o desempenho e a produtividade vegetal (CALERO HURTADO et al., 2020; DE AZEVEDO NETO et al., 2006).

Durante a fotossíntese e a respiração, as plantas produzem continuamente ERO que em excesso podem induzir o dano oxidativo (ABDEL LATEF et al., 2018; KIM et al., 2018b). Portanto, as plantas devem eliminar o excesso de ERO para evitar danos às células vegetais, podendo ativar vias de regularização dos sistemas antioxidantes (SHARMA et al., 2012a; WU et al., 2017). De acordo com Racchi, 2013, CAT, SOD e GPOX são classificados como os principais antioxidantes enzimáticos, pois participam da decomposição do  $H_2O_2$  em água. Porém, o excesso de água gerado pela decomposição do  $H_2O_2$  pode diluir o gradiente de concentração dentro da planta, levando à perda de água nos casos em que as plantas estão sob condições de alta salinidade e implicando em maior absorção de íons altamente tóxicos, que podem causar a morte da planta (NOREEN et al., 2021). Os sistemas antioxidantes que eliminam ou reduzem especificamente o  $H_2O_2$ , acabam atuando

como uma barreira de defesa. A APX, por exemplo, atua diretamente na quebra de  $H_2O_2$  (CHAUDHARY; SINGH; SENGAR, 2015; MA et al., 2018).

O Si em todas as formas de aplicação usadas, aumentou a atividade enzimática (Figura 7ABC). A maior atividade das enzimas antioxidantes pode indicar uma intensificação na defesa da planta contra o dano oxidativo (ROY et al., 2016). O tratamento com Si aumentou a atividade da SOD sob estresse salino (Figura 7A). A SOD desempenha um papel importante como a linha de defesa primária, catalisando a dismutação do radical superóxido em peróxido de hidrogênio, que é posteriormente desintoxicado por GOPX e APX ao custo de diferentes substratos (MANIVANNAN et al., 2016; ZHU et al., 2004b).

O aumento da atividade da GPOX e APX (Figuras 7 BC) pode reduzir o possível dano oxidativo causado pelo estresse salino (ROY et al., 2016). Além disso, a APX participa diretamente do ciclo ascorbato-glutationa, onde o  $H_2O_2$  formado pela SOD é reduzido pelo ascorbato (ALVES et al., 2018). Da mesma forma a GPOX é uma enzima antioxidante importante para o metabolismo de polifenóis (GILL; TUTEJA, 2010). A GPOX está envolvida em vários papéis importantes nas plantas, como cascatas salinas e sinalização de ABA, na homeostase redox e catalisação da redução de  $H_2O_2$  ou hidroperóxidos orgânicos em água (PASSAIA et al., 2014; ZHAI et al., 2013). A GPOX pode também estar envolvida em outras partes do metabolismo antioxidante, incluindo a remoção de peróxidos lipídicos (RACCHI, 2013b). O aumento da atividade das enzimas SOD, GOPX e APX podem estar diretamente relacionados à influência que o Si exerce sobre a ativação de forma indireta do sistema de defesa enzimático.

O Si reduz de forma consistente a translocação de elementos como o  $Na^+$  da raiz para a parte aérea e, portanto, seu acúmulo celular nos tecidos foliares, o que pode reduzir as tensões impostas aos tecidos da parte aérea e o estresse oxidativo gerado (ABBAS et al., 2017b; ALI et al., 2013; ALVES et al., 2017; HASANUZZAMAN et al., 2018; XING et al., 2013).

Por outro lado, a prolina é um aminoácido cíclico de baixa massa molecular, sendo um dos principais osmoprotetores reconhecido por regular a tolerância à salinidade em plantas, protegendo a integridade da membrana e estabilizando enzimas/proteínas (AHANGER et al., 2020a, 2020b; KAVI KISHOR; SREENIVASULU, 2014). Além disso, a prolina atua no ajuste osmótico, e por este

motivo, o incremento deste aminoácido pode ser considerado um mecanismo adaptativo de plantas sob estresse salino (IQBAL et al., 2014).

O conteúdo de prolina é um dos mecanismos de adaptação das plantas à salinidade e ao déficit hídrico. Também tem sido amplamente defendido como um índice de seleção para tolerância ao estresse salino (KAFI; RAHIMI, 2011). De acordo com os resultados, o Si aumentou o conteúdo de prolina nas folhas e raízes em plantas de soja sob estresse salino (Figura 8AB) provocando uma melhor adaptação e ajuste osmótico das plantas. Este fato tem sido evidenciado em outras culturas nas quais o Si foi utilizado como atenuante dos efeitos da salinidade. Nas culturas do pepino, manjericão, feijão sob estresse salino o Si regulou o conteúdo de prolina na atenuação dos efeitos do estresse (KALTEH et al., 2014; RADY et al., 2019; ZHU et al., 2020).

Muitas plantas terrestres acumulam concentração notável de Si (ETESAMI; JEONG, 2018) enquanto, na maioria das dicotiledôneas, menos de 0,1 % de Si é encontrado com base na massa seca. Em função da capacidade de absorção de Si, as plantas são categorizadas como altos acumuladores, intermediários ou não acumuladoras. A soja é considerada uma espécie acumuladora intermediária de Si, 0,5 %–1,5% (KHAN et al., 2019). De acordo com os resultados aqui encontrados (Figura 9AB), a soja teve incremento no acúmulo de Si maior na parte aérea, independente da forma de aplicação e tendo em conta o teor pode ser mantida como espécie acumuladora intermediária.

O acúmulo deste elemento influenciou positivamente os processos fisiológicos e bioquímicos da planta sob estresse salino. O comportamento da fotossíntese, transpiração e condutância estomática assim como dos pigmentos e a atividade do fotosistema II, foi significativamente superior nas plantas com Si. Além disso, o CRA e a EUA foram maiores nas plantas com Si. Neste sentido, embora não seja considerado elemento essencial para as plantas, o Si é classificado por muitos autores como benéfico ou útil, pois pode desempenhar um papel importante na atividade metabólica ou fisiológica e/ou estrutural, e melhorar a sobrevivência das plantas expostas a diferentes estresses abióticos e bióticos (LIANG et al., 2015).

Essas observações estão de acordo com os achados anteriores de (LIANG et al., 2007) que mostraram que os mecanismos ativos e passivos operam na absorção de Si e no transporte de Si em espécies intermediárias de acúmulo de Si (girassol).

Uma alta absorção de Si ocorre quando o Si está presente no meio de enraizamento em uma forma solúvel (MA; YAMAJI, 2006). Porém o tratamento Si F também mostrou resultados satisfatórios com diferenças significativas do tratamento sem Si em todas as condições de salinidade, tanto na parte aérea quanto na raiz. Este método é uma alternativa eficiente quando o Si não está disponível no meio de crescimento (CALERO HURTADO et al., 2019, 2020; LIANG et al., 2007).

Sob estresse salino, as plantas acumulam altas concentrações de  $\text{Na}^+$  em comparação com outro cátion como o  $\text{K}^+$  (TAVAKKOLI; RENGASAMY; MCDONALD, 2010) criando problemas fisiológicos e desequilíbrios iônicos (AHMAD et al., 2018; HASEGAWA, 2013; JAMES et al., 2011). Além disso, o  $\text{Na}^+$  é transportado das raízes para as folhas na corrente de transpiração, onde se acumula até causar efeitos tóxicos nas plantas e interfere diretamente no crescimento das plantas (ALVES et al., 2018; BONOMELLI et al., 2018).

Os resultados mostraram que apesar do alto acúmulo de  $\text{Na}^+$  nas plantas sob 50 e 100  $\text{mmol L}^{-1}$  de NaCl, o Si reduziu os conteúdos de  $\text{Na}^+$  e aumentou os conteúdos de  $\text{K}^+$  (Figura 10AB e 11AB). A regulação da razão  $\text{K}^+/\text{Na}^+$  é um mecanismo bem relatado pelo qual o Si alivia a toxicidade do íon  $\text{Na}^+$  (TUNA et al., 2007). O Si se acumula na forma de fitólitos ou corpos discretos de sílica em diferentes partes da planta, por exemplo, raízes, folhas e caule. Essa deposição ocorre abaixo das paredes celulares das raízes, onde corpos discretos de Si se ligam ao Na, resultando no aumento da captação de  $\text{K}^+$  e na redução do transporte de  $\text{Na}^+$  para as regiões superiores da planta. Este fato tem sido relatado por diferentes autores (AHMAD et al., 2014; HURTADO et al., 2021) encontraram que a aplicação exógena de Si provocou a diminuição do acúmulo de Na aumento do acúmulo de  $\text{K}^+$  e melhorou a relação  $\text{K}^+/\text{Na}^+$  na culturas do sorgo, girassol, trigo.

Apesar da salinidade ser fator limitante para o crescimento das plantas, e termos evidenciado este fato, em que as plantas de soja submetidas as concentrações de 50 e 100  $\text{mmol L}^{-1}$  de NaCl tiveram seu crescimento limitado (Figura 12 ABC e figura 13), o Si nas diferentes formas de aplicação atenuou o efeito deletério tanto para a massa seca quanto para área foliar. As plantas que tiveram tratamento com Si tanto foliar como radicular e a combinação F+R e (50, 100  $\text{mmol L}^{-1}$ ) apresentaram maior crescimento quando foram comparadas com as plantas

cultivadas somente na presença de NaCl. Portanto, a aplicação exógena de Si é benéfica na melhoria do crescimento de plantas cultivadas sob estresse salino.

O crescimento da planta está relacionado com a possível tolerância desta as condições estressantes, como a salinidade (ABDEL LATEF et al., 2019), e a evidência de que o Si desempenha um papel favorável no crescimento da planta, nutrição mineral, resistência mecânica e resistência a doenças fúngicas (HAMAYUN ABDUL WALI KHAN et al., 2010b; JANG et al., 2018; RIZWAN et al., 2019). Outros autores reportam que o Si tem influenciado o crescimento das plantas e a tolerância ao estresse salino, proporcionando melhorias nas concentrações de clorofila e nutrientes minerais, status hídrico e produção de frutos. Além disso, a peroxidação lipídica, o vazamento de eletrólitos, os níveis de superóxido e o peróxido de hidrogênio foram reduzidos nos tratamentos com Si (ABDELAAL; MAZROU; HAFEZ, 2020).

