



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ**  
**CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS**  
**DEPARTAMENTO DE FITOTECNIA**  
**PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA/FITOTECNIA**

**VIVIANE RUPPENTHAL**

**RESPOSTAS FISIOLÓGICAS E BIOQUÍMICAS DE PLÂNTULAS DE SORGO SOB  
ESTRESSE SALINO E SUPRIDAS COM SILÍCIO E FÓSFORO**

**FORTALEZA**

**2016**

**VIVIANE RUPPENTHAL**

**RESPOSTAS FISIOLÓGICAS E BIOQUÍMICAS DE PLÂNTULAS DE SORGO SOB  
ESTRESSE SALINO E SUPRIDAS COM SILÍCIO E FÓSFORO**

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Agronomia, da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial para a obtenção do Título de Doutor em Agronomia. Área de concentração: Fitotecnia.

Orientador: Prof. Dr. Enéas Gomes Filho

FORTALEZA

2016

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação  
Universidade Federal do Ceará  
Biblioteca Universitária

Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

---

- R912r Ruppenthal, Viviane.  
Respostas fisiológicas e bioquímicas de plântulas de sorgo sob estresse salino e supridas com silício e fósforo / Viviane Ruppenthal. – 2016.  
155 f. : il.
- Tese (doutorado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Ciências Agrárias, Programa de Pós-Graduação em Agronomia (Fitotecnia), Fortaleza, 2016.  
Orientação: Prof. Dr. Enéas Gomes Filho.
1. Sorghum bicolor. 2. Nutrição com Si e P. 3. Crescimento. 4. Enzimas antioxidativas. 5. Solutos orgânicos e inorgânicos. I. Título.

CDD 630

---

VIVIANE RUPPENTHAL

**RESPOSTAS FISIOLÓGICAS E BIOQUÍMICAS DE PLÂNTULAS DE SORGO SOB  
ESTRESSE SALINO E SUPRIDAS COM SILÍCIO E FÓSFORO**

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Agronomia, da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial para a obtenção do Título de Doutor em Agronomia.

Aprovada em 29, 03, 2016.

**BANCA EXAMINADORA**



Prof. Dr. Eneas Gomes Filho (Orientador)  
Universidade Federal do Ceará – UFC



Prof. Dr. Alek Sandro Dutra  
Universidade Federal do Ceará – UFC



Prof. Dr. Alexandre Bosco de Oliveira  
Universidade Federal do Ceará – UFC



Profa. Dra. Rosilene Oliveira Mesquita  
Universidade Federal do Ceará – UFC



Prof. Dr. Elton Carmelo Marques  
Universidade Federal Rural do Semi-Árido – UFERSA

Para aquelas pessoas que fazem meu coração sorrir...

Para aquelas que sempre estiveram junto, até mesmo quando eu não estava disposta...

Para as pessoas que me ajudaram a levantar quando eu tropecei...

Para as pessoas que fizeram a diferença em minha vida...

Para as pessoas que quando olho para trás, sinto muitas saudades...

Para as pessoas que me aconselharam e me ajudaram a entender coisas antes incompreensíveis...

Para as pessoas que abracei...

Para as pessoas que encontro todos os dias e não tenho a chance de dizer tudo o que sinto olhando nos olhos...

Para todas as pessoas essenciais na minha vida...

**Dedico**

Aos meus pais...

Que me deram a base de tudo que sou e sei hoje;

Que me passaram valores que perdurarão sempre.

**Ofereço**

## AGRADECIMENTOS

A *Deus*, por conceder uma chance a cada um de nós de usufruir o dom da vida e permitir a conquista de nossos sonhos.

Aos meus pais e ao meu irmão, que foram os alicerces de todas as minhas vitórias.

Aos demais familiares e amigos, que sempre torceram para que eu alcançasse meus objetivos, em especial às amigas *Magda Laiara, Kellyany Rodrigues e Denise Viveiros*.

Aos professores *Joaquim Enéas Filho e Enéas Gomes Filho*, um agradecimento especial pela confiança depositada, orientação, apoio e incentivo durante esta etapa da minha formação acadêmica.

Aos professores *Alek Sandro Dutra, Alexandre Bosco de Oliveira, Rosilene Oliveira Mesquita e Elton Camelo Marques*, por aceitarem participar de minha banca examinadora, pela compreensão e pelas críticas e sugestões a este trabalho.