Quando o íon sódio ( $\text{Na}^+$ ) e o íon cloreto ( $\text{Cl}^-$ ) estão presentes no solo em concentrações superiores ao normal, as plantas sofrem os efeitos adversos do estresse salino induzido pelo NaCl (TAVAKKOLI; RENGASAMY; MCDONALD, 2010). O estresse salino causa desequilíbrios nutricionais, como toxicidade de íons, degradação do potencial da água e absorção e transporte comprometidos de íons (AHMAD et al., 2019b; ALI et al., 2019). O estresse salino também causa inibição do crescimento em todas as plantas, pois afeta todos os processos necessários para a sobrevivência de uma planta, como crescimento, fotossíntese, metabolismo energético e síntese de proteínas (JANG et al., 2018). O acúmulo de  $\text{Na}^+$  e  $\text{Cl}^-$  na célula vegetal acelera a morte celular programada devido à peroxidação lipídica das membranas celulares causada por um desequilíbrio de íons (KHAN et al., 2019).

De maneira geral, os resultados demonstram que a salinidade provocou alterações e danos no metabolismo das plantas. No entanto, o uso do Si possibilitou que estas alterações e danos fossem reduzidos. Quando as plantas expostas a salinidade foram tratadas com Si, houve aumento de processos importantes como a fotossíntese, a transpiração e a condutância estomática. Além disso, houve maior CRA, EUA e as concentrações dos pigmentos fotossintéticos foram maiores, possibilitando que o FSI e FSII não fossem danificados, além, da eficiência do sistema antioxidante de defesa, com redução da peroxidação lipídica e danos

oxidativos, possibilitando maior eficiência de resposta das plantas frente à condição estressante culminando com o maior crescimento das plantas de soja.

## 6. CONCLUSÃO

O uso de Si pode ser uma estratégia de manejo eficiente para aliviar os efeitos deletérios do sal através de respostas desencadeadas por mecanismos fisiológicos e bioquímicos, induzindo tolerância nas plantas de soja. Dentre os modos de aplicação, o uso de Si R e a aplicação de Si combinada (R+F) são as formas mais eficientes de manejo que podem ser usadas para aliviar os efeitos deletérios e aumentar a tolerância das plantas de soja em condições de estresse salino.

## 7. REFERÊNCIAS

ABBAS, T.; BALAL, R. M.; SHAHID, M. A.; PERVEZ, M. A.; AYYUB, C. M.; AQUEEL, M. A.; JAVAID, M. M. Silicon-induced alleviation of NaCl toxicity in okra (*Abelmoschus esculentus*) is associated with enhanced photosynthesis, osmoprotectants and antioxidant metabolism. **Acta Physiologiae Plantarum**, [s. l.], v. 37, n. 2, p. 1–15, 2015. a.

ABBAS, T.; MUKHTAR, R.; MUHAMMAD, B. •; SHAHID, A.; MUHAMMAD, •; PERVEZ, A.; CHAUDHARY, •; AYYUB, M.; AQUEEL, A.; JAVAID, M. Silicon-induced alleviation of NaCl toxicity in okra (*Abelmoschus esculentus*) is associated with enhanced photosynthesis, osmoprotectants and antioxidant metabolism. **Acta Physiologiae**, [s. l.], 2015. b. Disponível em: <<https://link.springer.com/content/pdf/10.1007/s11738-014-1768-5.pdf>>. Acesso em: 4 fev. 2021.

ABBAS, T.; SATTAR, A.; IJAZ, M.; AATIF, M.; KHALID, S.; SHER, A. Exogenous

silicon application alleviates salt stress in okra. **Horticulture Environment and Biotechnology**, [s. l.], v. 58, n. 4, p. 342–349, 2017. a.

ABDALLA, M. M. Impact of diatomite nutrition on two *Trifolium alexandrinum* cultivars differing in salinity tolerance. **International Journal of Plant Physiology and Biochemistry**, [s. l.], v. 3, n. 13, p. 233–246, 2011. Disponível em: <<http://www.academicjournals.org/ijppb>>. Acesso em: 4 fev. 2021.

ABDEL LATEF, A. A. H.; MOSTOFA, M. G.; RAHMAN, M. M.; ABDEL-FARID, I. B.; TRAN, L. S. P. Extracts from Yeast and Carrot Roots Enhance Maize Performance under Seawater-Induced Salt Stress by Altering Physio-Biochemical Characteristics of Stressed Plants. **Journal of Plant Growth Regulation**, [s. l.], v. 38, n. 3, p. 966–979, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s00344-018-9906-8>>. Acesso em: 5 fev. 2021.

ABDEL LATEF, A. A. H.; SRIVASTAVA, A. K.; EL-SADEK, M. S. A.; KORDROSTAMI, M.; TRAN, L. S. P. Titanium Dioxide Nanoparticles Improve Growth and Enhance Tolerance of Broad Bean Plants under Saline Soil Conditions. **Land Degradation and Development**, [s. l.], v. 29, n. 4, p. 1065–1073, 2018. Disponível em: <<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/ldr.2780>>. Acesso em: 20 jun. 2021.

ABDEL LATEF, A. A.; TRAN, L.-S. P. Impacts of Priming with Silicon on the Growth and Tolerance of Maize Plants to Alkaline Stress. **Frontiers in Plant Science**, [s. l.], v. 7, n. MAR2016, p. 243, 2016. Disponível em: <<http://journal.frontiersin.org/Article/10.3389/fpls.2016.00243/abstract>>. Acesso em: 31 jan. 2021.

ABDELAAL, K. A. A.; MAZROU, Y. S. A.; HAFEZ, Y. M. Silicon Foliar Application Mitigates Salt Stress in Sweet Pepper Plants by Enhancing Water Status, Photosynthesis, Antioxidant Enzyme Activity and Fruit Yield. **Plants**, [s. l.], v. 9, n. 6, p. 733, 2020. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/2223-7747/9/6/733>>. Acesso em: 6 fev. 2021.

ABDELAAL, K. A.; EL-MAGHRABY, L. M.; ELANSARY, H.; HAFEZ, Y. M.; IBRAHIM, E. I.; EL-BANNA, M.; EL-ESAWI, M.; ELKELISH, A. Treatment of Sweet Pepper with Stress Tolerance-Inducing Compounds Alleviates Salinity Stress Oxidative Damage by Mediating the Physio-Biochemical Activities and Antioxidant Systems. **Agronomy**, [s. l.], v. 10, n. 1, p. 26, 2019. Disponível em: <

4395/10/1/26>. Acesso em: 7 fev. 2021.

AHANGER, M. A.; AZIZ, U.; ALSAHLI, A. A.; ALYEMENI, M. N.; AHMAD, P. Influence of exogenous salicylic acid and nitric oxide on growth, photosynthesis, and ascorbate- glutathione cycle in salt stressed vigna angularis. **Biomolecules**, [s. l.], v. 10, n. 1, p. 42, 2020. a. Disponível em: <[www.mdpi.com/journal/biomolecules](http://www.mdpi.com/journal/biomolecules)>. Acesso em: 20 jun. 2021.

AHANGER, M. A.; MIR, R. A.; ALYEMENI, M. N.; AHMAD, P. Combined effects of brassinosteroid and kinetin mitigates salinity stress in tomato through the modulation of antioxidant and osmolyte metabolism. **Plant Physiology and Biochemistry**, [s. l.], v. 147, p. 31–42, 2020. b.

AHMAD, B. Interactive effects of silicon and potassium nitrate in improving salt tolerance of wheat. **Journal of Integrative Agriculture**, [s. l.], v. 13, n. 9, p. 1889–1899, 2014.

AHMAD, P.; AHANGER, M. A.; ALAM, P.; ALYEMENI, M. N.; WIJAYA, L.; ALI, S.; ASHRAF, M. Silicon (Si) Supplementation Alleviates NaCl Toxicity in Mung Bean [*Vigna radiata* (L.) Wilczek] Through the Modifications of Physio-biochemical Attributes and Key Antioxidant Enzymes. **Journal of Plant Growth Regulation**, [s. l.], v. 38, n. 1, p. 70–82, 2019. a. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s00344-018-9810-2>>. Acesso em: 4 fev. 2021.

AHMAD, P.; AHANGER, M. A.; ALYEMENI, M. N.; WIJAYA, L.; ALAM, P.; ASHRAF, M. Mitigation of sodium chloride toxicity in solanum lycopersicum l. By supplementation of jasmonic acid and nitric oxide. **Journal of Plant Interactions**, [s. l.], v. 13, n. 1, p. 64–72, 2018. Disponível em: <<https://www.tandfonline.com/action/journalInformation?journalCode=tjpi20>>. Acesso em: 23 jun. 2021.

AHMAD, P.; AHANGER, M. A.; ALYEMENI, M. N.; WIJAYA, L.; EGAMBERDIEVA, D.; BHARDWAJ, R.; ASHRAF, M. Zinc application mitigates the adverse effects of NaCl stress on mustard [ *Brassica juncea* (L.) Czern & Coss] through modulating compatible organic solutes, antioxidant enzymes, and flavonoid content. **Journal of Plant Interactions**, [s. l.], v. 12, n. 1, p. 429–437, 2017. Disponível em: <<https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/17429145.2017.1385867>>. Acesso em: 8 fev. 2021.

AHMAD, P.; OZTURK, M.; SHARMA, S.; GUCEL, S. Effect of sodium carbonate-

induced salinity-alkalinity on some key osmoprotectants, protein profile, antioxidant enzymes, and lipid peroxidation in two mulberry (*Morus alba* L.) cultivars. **Journal of Plant Interactions**, [s. l.], v. 9, n. 1, p. 460–467, 2014.

AL MURAD, M.; KHAN, A. L.; MUNEER, S. Silicon in Horticultural Crops: Cross-talk, Signaling, and Tolerance Mechanism under Salinity Stress. **Plants**, [s. l.], v. 9, n. 4, p. 460, 2020. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/2223-7747/9/4/460>>. Acesso em: 7 fev. 2021.

ALI, S.; FAROOQ, M. A.; YASMEEN, T.; HUSSAIN, S.; ARIF, M. S.; ABBAS, F.; BHARWANA, S. A.; ZHANG, G. The influence of silicon on barley growth, photosynthesis and ultra-structure under chromium stress. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, [s. l.], v. 89, p. 66–72, 2013.

ALI, S.; RIZWAN, M.; HUSSAIN, A.; ZIA UR REHMAN, M.; ALI, B.; YOUSAF, B.; WIJAYA, L.; ALYEMENI, M. N.; AHMAD, P. Silicon nanoparticles enhanced the growth and reduced the cadmium accumulation in grains of wheat (*Triticum aestivum* L.). **Plant Physiology and Biochemistry**, [s. l.], v. 140, p. 1–8, 2019.

ALOMRAN, A. M.; AL-HARBI, A. A. R.; WAHB-ALLAH, M. A.; ALWABEL, M. A.; NADEEM, M. E. A.; AL-ETER, A. **Management of Irrigation Water Salinity in Greenhouse Tomato Production under Calcareous Sandy Soil and Drip Irrigation**. **J. Agr. Sci. Tech.** [s.l: s.n.].

ALSAEEDI, A.; EL-RAMADY, H.; ALSHAAL, T.; EL-GARAWANY, M.; ELHAWAT, N.; AL-OTAIBI, A. Silica nanoparticles boost growth and productivity of cucumber under water deficit and salinity stresses by balancing nutrients uptake. **Plant Physiology and Biochemistry**, [s. l.], v. 139, p. 1–10, 2019.

ALVES, R. de C.; DE MEDEIROS, A. S.; NICOLAU, M. C. M.; OLIVEIRA, F. de A.; LIMA, L. W.; AROUCHA, E. M. M.; GRATÃO, P. L. Influence of partial root-zone saline irrigation management on tomato yield and fruit quality from a potted-plant study. **HortScience**, [s. l.], v. 53, n. 9, p. 1326–1331, 2018. Disponível em: <<https://repositorio.unesp.br/handle/11449/188166>>. Acesso em: 7 fev. 2021.

ALVES, R.; REZENDE, L. S.; DÓRIA, J.; SOARES, R.; OLIVEIRA, H.; SANTOS, D.; PASQUAL, M.; ALVES BRAGA JUNIOR, R.; OLIVEIRA REIS, R.; RODRIGUES, F. A.; RAMOS, J. D. Effects of silicon on antioxidant enzymes, CO<sub>2</sub>, proline and biological activity of in vitro-grown cape gooseberry under salinity stress. **AJCS**, [s. l.], v. 11, n. 04, p. 1835–2707, 2017.

ANDERSON, J. V.; DAVIS, D. G. Abiotic stress alters transcript profiles and activity of glutathione S-transferase, glutathione peroxidase, and glutathione reductase in *Euphorbia esula*. **Physiologia Plantarum**, [s. l.], v. 120, n. 3, p. 421–433, 2004. Disponível em: <<https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/15032839/>>. Acesso em: 27 jun. 2021.

APEL, K.; HIRT, H. **Reactive oxygen species: Metabolism, oxidative stress, and signal transduction**, Annual Reviews, 2004. Disponível em: <[www.annualreviews.org](http://www.annualreviews.org)>. Acesso em: 28 jun. 2021.

ASHRAF, M.; RAHMATULLAH; AFZAL, M.; AHMED, R.; MUJEEB, F.; SARWAR, A.; ALI, L. Alleviation of detrimental effects of NaCl by silicon nutrition in salt-sensitive and salt-tolerant genotypes of sugarcane (*Saccharum officinarum* L.). **Plant and Soil**, [s. l.], v. 326, n. 1, p. 381–391, 2010. Disponível em: <<https://link.springer.com/article/10.1007/s11104-009-0019-9>>. Acesso em: 29 jun. 2021.

BATAGLIA, O.C., TEIXEIRA, J.P.F., FURLANI, P.R., FURLANI, A.M.C., GALLO, J.R. 1978. Métodos de análise química de plantas, 1st ed. Instituto Agronômico de Campinas, Campinas.

BARBOSA, J.; MALDONADO, W. **Experimentação agrônômica e AgroEstat: sistema para análises estatísticas de ensaios agrônômicos** Departamento de Ciências Exatas - Universidade Estadual Paulista (UNESP. [s.l: s.n.]. Disponível em:

<[https://scholar.google.com/scholar\\_lookup?hl=en&publication\\_year=2015&author=J+Barbosa&author=J+Maldonado&title=Experimentação+agrônômica+e+AgroEstat%3A+sistema+para+análises+estatísticas+de+ensaios+agrônômicos](https://scholar.google.com/scholar_lookup?hl=en&publication_year=2015&author=J+Barbosa&author=J+Maldonado&title=Experimentação+agrônômica+e+AgroEstat%3A+sistema+para+análises+estatísticas+de+ensaios+agrônômicos)>. Acesso em: 9 fev. 2021.

BARRS, H.; WEATHERLEY, P. A Re-Examination of the Relative Turgidity Technique for Estimating Water Deficits in Leaves. **Australian Journal of Biological Sciences**, [s. l.], v. 15, n. 3, p. 413, 1962. Disponível em: <<https://www.publish.csiro.au/bi/bi9620413>>. Acesso em: 8 fev. 2021.

BATES, L. S.; WALDREN, R. P.; TEARE, I. D. Rapid determination of free proline for water-stress studies. **Plant and Soil**, [s. l.], v. 39, n. 1, p. 205–207, 1973.

BELLALLOUI, N.; HU, Y.; MENGISTU, A.; KASSEM, M. A.; ABEL, C. A. Effects of foliar boron application on seed composition, cell wall boron, and seed  $\delta^{15}\text{N}$  and

$\delta^{13}\text{C}$  isotopes in water-stressed soybean plants. **Frontiers in Plant Science**, [s. l.], v. 4, n. JUL, p. 270, 2013. Disponível em: <<http://journal.frontiersin.org/article/10.3389/fpls.2013.00270/abstract>>. Acesso em: 7 fev. 2021.

BHARGAVA, A.; SRIVASTAVA, S. Response of *Amaranthus* sp. to Salinity Stress: A Review. In: [s.l.] : Springer, Cham, 2020. p. 245–263.

BOLHÀR-NORDENKAMPF, H. R.; ÖQUIST, G. Chlorophyll fluorescence as a tool in photosynthesis research. In: **Photosynthesis and Production in a Changing Environment**. [s.l.] : Springer Netherlands, 1993. p. 193–206.

BONOMELLI, C.; CELIS, V.; LOMBARDI, G.; MÁRTIZ, J. Salt stress effects on avocado (*persea americana* mill.) plants with and without seaweed extract (*ascophyllum nodosum*) application. **Agronomy**, [s. l.], v. 8, n. 5, p. 64, 2018. Disponível em: <[www.mdpi.com/journal/agronomy](http://www.mdpi.com/journal/agronomy)>. Acesso em: 23 jun. 2021.

BOSE, J.; RODRIGO-MORENO, A.; LAI, D.; XIE, Y.; SHEN, W.; SHABALA, S. Rapid regulation of the plasma membrane  $\text{H}^+$ -ATPase activity is essential to salinity tolerance in two halophyte species, *Atriplex lentiformis* and *Chenopodium quinoa*. **Annals of Botany**, [s. l.], v. 115, n. 3, p. 481–494, 2015. Disponível em: <[www.aob.oxfordjournals.org](http://www.aob.oxfordjournals.org)>. Acesso em: 27 jun. 2021.

BRADFORD, M. M. A rapid and sensitive method for the quantitation of microgram quantities of protein utilizing the principle of protein-dye binding. **Analytical Biochemistry**, [s. l.], v. 72, n. 1–2, p. 248–254, 1976.

BUSTINGORRI, C.; LAVADO, R. S. Soybean growth under stable versus peak salinity. **Scientia Agricola**, [s. l.], v. 68, n. 1, p. 102–108, 2011. Disponível em: <[http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0103-90162011000100015&lng=en&nrm=iso&tlng=en](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0103-90162011000100015&lng=en&nrm=iso&tlng=en)>. Acesso em: 2 mar. 2021.

CAFFARRI, S.; TIBILETTI, T.; JENNINGS, R.; SANTABARBARA, S. A Comparison Between Plant Photosystem I and Photosystem II Architecture and Functioning. **Current Protein & Peptide Science**, [s. l.], v. 15, n. 4, p. 296–331, 2014. Disponível em: <<http://www.eurekaselect.com/openurl/content.php?genre=article&issn=1389-2037&volume=15&issue=4&spage=296>>. Acesso em: 31 jan. 2021.

CALERO HURTADO, A.; APARECIDA CHICONATO, D.; DE MELLO PRADO, R.; DA SILVEIRA SOUSA JUNIOR, G.; FELISBERTO, G. Silicon attenuates sodium toxicity by improving nutritional efficiency in sorghum and sunflower plants. **Plant**

**Physiology and Biochemistry**, [s. l.], v. 142, p. 224–233, 2019.

CALERO HURTADO, A.; CHICONATO, D. A.; PRADO, R. de M.; SOUSA JUNIOR, G. da S.; GRATÃO, P. L.; FELISBERTO, G.; OLIVERA VICIEDO, D.; MATHIAS DOS SANTOS, D. M. Different methods of silicon application attenuate salt stress in sorghum and sunflower by modifying the antioxidative defense mechanism. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, [s. l.], v. 203, p. 110964, 2020.

CASSIA, R.; NOCIONI, M.; CORREA-ARAGUNDE, N.; LAMATTINA, L. **Climate change and the impact of greenhouse gasses: CO<sub>2</sub> and NO, friends and foes of plant oxidative stress**, Frontiers Media S.A., 2018. Disponível em: <[www.frontiersin.org](http://www.frontiersin.org)>. Acesso em: 27 jun. 2021.

CHAUDHARY, A.; SINGH, A.; SENGAR, R. S. ANTIOXIDANT ACTIVITY IN RICE UNDER SALINITY STRESS : AN OVERVIEW. [s. l.], v. 15, n. 1, p. 7–13, 2015.

CHHABRA, R. **Soil salinity and water quality**. [s.l.] : CRC Press, 2017. Disponível em: <<https://www.taylorfrancis.com/books/soil-salinity-water-quality-ranbir-chhabra/10.1201/9780203739242>>. Acesso em: 25 fev. 2021.

CHUNG, Y. S.; KIM, K.-S.; HAMAYUN, M.; KIM, Y. Silicon Confers Soybean Resistance to Salinity Stress Through Regulation of Reactive Oxygen and Reactive Nitrogen Species. **Frontiers in Plant Science**, [s. l.], v. 10, p. 1, 2020. Disponível em: <<https://www.frontiersin.org/article/10.3389/fpls.2019.01725/full>>. Acesso em: 31 jan. 2021.