Aos meus amigos e ex-bolsistas *Maria Lilian, Rayssa Mayara, Caio Saboia e Mario Vasconcelos*, pela convivência, amizade e por me auxiliarem durante a realização deste experimento.

Aos amigos *Lineker Lopes, Rafael de Souza Miranda e Elton Marques*, pela amizade e pelo frequente apoio em todas as etapas deste experimento.

Aos amigos e colegas que compõem ou compuseram o Laboratório de Fisiologia Vegetal, *Alexcyane Feijão, Carlos Eduardo, Cibelle Gadelha, Dalton de Oliveira, Elaine Angelim, Evaldo Heber, Franklin Aragão, Gyedre Araújo, Irinaldo Nascimento, Jones Vidal, Juan Pizarro, Lucas Huriel, Michella Albuquerque, Maria Liliane, Luckas Huriel, Nara Lídia, Nathália Amaral, Paulo André, Stelamaris Paula, Thalita Montoril, Thiago Augusto, Valdinéia Soares, Victor Castro, Vlayrton Maciel*, pela convivência, pelos momentos de descontração e por me ajudarem direta ou indiretamente no andamento deste trabalho.

Aos professores do Programa de Pós-graduação em Fitotecnia, especialmente àqueles de quem tive a oportunidade de ser aluna, pelas experiências e pelos ensinamentos compartilhados comigo, bem como aos demais membros do Departamento de Fitotecnia.

Ao Deocleciano Xavier, secretário da Pós-graduação, pela paciência e educação com que sempre me recepcionou.

Aos amigos e colegas do curso de Pós-graduação em Fitotecnia pela amizade e pela convivência no decorrer do curso.

À Universidade Federal do Ceará (UFC), em especial aos Departamentos de Fitotecnia e de Bioquímica e Biologia Molecular, pela oportunidade de realização deste curso.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela concessão de bolsa de estudo.

Ao Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia em Salinidade (INCTSal), que por meio do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), concedeu auxílio para a execução deste trabalho.

E por fim a todas as pessoas que de alguma forma contribuíram para o desenvolvimento deste trabalho e que não foram supracitadas, o meu sincero agradecimento.

As dificuldades não foram poucas  
Os desafios foram muitos  
Os obstáculos, muitas vezes pareciam intransponíveis  
Muitas vezes nos sentimos só e, assim estivemos  
O desânimo quis contagiar, porém, a garra e a tenacidade  
Foram mais fortes sobrepondo esse sentimento, fazendo-nos seguir a caminhada, apesar  
da sinuosidade do caminho  
Agora, ao olharmos para trás, a sensação de dever cumprido se faz presente e  
podemos constatar que as noites de sono perdidas.... O cansaço, os  
longos tempos de leitura, digitação, discussão; ansiedade  
em querer fazer e a angústia de muitas vezes não o  
conseguir... Não foram em vão.  
Aqui estamos, como sobrevivente de uma batalha, porém, muito mais fortes e  
Hábeis, em coragem suficiente para mudar nossa postura, apesar de todos os obstáculos

(Autor desconhecido)

Como dizia *Antoine Saint Exupéry* em sua obra prima *O pequeno Príncipe*:  
“Foi o tempo que perdeste com a tua rosa, que fez a tua rosa tão importante. ”

“Às vezes, quando tudo parece dar errado,  
acontecem coisas tão maravilhosas que jamais teriam acontecido,  
se tudo tivesse dado certo. ”

Roni Petterson



## RESUMO

Ruppenthal, V. **Respostas fisiológicas e bioquímicas de plântulas de sorgo sob estresse salino e supridas com silício e fósforo.** Tese (Doutorado em Agronomia) – Centro de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza - CE, 155 p. 2016.