COSKUN, D.; DESHMUKH, R.; SONAH, H.; MENZIES, J. G.; REYNOLDS, O.; MA, J. F.; KRONZUCKER, H. J.; BÉLANGER, R. R. The controversies of silicon's role in plant biology. **New Phytologist**, [s. l.], v. 221, p. 67–85, 2019.

DE AZEVEDO NETO, A. D.; PRISCO, J. T.; ENÉAS-FILHO, J.; ABREU, C. E. B. De; GOMES-FILHO, E. Effect of salt stress on antioxidative enzymes and lipid peroxidation in leaves and roots of salt-tolerant and salt-sensitive maize genotypes. **Environmental and Experimental Botany**, [s. l.], v. 56, n. 1, p. 87–94, 2006.

DESHMUKH, R. K.; MA, J. F.; BÉLANGER, R. R. **Editorial: Role of silicon in plants**, Frontiers Media S.A., 2017. Disponível em: <[www.frontiersin.org](http://www.frontiersin.org)>. Acesso em: 28 jun. 2021.

ELHAMID, E. M. A.; SADAK, M. S.; TAWFIK, M. M. Alleviation of Adverse Effects of Salt Stress in Wheat Cultivars by Foliar Treatment with Antioxidant 2—Changes in Some Biochemical Aspects, Lipid Peroxidation, Antioxidant Enzymes and Amino

Acid Contents. **Agricultural Sciences**, [s. l.], v. 05, n. 13, p. 1269–1280, 2014. Disponível em:

<<http://www.scirp.org/journal/as><http://dx.doi.org/10.4236/as.2014.513135><http://dx.doi.org/10.4236/as.2014.513135><http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>>. Acesso em: 7 fev. 2021.

ELKEILSH, A.; AWAD, Y. M.; SOLIMAN, M. H.; ABU-ELSAOUD, A.; ABDELHAMID, M. T.; EL-METWALLY, I. M. Exogenous application of  $\beta$ -sitosterol mediated growth and yield improvement in water-stressed wheat (*Triticum aestivum*) involves up-regulated antioxidant system. **Journal of Plant Research**, [s. l.], v. 132, n. 6, p. 881–901, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s10265-019-01143-5>>. Acesso em: 7 fev. 2021.

EMBRAPA. Limpeza de Areia para Experimentos em Nutrição de Plantas. [s. l.], n. 232, p. 1–5, 2018.

EPSTEIN, E. Silicon. **Annual Review of Plant Biology**, [s. l.], v. 50, p. 641–664, 1999. Disponível em: <[www.annualreviews.org](http://www.annualreviews.org)>. Acesso em: 28 jun. 2021.

ETESAMI, H.; JEONG, B. R. **Silicon (Si): Review and future prospects on the action mechanisms in alleviating biotic and abiotic stresses in plants**, Academic Press, 2018.

ETESAMI, H.; NOORI, F. Soil Salinity as a Challenge for Sustainable Agriculture and Bacterial-Mediated Alleviation of Salinity Stress in Crop Plants. In: **Saline Soil-based Agriculture by Halotolerant Microorganisms**. [s.l.] : Springer Singapore, 2019. p. 1–22.

EVANS, J. R. **Improving photosynthesis**, American Society of Plant Biologists, 2013. Disponível em: <[www.plantphysiol.org/cgi/doi/10.1104/pp.113.219006](http://www.plantphysiol.org/cgi/doi/10.1104/pp.113.219006)>. Acesso em: 31 jan. 2021.

FAHAD, S.; HUSSAIN, S.; MATLOOB, A.; KHAN, F. A.; KHALIQ, A.; SAUD, S.; HASSAN, S.; SHAN, D.; KHAN, F.; ULLAH, N.; FAIQ, M.; KHAN, M. R.; TAREEN, A. K.; KHAN, A.; ULLAH, A.; ULLAH, N.; HUANG, J. **Phytohormones and plant responses to salinity stress: a review**, Kluwer Academic Publishers, 2015. Disponível em: <<https://link.springer.com/article/10.1007/s10725-014-0013-y>>. Acesso em: 4 fev. 2021.

FARHANGI-ABRIZ, S.; TORABIAN, S. Nano-silicon alters antioxidant activities of soybean seedlings under salt toxicity. **Protoplasma**, [s. l.], v. 255, n. 3, p. 953–962,

2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s00709-017-1202-0>>. Acesso em: 28 fev. 2021.

FREW, A.; WESTON, L. A.; REYNOLDS, O. L.; GURR, G. M. The role of silicon in plant biology: A paradigm shift in research approach. **Annals of Botany**, [s. l.], v. 121, n. 7, p. 1265–1273, 2018.

GAO, S.; MOBLEY, A.; MILLER, C.; BOKLAN, J.; CHANDRA, J. Potentiation of reactive oxygen species is a marker for synergistic cytotoxicity of MS-275 and 5-azacytidine in leukemic cells. **Leukemia Research**, [s. l.], v. 32, n. 5, p. 771–780, 2008.

GIANNOPOLITIS, C. N.; RIES, S. K. Superoxide dismutases: I. Occurrence in higher plants. **Plant physiology**, [s. l.], v. 59, n. 2, p. 309–14, 1977. Disponível em: <<http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/16659839>>. Acesso em: 27 jun. 2021.

GILL, S. S.; TUTEJA, N. **Reactive oxygen species and antioxidant machinery in abiotic stress tolerance in crop plants**, Elsevier Masson, 2010.

GOMES, M. A. D. C.; PESTANA, I. A.; SANTA-CATARINA, C.; HAUSER-DAVIS, R. A.; SUZUKI, M. S. Efeito da salinidade sobre pigmentos fotossintéticos, prolina, biomassa e óxido nítrico em salvinia auriculata aubl. **Acta Limnologica Brasiliensia**, [s. l.], v. 29, p. 9, 2017. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1590/S2179-975X4716>>. Acesso em: 31 jan. 2021.

GRATÃO, P. L.; MONTEIRO, C. C.; TEZOTTO, T.; CARVALHO, R. F.; ALVES, L. R.; PETERS, L. P.; AZEVEDO, R. A. Cadmium stress antioxidant responses and root-to-shoot communication in grafted tomato plants. **BioMetals**, [s. l.], v. 28, n. 5, p. 803–816, 2015. Disponível em: <<https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/26077192/>>. Acesso em: 7 fev. 2021.

GRATÃO, P. L.; POLLE, A.; LEA, P. J.; AZEVEDO, R. A. **Making the life of heavy metal-stressed plants a little easier**, CSIRO PUBLISHING, 2005. Disponível em: <<https://www.publish.csiro.au/fp/FP05016>>. Acesso em: 4 jul. 2021.

GUERRIERO, G.; HAUSMAN, J. F.; LEGAY, S. **Silicon and the plant extracellular matrix**, Frontiers Media S.A., 2016. Disponível em: <[www.frontiersin.org](http://www.frontiersin.org)>. Acesso em: 28 jun. 2021.

GUPTA, B.; HUANG, B. **Mechanism of salinity tolerance in plants: Physiological, biochemical, and molecular characterization**, Hindawi Publishing Corporation, 2014.

HAMAYUN ABDUL WALI KHAN, M.; AFZAL KHAN, S.; LATIF KHAN, A.; KHAN SHINWARI, Z. **Effect of salt stress on growth attributes and endogenous growth hormones of soybean cultivar Hwangkeumkong Seed germination of halophytes** View project **Metagenomics of rhizospheric microbial communities** View project **Article in Pakistan Journal of Botany**. [s.l: s.n.]. Disponível em: <<https://www.researchgate.net/publication/230845231>>. Acesso em: 1 fev. 2021a.

HAMAYUN ABDUL WALI KHAN, M.; AFZAL KHAN, S.; LATIF KHAN, A.; KHAN SHINWARI, Z. **Effect of salt stress on growth attributes and endogenous growth hormones of soybean cultivar Hwangkeumkong Ethno-medicinal plants of Tahsil Barawal Bandi Dir Upper Khyber Pakhtunkhwa Pakistan** View project **Article in Pakistan Journal of Botany**. [s.l: s.n.]. Disponível em: <<https://www.researchgate.net/publication/230845231>>. Acesso em: 5 fev. 2021b.

HANIN, M.; EBEL, C.; NGOM, M.; LAPLAZE, L.; MASMOUDI, K. **New insights on plant salt tolerance mechanisms and their potential use for breeding**, Frontiers Research Foundation, 2016. Disponível em: <[www.frontiersin.org](http://www.frontiersin.org)>. Acesso em: 31 jan. 2021.

HASANUZZAMAN, M.; NAHAR, K.; ROHMAN, M. M.; ANEE, T. I.; HUANG, Y.; FUJITA, M. Exogenous Silicon Protects Brassica napus Plants from Salinity-Induced Oxidative Stress Through the Modulation of AsA-GSH Pathway, Thiol-Dependent Antioxidant Enzymes and Glyoxalase Systems. **Gesunde Pflanzen**, [s. l.], v. 70, n. 4, p. 185–194, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s10343-018-0430-3>>. Acesso em: 21 jun. 2021.

HASEGAWA, P. M. Sodium (Na<sup>+</sup>) homeostasis and salt tolerance of plants. **Environmental and Experimental Botany**, [s. l.], v. 92, p. 19–31, 2013.

HASHEMI, A.; ABDOLZADEH, A.; SADEGHIPOUR, H. R. Beneficial effects of silicon nutrition in alleviating salinity stress in hydroponically grown canola, Brassica napus L., plants. **Soil Science and Plant Nutrition**, [s. l.], v. 56, n. 2, p. 244–253, 2010. Disponível em:

<<https://www.tandfonline.com/action/journalInformation?journalCode=tssp20>>.

Acesso em: 29 jun. 2021.

HIPPLER, F. W. R.; BOARETTO, R. M.; QUAGGIO, J. A.; AZEVEDO, R. A.; MATTOS, D. Towards soil management with Zn and Mn: Estimates of fertilisation efficacy of Citrus trees. **Annals of Applied Biology**, [s. l.], v. 166, n. 3, p. 484–495,

2015. Disponível em: <<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1111/aab.12197>>. Acesso em: 4 jul. 2021.

HOAGLAND, D. R.; ARNON, D. I. The water-culture method for growing plants without soil. **Circular. California Agricultural Experiment Station**, [s. l.], v. 347, n. 2, p. 1–32, 1950.

HURTADO, A. C.; CHICONATO, D. A.; DE MELLO PRADO, R.; DA SILVEIRA SOUSA JUNIOR, G.; VICIEDO, D. O.; DÍAZ, Y. P.; CALZADA, K. P.; GRATÃO, P. L. Silicon Alleviates Sodium Toxicity in Sorghum and Sunflower Plants by Enhancing Ionic Homeostasis in Roots and Shoots and Increasing Dry Matter Accumulation. **Silicon**, [s. l.], v. 13, n. 2, p. 475–486, 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s12633-020-00449-7>>. Acesso em: 23 jun. 2021.

IGHODARO, O. M.; AKINLOYE, O. A. First line defence antioxidants-superoxide dismutase (SOD), catalase (CAT) and glutathione peroxidase (GPX): Their fundamental role in the entire antioxidant defence grid. **Alexandria Journal of Medicine**, [s. l.], v. 54, n. 4, p. 287–293, 2018.

IQBAL, N.; UMAR, S.; KHAN, N. A.; KHAN, M. I. R. **A new perspective of phytohormones in salinity tolerance: Regulation of proline metabolism**, 2014.

JAMES, R. A.; BLAKE, C.; BYRT, C. S.; MUNNS, R. Major genes for Na<sup>+</sup> exclusion, Nax1 and Nax2 (wheat HKT1;4 and HKT1;5), decrease Na<sup>+</sup> accumulation in bread wheat leaves under saline and waterlogged conditions. **Journal of Experimental Botany**, [s. l.], v. 62, n. 8, p. 2939–2947, 2011. Disponível em: <[http://jxb.oxfordjournals.org/open\\_access.html](http://jxb.oxfordjournals.org/open_access.html)>. Acesso em: 23 jun. 2021.

JAMIL, A.; RIAZ, S.; ASHRAF, M.; FOOLAD, M. R. **Gene expression profiling of plants under salt stress**, Taylor & Francis Group, 2011. Disponível em: <<https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/07352689.2011.605739>>. Acesso em: 15 fev. 2021.

JANG, S. W.; KIM, Y.; KHAN, A. L.; NA, C. I.; LEE, I. J. Exogenous short-term silicon application regulates macro-nutrients, endogenous phytohormones, and protein expression in *Oryza sativa* L. **BMC Plant Biology**, [s. l.], v. 18, n. 1, p. 1–12, 2018. Disponível em: <<https://link.springer.com/articles/10.1186/s12870-017-1216-y>>. Acesso em: 5 fev. 2021.

JASPERS, P.; KANGASJÄRVI, J. **Reactive oxygen species in abiotic stress signaling**, John Wiley & Sons, Ltd, 2010. Disponível em:

<<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1111/j.1399-3054.2009.01321.x>>. Acesso em: 28 jun. 2021.

JIANG, J.; SU, M.; CHEN, Y.; GAO, N.; JIAO, C.; SUN, Z.; LI, F.; WANG, C. Correlation of drought resistance in grass pea (*Lathyrus sativus*) with reactive oxygen species scavenging and osmotic adjustment. **Biologia (Poland)**, [s. l.], v. 68, n. 2, p. 231–240, 2013. Disponível em: <<https://link.springer.com/article/10.2478/s11756-013-0003-y>>. Acesso em: 28 jun. 2021.

KAFI, M.; RAHIMI, Z. Effect of salinity and silicon on root characteristics, growth, water status, proline content and ion accumulation of purslane (*Portulaca oleracea* L.). **Soil Science and Plant Nutrition**, [s. l.], v. 57, n. 2, p. 341–347, 2011.

KALANAKI, M.; RITZEMA, H.; BAMSHAD, R.; JONES, E.; FAZILATNIA, M. Application of bio-desalinization for reclamation of salt-affected soil under composted cow manure and deficit irrigation with saline water. **Paddy and Water Environment**, [s. l.], v. 18, n. 2, p. 469–479, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s10333-020-00795-7>>. Acesso em: 27 jun. 2021.

KALTEH, M.; TAJ ALIPOUR, Z.; ASHRAF, S.; ALIABADI, M. M.; NOSRATABADI, A. F. **Effect of silica Nanoparticles on Basil (*Ocimum basilicum*) Under Salinity Stress** *Journal of Chemical Health Risks*. [s.l.] : Islamic Azad University, Damghan Branch, Islamic Republic of Iran, 2014. Disponível em: <[http://www.jchr.org/article\\_544075.html](http://www.jchr.org/article_544075.html)>. Acesso em: 20 jun. 2021.

KAVI KISHOR, P. B.; SREENIVASULU, N. **Is proline accumulation per se correlated with stress tolerance or is proline homeostasis a more critical issue?**, John Wiley & Sons, Ltd, 2014. Disponível em: <<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1111/pce.12157>>. Acesso em: 20 jun. 2021.

KHAN, A.; KHAN, A. L.; MUNEER, S.; KIM, Y. H.; AL-RAWAHI, A.; AL-HARRASI, A. **Silicon and Salinity: Crosstalk in Crop-Mediated Stress Tolerance Mechanisms**, Frontiers Media S.A., 2019. Disponível em: <[www.frontiersin.org](http://www.frontiersin.org)>. Acesso em: 4 fev. 2021.

KHAN, W.; AZIZ, T.; MAQSOOD, M.; FAROOQ, M.; ABDULLAH, Y.; RAMZANI, P.; BILAL, H. Silicon nutrition mitigates salinity stress in maize by modulating ion accumulation, photosynthesis, and antioxidants. **Photosynthetica**, [s. l.], v. 56, n. 4, p. 1047–1057, 2018.

KIM, Y.-H.; HWANG, S.-J.; WAQAS, M.; KHAN, A. L.; LEE, J.-H.; LEE, J.-D.; NGUYEN, H. T.; LEE, I.-J. Comparative analysis of endogenous hormones level in two soybean (*Glycine max* L.) lines differing in waterlogging tolerance. **Frontiers in Plant Science**, [s. l.], v. 6, n. September, p. 714, 2015. Disponível em: <<http://journal.frontiersin.org/Article/10.3389/fpls.2015.00714/abstract>>. Acesso em: 7 fev. 2021.

KIM, Y. H.; KHAN, A. L.; WAQAS, M.; LEE, I. J. Silicon regulates antioxidant activities of crop plants under abiotic-induced oxidative stress: A review. **Frontiers in Plant Science**, [s. l.], v. 8, p. 510, 2017. Disponível em: <[www.frontiersin.org](http://www.frontiersin.org)>. Acesso em: 28 jun. 2021.

KIM, Y. H.; KHAN, A. L.; WAQAS, M.; SHIM, J. K.; KIM, D. H.; LEE, K. Y.; LEE, I. J. Silicon Application to Rice Root Zone Influenced the Phytohormonal and Antioxidant Responses Under Salinity Stress. **Journal of Plant Growth Regulation**, [s. l.], v. 33, n. 2, p. 137–149, 2014. a.

KIM, Y. H.; KHAN, A. L.; WAQAS, M.; SHIM, J. K.; KIM, D. H.; LEE, K. Y.; LEE, I. J. Silicon Application to Rice Root Zone Influenced the Phytohormonal and Antioxidant Responses Under Salinity Stress. **Journal of Plant Growth Regulation**, [s. l.], v. 33, n. 2, p. 137–149, 2014. b. Disponível em: <<https://link.springer.com/article/10.1007/s00344-013-9356-2>>. Acesso em: 28 jun. 2021.

KIM, Y.; MUN, B.-G.; KHAN, A. L.; WAQAS, M.; KIM, H.-H.; SHAHZAD, R.; IMRAN, M.; YUN, B.-W.; LEE, I.-J. Regulation of reactive oxygen and nitrogen species by salicylic acid in rice plants under salinity stress conditions. **PLOS ONE**, [s. l.], v. 13, n. 3, p. e0192650, 2018. a. Disponível em: <<https://dx.plos.org/10.1371/journal.pone.0192650>>. Acesso em: 31 jan. 2021.

KIM, Y.; MUN, B. G.; KHAN, A. L.; WAQAS, M.; KIM, H. H.; SHAHZAD, R.; IMRAN, M.; YUN, B. W.; LEE, I. J. Regulation of reactive oxygen and nitrogen species by salicylic acid in rice plants under salinity stress conditions. **PLoS ONE**, [s. l.], v. 13, n. 3, p. e0192650, 2018. b. Disponível em: <<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0192650>>. Acesso em: 20 jun. 2021.

KRASKA, J. E.; BREITENBECK, G. A. Simple, Robust Method for Quantifying Silicon in Plant Tissue. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, [s. l.], v. 41, n. 17, p. 2075–2085, 2010. Disponível em:

<<http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/00103624.2010.498537>>. Acesso em: 8 fev. 2021.

KUMAR, S.; MILSTEIN, Y.; BRAMI, Y.; ELBAUM, M.; ELBAUM, R. Mechanism of silica deposition in sorghum silica cells. **New Phytologist**, [s. l.], v. 213, n. 2, p. 791–798, 2017. Disponível em: <<http://doi.wiley.com/10.1111/nph.14173>>. Acesso em: 4 fev. 2021.

LEE, S. K.; SOHN, E. Y.; HAMAYUN, M.; YOON, J. Y.; LEE, I. J. Effect of silicon on growth and salinity stress of soybean plant grown under hydroponic system. **Agroforest Syst**, [s. l.], v. 80, p. 333–340, 2010. a.

LEE, S. K.; SOHN, E. Y.; HAMAYUN, M.; YOON, J. Y.; LEE, I. J. Effect of silicon on growth and salinity stress of soybean plant grown under hydroponic system. **Agroforestry Systems**, [s. l.], v. 80, n. 3, p. 333–340, 2010. b. Disponível em: <<https://link.springer.com/article/10.1007/s10457-010-9299-6>>. Acesso em: 28 fev. 2021.

LIANG, W.; MA, X.; WAN, P.; LIU, L. **Plant salt-tolerance mechanism: A review**, Elsevier B.V., 2018.

LIANG, Y.; CHEN, Q.; LIU, Q.; ZHANG, W.; DING, R. Exogenous silicon (Si) increases antioxidant enzyme activity and reduces lipid peroxidation in roots of salt-stressed barley (*Hordeum vulgare* L.). **Journal of Plant Physiology**, [s. l.], v. 160, n. 10, p. 1157–1164, 2003.