O emprego do silício, ou do fósforo, como amenizadores dos efeitos deletérios do estresse salino, tem sido descrito para várias culturas, inclusive para o sorgo. No entanto, pouco se sabe sobre os efeitos da aplicação conjunta de ambos os nutrientes nas respostas fisiológicas e bioquímicas, durante a fase de estabelecimento das plântulas de sorgo sob condições de estresse salino. Assim, esta pesquisa teve como objetivo estudar os efeitos do suprimento com Si e P em plântulas de dois genótipos de sorgo, CSF 18 e CSF 20, submetidos ao estresse salino. O delineamento experimental foi o inteiramente casualizado, com quatro repetições, em esquema fatorial  $2 \times 2 \times 2$ , tendo como tratamentos a combinação de duas concentrações de NaCl (0 e 100 mM), duas concentrações de Si (0 e 0,5 mM) e duas concentrações de P (0 e 0,025 mM). O Si e o P foram fornecidos no meio de cultivo na forma de metassilicato de sódio ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ) e fosfato de potássio monobásico ( $\text{KH}_2\text{PO}_4$ ), respectivamente. A semeadura foi realizada em papel 'germitest' umedecido com solução dos respectivos tratamentos. Aos quatro e dez dias após a semeadura (DAS), foram avaliados os parâmetros de crescimento (massa seca e comprimento da parte aérea e raiz), os teores de solutos inorgânicos ( $\text{Na}^+$  e  $\text{K}^+$ ) e orgânicos (carboidratos solúveis, N-aminossolúveis e prolina), os teores de proteínas solúveis e a atividade das enzimas antioxidantes, dismutase do superóxido, catalase, peroxidase do ascorbato e peroxidase do guaiacol, nas raízes e parte aérea das plântulas de dois genótipos de sorgo forrageiro. A salinidade afetou negativamente o crescimento das plântulas de sorgo de ambos os genótipos, exceto aos 4 DAS quando o crescimento das raízes foi favorecido pela adição de NaCl no meio de crescimento. A presença de Si e/ou P no meio de cultivo não minimizou os danos causados pelo estresse salino nas variáveis de crescimento estudadas, no entanto, em plântulas não estressadas, esses nutrientes proporcionaram maior crescimento em ambos os genótipos estudados. Porém, a adição de NaCl na solução de cultivo inibiu o efeito positivo desses nutrientes no crescimento. Plântulas de sorgo, mantidas sob estresse salino, apresentaram aumento nos teores de  $\text{Na}^+$  nas raízes e parte aérea, e os teores de  $\text{K}^+$  aumentaram ou se mantiveram inalterados, com exceção daquelas do genótipo CSF 20, aos 10 DAS, que tiveram redução nos teores desse íon em resposta à salinidade. O Si no meio de crescimento não contribuiu para reduzir a absorção de  $\text{Na}^+$  nas plântulas de sorgo submetidas ao estresse salino; ao contrário, sua adição no meio de cultivo favoreceu a absorção de  $\text{Na}^+$ . De modo geral, para ambos os genótipos em estudo, os solutos orgânicos tiveram seus teores aumentados, porém, pouco contribuíram para minorar os efeitos da salinidade. A prolina foi o soluto que mais se acumulou, no entanto, a adição de Si e P promoveram decréscimo nos seus teores. A salinidade, de modo geral, aumentou a atividade das enzimas antioxidantes estudadas, no entanto, este aumento não conferiu maior tolerância dos genótipos de sorgo CSF 18 e CSF 20 aos danos causados pelo estresse salino no crescimento. O Si e/ou P não foram efetivos na redução dos danos causados pelo estresse salino em plântulas de sorgo dos genótipos CSF 18 e CSF 20.

**Palavras-chave:** *Sorghum bicolor*, nutrição com Si e P, crescimento, enzimas antioxidativas, solutos orgânicos e inorgânicos.

## ABSTRACT

Ruppenthal, V. **Physiological and biochemical responses of sorghum seedlings under salt stress and supplied with silicon and phosphorus.** Thesis (PhD in Agronomy) – Centro de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza - CE, 155 p. 2016.