LIANG, Y.; NIKOLIC, M.; BÉLANGER, R.; GONG, H.; SONG, A. **Silicon in agriculture: From theory to practice**. [s.l.] : Springer Netherlands, 2015.

LIANG, Y.; SUN, W.; ZHU, Y. G.; CHRISTIE, P. Mechanisms of silicon-mediated alleviation of abiotic stresses in higher plants: A review. **Environmental Pollution**, [s. l.], v. 147, n. 2, p. 422–428, 2007.

LICHTENTHALER, H. K. Chlorophylls and Carotenoids: Pigments of Photosynthetic Biomembranes. **Methods in Enzymology**, [s. l.], v. 148, n. C, p. 350–382, 1987.

LICHTENTHALER, H. K.; BUSCHMANN, C.; KNAPP, M. How to correctly determine the different chlorophyll fluorescence parameters and the chlorophyll fluorescence decrease ratio RFd of leaves with the PAM fluorometer. **Photosynthetica**, [s. l.], v. 43, n. 3, p. 379–393, 2005.

LIU, P.; YIN, L.; WANG, S.; ZHANG, M.; DENG, X.; ZHANG, S.; TANAKA, K. Enhanced root hydraulic conductance by aquaporin regulation accounts for silicon

alleviated salt-induced osmotic stress in sorghum bicolor L. **Environmental and Experimental Botany**, [s. l.], v. 111, p. 42–51, 2015. a.

LIU, S. L.; YANG, R. J.; MA, M. D.; DAN, F.; ZHAO, Y.; JIANG, P.; WANG, M. H. Effects of exogenous NO on the growth, mineral nutrient content, antioxidant system, and ATPase activities of *Trifolium repens* L. plants under cadmium stress. **Acta Physiologiae Plantarum**, [s. l.], v. 37, n. 1, 2015. b.

LIU, Y.; YU, L.; QU, Y.; CHEN, J.; LIU, X.; HONG, H.; LIU, Z.; CHANG, R.; GILLIHAM, M.; QIU, L.; GUAN, R. GmSALT3, Which Confers Improved Soybean Salt Tolerance in the Field, Increases Leaf Cl<sup>-</sup> Exclusion Prior to Na<sup>+</sup> Exclusion But Does Not Improve Early Vigor under Salinity. **Frontiers in Plant Science**, [s. l.], v. 7, n. September 2016, p. 1485, 2016. Disponível em: <<http://journal.frontiersin.org/Article/10.3389/fpls.2016.01485/abstract>>. Acesso em: 7 fev. 2021.

MA, H.; BRENNAN, A.; DIAMOND, S. A. Photocatalytic reactive oxygen species production and phototoxicity of titanium dioxide nanoparticles are dependent on the solar ultraviolet radiation spectrum. **Environmental Toxicology and Chemistry**, [s. l.], v. 31, n. 9, p. 2099–2107, 2012. Disponível em: <<https://setac.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/etc.1916>>. Acesso em: 28 jun. 2021.

MA, J. F.; YAMAJI, N. **Silicon uptake and accumulation in higher plants**, Elsevier Current Trends, 2006.

MA, J. F.; YAMAJI, N. **Functions and transport of silicon in plants**, Springer, 2008. Disponível em: <<https://link.springer.com/article/10.1007/s00018-008-7580-x>>. Acesso em: 28 jun. 2021.

MA, N. L.; CHE LAH, W. A.; KADIR, N. A.; MUSTAQIM, M.; RAHMAT, Z.; AHMAD, A.; LAM, S. D.; ISMAIL, M. R. Susceptibility and tolerance of rice crop to salt threat: Physiological and metabolic inspections. **PLoS ONE**, [s. l.], v. 13, n. 2, p. e0192732, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0192732>>. Acesso em: 25 jun. 2021.

MACHADO, R. M. A.; SERRALHEIRO, R. P. **Soil salinity: Effect on vegetable crop growth. Management practices to prevent and mitigate soil salinization**, MDPI Multidisciplinary Digital Publishing Institute, 2017. Disponível em: <[www.mdpi.com/journal/horticulturae](http://www.mdpi.com/journal/horticulturae)>. Acesso em: 27 jun. 2021.

MAHMOOD, S.; DAUR, I.; AL-SOLAIMANI, S. G.; AHMAD, S.; MADKOUR, M. H.; YASIR, M.; HIRT, H.; ALI, S.; ALI, Z. Plant growth promoting rhizobacteria and silicon synergistically enhance salinity tolerance of mung bean. **Frontiers in Plant Science**, [s. l.], v. 7, n. JUNE2016, 2016.

MAJEED, A.; MUHAMMAD, Z. Salinity: A major agricultural problem-causes, impacts on crop productivity and management strategies. In: **Plant Abiotic Stress Tolerance: Agronomic, Molecular and Biotechnological Approaches**. [s.l.] : Springer International Publishing, 2019. p. 83–99.

MALEKZADEH, P. Influence of exogenous application of glycinebetaine on antioxidative system and growth of salt-stressed soybean seedlings (*Glycine max* L.). **Physiology and Molecular Biology of Plants**, [s. l.], v. 21, n. 2, p. 225–232, 2015. Disponível em: <<https://link.springer.com/article/10.1007/s12298-015-0292-4>>. Acesso em: 2 mar. 2021.

MANIVANNAN, A.; SOUNDARARAJAN, P.; MUNEER, S.; KO, C. H.; JEONG, B. R. Silicon mitigates salinity stress by regulating the physiology, antioxidant enzyme activities, and protein expression in *Capsicum annum* “Bugwang”. **BioMed Research International**, [s. l.], v. 2016, 2016.

MARQUES, E. C.; FREITAS, V. S.; BEZERRA, M. A.; PRISCO, J. T.; GOMES-FILHO, E. Effects of salt stress on germination, emergence and establishment of dwarf-cashew seedling. **Revista Ciencia Agronomica**, [s. l.], v. 42, n. 4, p. 993–999, 2011. Disponível em: <[www.ccarevista.ufc.br](http://www.ccarevista.ufc.br)>. Acesso em: 27 jun. 2021.

MENG, D.; FRICKE, W. Changes in root hydraulic conductivity facilitate the overall hydraulic response of rice (*Oryza sativa* L.) cultivars to salt and osmotic stress. **Plant Physiology and Biochemistry**, [s. l.], v. 113, p. 64–77, 2017.

METTERNICHT, G. I.; ZINCK, J. A. **Remote sensing of soil salinity: Potentials and constraints**, Elsevier Inc., 2003.

MIHARA, M.; UCHIYAMA, M.; FUKUZAWA, K. Thiobarbituric acid value on fresh homogenate of rat as a parameter of lipid peroxidation in aging, CCl<sub>4</sub> intoxication, and vitamin E deficiency. **Biochemical medicine**, [s. l.], v. 23, n. 3, p. 302–311, 1980.

MILLER, G.; SUZUKI, N.; CIFTCI-YILMAZ, S.; MITTLER, R. Reactive oxygen species homeostasis and signalling during drought and salinity stresses. **Plant, Cell and Environment**, [s. l.], v. 33, n. 4, p. 453–467, 2010. Disponível em:

<<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1111/j.1365-3040.2009.02041.x>>. Acesso em: 28 jun. 2021.

MUNNS, R. Comparative physiology of salt and water stress. **Plant, Cell and Environment**, [s. l.], v. 25, n. 2, p. 239–250, 2002. Disponível em: <<http://audit.ea.gov.au>>. Acesso em: 28 jun. 2021.

NAKANO, Y.; ASADA, K. Hydrogen peroxide is scavenged by ascorbate-specific peroxidase in spinach chloroplasts. **Plant and Cell Physiology**, [s. l.], v. 22, n. 5, p. 867–880, 1981. Disponível em: <<https://academic.oup.com/pcp/article/22/5/867/1835201>>. Acesso em: 27 jun. 2021.

NAVROT, N.; ROUHIER, N.; GELHAYE, E.; JACQUOT, J. P. Reactive oxygen species generation and antioxidant systems in plant mitochondria. In: **PHYSIOLOGIA PLANTARUM 2007, Anais...** : John Wiley & Sons, Ltd, 2007. Disponível em: <<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1111/j.1399-3054.2006.00777.x>>. Acesso em: 28 jun. 2021.

NETO, A. D. D. A.; PRISCO, J. T.; ENÉAS-FILHO, J.; ROLIM MEDEIROS, J. V.; GOMES-FILHO, E. Hydrogen peroxide pre-treatment induces salt-stress acclimation in maize plants. **Journal of Plant Physiology**, [s. l.], v. 162, n. 10, p. 1114–1122, 2005.

NOREEN, S.; SULTAN, M.; AKHTER, M. S.; SHAH, K. H.; UMMARA, U.; MANZOOR, H.; ULFAT, M.; ALYEMENI, M. N.; AHMAD, P. Foliar fertigation of ascorbic acid and zinc improves growth, antioxidant enzyme activity and harvest index in barley (*Hordeum vulgare* L.) grown under salt stress. **Plant Physiology and Biochemistry**, [s. l.], v. 158, p. 244–254, 2021.

OLIVERA VICIEDO, D.; DE MELLO PRADO, R.; LIZCANO TOLEDO, R.; NASCIMENTO DOS SANTOS, L. C.; PEÑA CALZADA, K. Respuesta de las plántulas del rábano (*Raphanus sativus* L.) a diferentes concentraciones de nitrógeno amoniacal en ausencia y presencia de silicio. **Agronomía Colombiana**, [s. l.], v. 35, n. 2, p. 198–204, 2017. Disponível em: <<https://revistas.unal.edu.co/index.php/agrocol/article/view/62772>>. Acesso em: 8 fev. 2021.

OLIVERA VICIEDO, D.; MELLO PRADO, R.; LIZCANO TOLEDO, R.; SALAS AGUILAR, D.; SANTOS, L. C. N.; CALERO HURTADO, A.; PEÑA CALZADA, K.; BETANCOURT AGUILAR, C. Physiological role of silicon in radish seedlings under

ammonium toxicity. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, [s. l.], v. 100, n. 15, p. 5637–5644, 2020. Disponível em: <<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/jsfa.10587>>. Acesso em: 8 fev. 2021.

PASSAIA, G.; CAVERZAN, A.; FONINI, L. S.; CARVALHO, F. E. L.; SILVEIRA, J. A. G.; MARGIS-PINHEIRO, M. Chloroplastic and mitochondrial GPX genes play a critical role in rice development. **Biologia Plantarum**, [s. l.], v. 58, n. 2, p. 375–378, 2014. Disponível em: <<https://link.springer.com/article/10.1007/s10535-014-0394-9>>. Acesso em: 21 jun. 2021.

PETTER, F. A.; ALVES, A. U.; DA SILVA, J. A.; DE ALMEIDA CARDOSO, E.; ALIXANDRE, T. F.; DE ALMEIDA, F. A.; PACHECO, L. P. Produtividade e qualidade de sementes de soja em função de doses e épocas de aplicação de potássio. **Semina: Ciências Agrárias**, [s. l.], v. 35, n. 1, p. 89–100, 2014. Disponível em: <<http://www.uel.br/revistas/uel/index.php/semagrarias/article/view/11656>>. Acesso em: 8 fev. 2021.

PRADO, R. . **Nutrição mineral de plantas tropicais**, Springer. [s.l.: s.n.]. Disponível em: <<https://www.springer.com/gp/book/9783030712617>>. Acesso em: 2 mar. 2021.

RACCHI, M. L. **Antioxidant defenses in plants with attention to prunus and citrus spp.**, MDPI AG, 2013. a. Disponível em: <[www.mdpi.com/journal/antioxidants](http://www.mdpi.com/journal/antioxidants)>. Acesso em: 21 jun. 2021.

RACCHI, M. L. **Antioxidant defenses in plants with attention to prunus and citrus spp.**, MDPI AG, 2013. b. Disponível em: <[pmc/articles/PMC4665512/](https://pmc/articles/PMC4665512/)>. Acesso em: 21 jun. 2021.

RADY, M. M.; ELRYS, A. S.; ABO EL-MAATI, M. F.; DESOKY, E. S. M. Interplaying roles of silicon and proline effectively improve salt and cadmium stress tolerance in *Phaseolus vulgaris* plant. **Plant Physiology and Biochemistry**, [s. l.], v. 139, p. 558–568, 2019.

RASOOL, S.; HAMEED, A.; AZOOZ, M. M.; MUNEEB-U-REHMAN; SIDDIQI, T. O.; AHMAD, P. Salt stress: Causes, types and responses of plants. In: **Ecophysiology and Responses of Plants under Salt Stress**. [s.l.] : Springer New York, 2012. p. 1–24.

RIZWAN, M.; ALI, S.; UR REHMAN, M. Z.; MALIK, S.; ADREES, M.; QAYYUM, M. F.; ALAMRI, S. A.; ALYEMENI, M. N.; AHMAD, P. **Correction to: Effect of foliar applications of silicon and titanium dioxide nanoparticles on growth, oxidative**

**stress, and cadmium accumulation by rice (*Oryza sativa*) (Acta Physiologiae Plantarum, (2019), 41, 3, (35), 10.1007/s11738-019-2828-7)**, Polish Academy of Sciences, Institute of Slavic Studies, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s11738-019-2863-4>>. Acesso em: 5 fev. 2021.

RIZWAN, M.; MEUNIER, J. D.; MICHE, H.; KELLER, C. Effect of silicon on reducing cadmium toxicity in durum wheat (*Triticum turgidum* L. cv. Claudio W.) grown in a soil with aged contamination. **Journal of Hazardous Materials**, [s. l.], v. 209–210, p. 326–334, 2012.

ROBATJAZI, R.; ROSHANDEL, P.; HOOSHMAND, Dollah. Benefits of Silicon Nutrition on Growth, Physiological and Phytochemical Attributes of Basil upon Salinity Stress. **International Journal of Horticultural Science and Technology**, [s. l.], v. 7, n. 1, p. 37–50, 2020. Disponível em: <[https://ijhst.ut.ac.ir/article\\_75266.html](https://ijhst.ut.ac.ir/article_75266.html)>. Acesso em: 6 fev. 2021.

ROY, P. R.; TAHJIB-UL-ARIF, M.; AKTER, T.; RAY, S. R.; SAYED, M. A. **AENSI Journals Advances in Environmental Biology Exogenous ascorbic acid and hydrogen peroxide alleviates salt-induced oxidative stress in rice (*Oryza sativa* L.) by enhancing antioxidant enzyme activities and proline content** **Advances in Environmental Biology**. [s.l.: s.n.]. Disponível em: <<http://www.aensiweb.com/AEB/http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>>. Acesso em: 21 jun. 2021.

RUAS, J.; SALVADOR, M.; AMAZONAS, L. Acompanhamento da Safra Brasileira. **Companhia Nacional de Abastecimento**, [s. l.], v. 7, n. 6, p. 1–89, 2020.

SADAK, M. S.; ABD EL-HAMEID, A. R.; ZAKI, F. S. A.; DAWOOD, M. G.; EL-AWADI, M. E. Physiological and biochemical responses of soybean (*Glycine max* L.) to cysteine application under sea salt stress. **Bulletin of the National Research Centre**, [s. l.], v. 44, n. 1, p. 1–10, 2020. Disponível em: <<https://link.springer.com/articles/10.1186/s42269-019-0259-7>>. Acesso em: 2 mar. 2021.

SATTAR, A.; CHEEMA, M. A. A.; ABBAS, T.; SHER, A.; IJAZ, M.; HUSSAIN, M. Separate and combined effects of silicon and selenium on salt tolerance of wheat plants. **Russian Journal of Plant Physiology**, [s. l.], v. 64, n. 3, p. 341–348, 2017.

SATTAR, A.; CHEEMA, M. A.; SHER, A.; ABBAS, T.; IRFAN, M.; IJAZ, M.; HUSSAIN, S.; ALI, Q. Foliage applied silicon alleviates the combined effects of

salinity and drought stress on wheat seedlings. **International Journal of Agriculture & Biology**, [s. l.], v. 20, n. 11, p. 2537–2543, 2018.

SAYYAD-AMIN, P.; JAHANSOOZ, M. R.; BORZOU EI, A.; AJILI, F. Changes in photosynthetic pigments and chlorophyll-a fluorescence attributes of sweet-forage and grain sorghum cultivars under salt stress. **Journal of Biological Physics**, [s. l.], v. 42, n. 4, p. 601–620, 2016. Disponível em: <<https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/27586195/>>. Acesso em: 31 jan. 2021.

SHAHZAD, M.; ZÖRB, C.; GEILFUS, C. M.; MÜHLING, K. H. Apoplastic Na<sup>+</sup> in vicia faba leaves rises after short-term salt stress and is remedied by silicon. **Journal of Agronomy and Crop Science**, [s. l.], v. 199, n. 3, p. 161–170, 2013. Disponível em: <<http://www.r-project.org/>>. Acesso em: 27 jun. 2021.

SHARMA, P.; JHA, A. B.; DUBEY, R. S.; PESSARAKLI, M. Reactive Oxygen Species, Oxidative Damage, and Antioxidative Defense Mechanism in Plants under Stressful Conditions. **Journal of Botany**, [s. l.], v. 2012, p. 26, 2012. a.

SHARMA, P.; JHA, A. B.; DUBEY, R. S.; PESSARAKLI, M. Reactive Oxygen Species, Oxidative Damage, and Antioxidative Defense Mechanism in Plants under Stressful Conditions. **Journal of Botany**, [s. l.], v. 2012, p. 1–26, 2012. b.

SHEKARI, F.; ABBASI, A.; MUSTAFAVI, S. H. Effect of silicon and selenium on enzymatic changes and productivity of dill in saline condition. **Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences**, [s. l.], v. 16, n. 4, p. 367–374, 2017.

SHEN, X.; ZHOU, Y.; DUAN, L.; LI, Z.; ENEJI, A. E.; LI, J. Silicon effects on photosynthesis and antioxidant parameters of soybean seedlings under drought and ultraviolet-B radiation. **Journal of Plant Physiology**, [s. l.], v. 167, n. 15, p. 1248–1252, 2010.

SHETEIWY, M. S.; SHAO, H.; QI, W.; DALY, P.; SHARMA, A.; SHAGHALEH, H.; HAMOUD, Y. A.; EL-ESAWI, M. A.; PAN, R.; WAN, Q.; LU, H. Seed priming and foliar application with jasmonic acid enhance salinity stress tolerance of soybean (*Glycine max* L.) seedlings. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, [s. l.], n. June, 2020.

SHRIVASTAVA, P.; KUMAR, R. **Soil salinity: A serious environmental issue and plant growth promoting bacteria as one of the tools for its alleviation**, Elsevier, 2015.

SHU, K.; QI, Y.; CHEN, F.; MENG, Y.; LUO, X.; SHUAI, H.; ZHOU, W.; DING, J.; DU,

J.; LIU, J.; YANG, F.; WANG, Q.; LIU, W.; YONG, T.; WANG, X.; FENG, Y.; YANG, W. Salt Stress Represses Soybean Seed Germination by Negatively Regulating GA Biosynthesis While Positively Mediating ABA Biosynthesis. **Frontiers in Plant Science**, [s. l.], v. 8, p. 1372, 2017. Disponível em: <<http://journal.frontiersin.org/article/10.3389/fpls.2017.01372/full>>. Acesso em: 7 fev. 2021.

SILVA, B. S. da S. M. **BRUNA SANTANA DA SILVA MENDES EFEITOS FISIOLÓGICOS E BIOQUÍMICOS DO ESTRESSE SALINO EM Ananas porteanus**. [s.l: s.n.]. Disponível em: <<http://www.livrosgratis.com.br>>. Acesso em: 27 jun. 2021.

SOLIMAN, M. H.; ALAYAFI, A. A. M.; EL KELISH, A. A.; ABU-ELSAOUD, A. M. Acetylsalicylic acid enhance tolerance of Phaseolus vulgaris L. to chilling stress, improving photosynthesis, antioxidants and expression of cold stress responsive genes. **Botanical Studies**, [s. l.], v. 59, n. 1, p. 6, 2018. Disponível em: <<https://as-botanicalstudies.springeropen.com/articles/10.1186/s40529-018-0222-1>>. Acesso em: 7 fev. 2021.

TAKAHASHI, S.; MURATA, N. **How do environmental stresses accelerate photoinhibition?**, Elsevier Current Trends, 2008.

TAVAKKOLI, E.; FATEHI, F.; COVENTRY, S.; RENGASAMY, P.; MCDONALD, G. K. Additive effects of Na<sup>+</sup> and Cl<sup>-</sup> ions on barley growth under salinity stress. **Journal of Experimental Botany**, [s. l.], v. 62, n. 6, p. 2189–2203, 2011. Disponível em: <[http://jxb.oxfordjournals.org/open\\_access.html](http://jxb.oxfordjournals.org/open_access.html)>. Acesso em: 28 jun. 2021.