The usage of silicon (Si) or phosphorus (P) as alleviators of the deleterious effects of salt stress has been reported to several crops, including sorghum. However, there is little information available about the effects of the combined application of both nutrients on physiological and biochemical, during seedling establishment of sorghum plants under salt stress. Thus, this research aimed to study the effects of combined Si and P supplementation in seedlings of two sorghum genotypes, CSF 18 and CSF 20, submitted to salinity. The experimental design was totally randomized, with four repetitions in a 2 x 2 x 2 factorial design, with the combination of two NaCl concentrations (0 and 100 mM), two silicon concentrations (0 and 0,5 mM) and two phosphorus concentrations (0 and 0,025 mM) as treatments. Si and P were applied to the culture media as sodium metasilicate ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ) and monopotassium phosphate (or monobasic potassium phosphate,  $\text{KH}_2\text{PO}_4$ ), respectively. Sown was performed on germitest paper moistened with solutions of the respective treatments. 4 and 10 days after sowing (DAS), the growth parameters dry mass and length of roots and shoots were evaluated. inorganic ( $\text{Na}^+$  and  $\text{K}^+$ ) and organic (water soluble carbohydrates, N – aminosolutes and proline) levels, water soluble protein content and the antioxidant activities of the enzymes superoxide dismutase (SOD), catalase (CAT), ascorbate peroxidase (APX) and guaiacol peroxidase (GPX) in roots and shoots of seedlings of both sorghum genotypes were measured as well. Salinity affected negatively seedling growth in seedlings of both sorghum genotypes, except for 4 DAS seedlings, when root growth was favored with the addition of NaCl to the growth medium. The presence of Si and/or P in the growth medium did not alleviate the deleterious effects of salt stress on the growth variables here studied; however in non-stressed seedlings, those nutrients promoted a greater growth on both genotypes here studied. On the other hand, the addition of NaCl into the nutrient solution inhibited the positive effects of P and S on growth of sorghum seedlings. Seedlings kept under salt stress, displayed an increase of  $\text{Na}^+$  levels in roots and shoots, while  $\text{K}^+$  levels in these parts either underwent an increase or remained unaltered, except for 10 DAS CSF 20 seedlings, which had a reduction on  $\text{K}^+$  levels in response to salinity. Si in growth media did not contribute to decrease  $\text{Na}^+$  absorption in sorghum plants submitted to salt stress; on the contrary, its addition promoted  $\text{Na}^+$  absorption. In general, for both genotypes, the organic solutes had its levels increased; however, they contributed little to alleviate the effects of salinity. Proline was the solute that had the highest accumulation of all. Nevertheless, Si and P addition induced a decrease in proline levels. Salinity generally increased the activities of the antioxidant enzymes here studied, however this increase did not confer higher tolerance to sorghum genotypes CSF 18 and CSF 20 to the damages caused by salt stress on growth. Si and/or P were not effective in the reduction of the damages caused by salt stress in sorghum genotypes CSF 18 and CSF 20 seedlings.

**Keywords:** *Sorghum bicolor*, Si and P nutrition, growth, antioxidant enzymes, inorganic and organic solutes.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

	Página
<b>Figura 1 -</b> Análise dos desdobramentos de NaCl, dentro de cada nível de Si e P; de Si, dentro de cada nível de NaCl e P; e de P, dentro de cada nível de NaCl e Si, para a massa seca das raízes de plântulas de sorgo, genótipos CSF 18 e CSF 20, aos 4 dias após a semeadura, cultivadas na ausência ou presença de NaCl, Si ou P .....	55
<b>Figura 2 -</b> Análise dos desdobramentos de NaCl, dentro de cada nível de Si e P; de Si, dentro de cada nível de NaCl e P; e de P, dentro de cada nível de NaCl e Si, para a massa seca da parte aérea de plântulas de sorgo, genótipos CSF 18 e CSF 20, aos 4 dias após a semeadura, cultivadas na ausência ou presença de NaCl, Si ou P .....	56
<b>Figura 3 -</b> Análise dos desdobramentos de NaCl, dentro de cada nível de Si e P; de Si, dentro de cada nível de NaCl e P; e de P, dentro de cada nível de NaCl e Si, para a relação entre a massa seca da parte aérea e das raízes de plântulas de sorgo, genótipos CSF 18 e CSF 20, aos 4 dias após a semeadura, cultivadas na ausência ou presença de NaCl, Si ou P .....	58
<b>Figura 4 -</b> Comprimento da raiz de plântulas de sorgo, genótipo CSF 18, aos 4 dias após a semeadura, cultivadas na ausência ou presença de NaCl e em ausência ou presença de Si ou P .....	58
<b>Figura 5 -</b> Análise dos desdobramentos de NaCl, dentro de cada nível de Si e P; de Si, dentro de cada nível de NaCl e P; e de P, dentro de cada nível de NaCl e Si, para comprimento das raízes de plântulas de sorgo, genótipo CSF 20, aos 4 dias após a semeadura, cultivadas na ausência ou presença de NaCl, Si ou P .....	59
<b>Figura 6 -</b> Comprimento da parte aérea de plântulas de sorgo, genótipo CSF 18, aos 4 dias após a semeadura, cultivadas na ausência ou presença de NaCl e em ausência ou presença de Si ou P .....	60
<b>Figura 7 -</b> Análise dos desdobramentos de NaCl, dentro de cada nível de Si e P; de Si, dentro de cada nível de NaCl e P; e de P, dentro de cada nível de NaCl e Si para comprimento da parte aérea de plântulas de sorgo, genótipo CSF 20, aos 4 dias após a semeadura, cultivadas na ausência ou presença de NaCl, Si ou P .....	61
<b>Figura 8 -</b> Massa seca das raízes de plântulas de sorgo, genótipo CSF 18, aos 10 dias após a semeadura, cultivadas na ausência ou presença de NaCl e em ausência ou presença de Si ou P .....	63
<b>Figura 9 -</b> Relação entre a massa seca da parte aérea e a das raízes de plântulas de sorgo, genótipo CSF 18, aos 10 dias após a semeadura, cultivadas na ausência ou presença de NaCl, Si ou P .....	65