TAVAKKOLI, E.; RENGASAMY, P.; MCDONALD, G. K. High concentrations of Na<sup>+</sup> and Cl<sup>-</sup> ions in soil solution have simultaneous detrimental effects on growth of faba bean under salinity stress. **Journal of Experimental Botany**, [s. l.], v. 61, n. 15, p. 4449–4459, 2010. Disponível em: <<https://academic.oup.com/jxb/article-lookup/doi/10.1093/jxb/erq251>>. Acesso em: 5 fev. 2021.

TORABI, F.; MAJD, A.; ENTESHARI, S. The effect of silicon on alleviation of salt stress in borage (*Borago officinalis* L.). **Soil Science and Plant Nutrition**, [s. l.], v. 61, n. 5, p. 788–798, 2015. Disponível em: <<https://www.tandfonline.com/action/journalInformation?journalCode=tssp20>>. Acesso em: 28 jun. 2021.

TRIPATHI, D. K.; SINGH, V. P.; PRASAD, S. M.; CHAUHAN, D. K.; DUBEY, N. K. Silicon nanoparticles (SiNp) alleviate chromium (VI) phytotoxicity in *Pisum sativum*

- (L.) seedlings. **Plant Physiology and Biochemistry**, [s. l.], v. 96, p. 189–198, 2015.
- TRIPATHI, P.; NA, C. I.; KIM, Y. Effect of silicon fertilizer treatment on nodule formation and yield in soybean (*Glycine max* L.). **European Journal of Agronomy**, [s. l.], v. 122, p. 126172, 2021.
- TUNA, A. L.; KAYA, C.; ASHRAF, M.; ALTUNLU, H.; YOKAS, I.; YAGMUR, B. The effects of calcium sulphate on growth, membrane stability and nutrient uptake of tomato plants grown under salt stress. **Environmental and Experimental Botany**, [s. l.], v. 59, n. 2, p. 173–178, 2007.
- TUTEJA, N. Mechanisms of High Salinity Tolerance in Plants. In: **Methods in Enzymology**. [s.l.] : Academic Press Inc., 2007. v. 428p. 419–438.
- VERSLUES, P. E.; AGARWAL, M.; KATIYAR-AGARWAL, S.; ZHU, J.; ZHU, J. K. Methods and concepts in quantifying resistance to drought, salt and freezing, abiotic stresses that affect plant water status. **Plant Journal**, [s. l.], v. 45, n. 4, p. 523–539, 2006. Disponível em: <<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1111/j.1365-313X.2005.02593.x>>. Acesso em: 28 jun. 2021.
- VICIEDO, D. O.; DE MELLO PRADO, R.; LIZCANO TOLEDO, R.; DOS SANTOS, L. C. N.; CALERO HURTADO, A.; NEDD, L. L. T.; CASTELLANOS GONZALEZ, L. Silicon Supplementation Alleviates Ammonium Toxicity in Sugar Beet (*Beta vulgaris* L.). **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, [s. l.], v. 19, n. 2, p. 413–419, 2019. Disponível em: <<https://link.springer.com/article/10.1007/s42729-019-00043-w>>. Acesso em: 9 fev. 2021.
- VIEIRA, C. F.; SILVEIRA, J. A. G.; CAVALCANTI, F. R.; ARAGÃO, R. M.; SILVA, E. N. Integrated physiological analysis reveals that recovery capacity after salt stress withdrawal is a crucial mechanism for salt tolerance in soybean cultivars. **Indian Journal of Plant Physiology** 2018 23:3, [s. l.], v. 23, n. 3, p. 444–458, 2018. Disponível em: <<https://link.springer.com/article/10.1007/s40502-018-0395-3>>. Acesso em: 3 set. 2021.
- WAQAS, M.; KHAN, A. L.; KANG, S. M.; KIM, Y. H.; LEE, I. J. Phytohormone-producing fungal endophytes and hardwood-derived biochar interact to ameliorate heavy metal stress in soybeans. **Biology and Fertility of Soils**, [s. l.], v. 50, n. 7, p. 1155–1167, 2014. Disponível em: <<http://blast.ncbi.nlm.nih.gov>>. Acesso em: 7 fev. 2021.
- WILLADINO, L.; FILHO, R. A. de O.; DA SILVA JUNIOR, E. A.; NETO, A. G.;

CAMARA, T. R. Salinity stress in two varieties of sugar cane: Enzymes of the antioxidant system and chlorophyll fluorescence. **Revista Ciencia Agronomica**, [s. l.], v. 42, n. 2, p. 417–422, 2011. Disponível em: <[www.ccarevista.ufc.br](http://www.ccarevista.ufc.br)>. Acesso em: 28 jun. 2021.

WU, Z.; LIU, S.; ZHAO, J.; WANG, F.; DU, Y.; ZOU, S.; LI, H.; WEN, D.; HUANG, Y. Comparative responses to silicon and selenium in relation to antioxidant enzyme system and the glutathione-ascorbate cycle in flowering Chinese cabbage (*Brassica campestris* L. ssp. *chinensis* var. *utilis*) under cadmium stress. **Environmental and Experimental Botany**, [s. l.], v. 133, p. 1–11, 2017.

XING, W.; WANG, J.; LIU, H.; ZOU, D.; ZHAO, H. **Influence of natural saline-alkali stress on chlorophyll content and chloroplast ultrastructure of two contrasting rice (*Oryza sativa* L. japonica) cultivars AJCS**. [s.l: s.n.].

YAN, G.; FAN, X.; PENG, M.; YIN, C.; XIAO, Z.; LIANG, Y. Silicon Improves Rice Salinity Resistance by Alleviating Ionic Toxicity and Osmotic Constraint in an Organ-Specific Pattern. **Frontiers in Plant Science**, [s. l.], v. 11, 2020. Disponível em: <[/pmc/articles/PMC7081754/](https://doi.org/10.3389/fpls.2020.00175)>. Acesso em: 28 fev. 2021.

YIN, L.; WANG, S.; LI, J.; TANAKA, K.; OKA, M. Application of silicon improves salt tolerance through ameliorating osmotic and ionic stresses in the seedling of *Sorghum bicolor*. **Polish Academy of Sciences**, [s. l.], v. 35, p. 3099–3107, 2013. a.

YIN, L.; WANG, S.; LI, J.; TANAKA, K.; OKA, M. Application of silicon improves salt tolerance through ameliorating osmotic and ionic stresses in the seedling of *Sorghum bicolor*. **Acta Physiologiae Plantarum**, [s. l.], v. 35, n. 11, p. 3099–3107, 2013. b. Disponível em: <<https://link.springer.com/article/10.1007/s11738-013-1343-5>>. Acesso em: 27 jun. 2021.

ZAVARIYAN, A. M.; RAD, M. Y.; ASGHARI, M. Effect of seed priming by potassium nitrate on germination and biochemical indices in *Silybum marianum* L. under salinity stress. **International Journal of Life Sciences**, [s. l.], v. 9, n. 1, p. 23–29, 2015. Disponível em: <<https://www.nepjol.info/index.php/IJLS/article/view/11922>>. Acesso em: 27 jun. 2021.

ZHAI, C. Z.; ZHAO, L.; YIN, L. J.; CHEN, M.; WANG, Q. Y.; LI, L. C.; XU, Z. S.; MA, Y. Z. Two Wheat Glutathione Peroxidase Genes Whose Products Are Located in Chloroplasts Improve Salt and H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> Tolerances in *Arabidopsis*. **PLoS ONE**, [s. l.], v. 8, n. 10, p. 73989, 2013. Disponível em: <[www.plosone.org](http://www.plosone.org)>. Acesso em: 21 jun.

2021.

ZHANG, C.; MOUTINHO-PEREIRA, J. M.; CORREIA, C.; COUTINHO, J.; GONÇALVES, A.; GUEDES, A.; GOMES-LARANJO, J. Foliar application of Sili-K® increases chestnut (*Castanea* spp.) growth and photosynthesis, simultaneously increasing susceptibility to water deficit. **Plant and Soil**, [s. l.], v. 365, n. 1–2, p. 211–225, 2013. Disponível em: <<http://www.una-prosil.com.br/>>. Acesso em: 4 fev. 2021.

ZHANG, P.; SENGE, M.; DAI, Y. Effects of salinity stress on growth, yield, fruit quality and water use efficiency of tomato under hydroponics system. **Reviews in Agricultural Science**, [s. l.], v. 4, n. 0, p. 46–55, 2016. Disponível em: <[https://www.jstage.jst.go.jp/article/ras/4/0/4\\_46/\\_article](https://www.jstage.jst.go.jp/article/ras/4/0/4_46/_article)>. Acesso em: 4 fev. 2021.

ZHU, J. K. **Salt and drought stress signal transduction in plants**, Annual Reviews 4139 El Camino Way, P.O. Box 10139, Palo Alto, CA 94303-0139, USA , 2002. Disponível em: <[www.annualreviews.org](http://www.annualreviews.org)>. Acesso em: 29 jun. 2021.

ZHU, Y.; GONG, H. **Beneficial effects of silicon on salt and drought tolerance in plants**, EDP Sciences, 2014. Disponível em: <<https://link.springer.com/article/10.1007/s13593-013-0194-1>>. Acesso em: 27 jun. 2021.

ZHU, Y.; JIANG, X.; ZHANG, J.; HE, Y.; ZHU, X.; ZHOU, X.; GONG, H.; YIN, J.; LIU, Y. Silicon confers cucumber resistance to salinity stress through regulation of proline and cytokinins. **Plant Physiology and Biochemistry**, [s. l.], v. 156, p. 209–220, 2020.

ZHU, Z.; WEI, G.; LI, J.; QIAN, Q.; YU, J. Silicon alleviates salt stress and increases antioxidant enzymes activity in leaves of salt-stressed cucumber (*Cucumis sativus* L.). **Plant Science**, [s. l.], v. 167, n. 3, p. 527–533, 2004. a.

ZHU, Z.; WEI, G.; LI, J.; QIAN, Q.; YU, J. Silicon alleviates salt stress and increases antioxidant enzymes activity in leaves of salt-stressed cucumber (*Cucumis sativus* L.). **Plant Science**, [s. l.], v. 167, n. 3, p. 527–533, 2004. b.