<b>Figura 10 -</b>	Comprimento da raiz de plântulas de sorgo, genótipo CSF 18, aos 10 dias após a semeadura, cultivadas na ausência ou presença de NaCl e em ausência ou presença de Si ou P .....	65
<b>Figura 11 -</b>	Comprimento da parte aérea de plântulas de sorgo, genótipo CSF 18 e CSF 20, aos 10 dias após a semeadura, cultivadas na ausência ou presença de NaCl e em ausência ou presença de Si ou P .....	67
<b>Figura 12 -</b>	Análise dos desdobramentos de NaCl, dentro de cada nível de Si e P; de Si, dentro de cada nível de NaCl e P; e de P, dentro de cada nível de NaCl e Si, para teores de sódio nas raízes de plântulas de sorgo, genótipo CSF 20, aos 4 dias após a semeadura e cultivadas na ausência ou presença de NaCl, cultivadas na ausência ou presença de NaCl, Si ou P .....	68
<b>Figura 13 -</b>	Teores de potássio nas raízes de plântulas de sorgo, genótipo CSF 18, aos 4 dias após a semeadura, cultivadas na ausência ou presença de NaCl e em ausência ou presença de Si ou P .....	70
<b>Figura 14 -</b>	Análise dos desdobramentos de NaCl, dentro de cada nível de Si e P; de Si dentro de cada nível de NaCl e P; e de P, dentro de cada nível de NaCl e Si, para teores de potássio nas raízes de plântulas de sorgo, genótipo CSF 20, aos 4 dias após a semeadura, cultivadas na ausência ou presença de NaCl, Si ou P .....	71
<b>Figura 15 -</b>	Teores de sódio na parte aérea de plântulas de sorgo, genótipo CSF 20, aos 4 dias após a semeadura, cultivadas na ausência ou presença de NaCl e em ausência ou presença de Si ou P .....	72
<b>Figura 16 -</b>	Análise dos desdobramentos de NaCl, dentro de cada nível de Si e P; de Si dentro de cada nível de NaCl e P; e de P, dentro de cada nível de NaCl e Si, para teores de potássio na parte aérea de plântulas de sorgo, genótipo CSF 18, aos 4 dias após a semeadura, cultivadas na ausência ou presença de NaCl, Si ou P .....	73
<b>Figura 17 -</b>	Teores de sódio na parte aérea de plântulas de sorgo, genótipos CSF 18 e CSF 20, aos 10 dias após a semeadura, cultivadas na ausência ou presença de NaCl e em ausência ou presença de Si ou P .....	76
<b>Figura 18 -</b>	Análise dos desdobramentos de NaCl, dentro de cada nível de Si e P; de Si dentro de cada nível de NaCl e P; e de P, dentro de cada nível de NaCl e Si, para os teores de carboidratos solúveis nas raízes de plântulas de sorgo, genótipo CSF 20, aos 4 dias após a semeadura, cultivadas na ausência ou presença de NaCl, Si ou P .....	79

<b>Figura 19 -</b>	Análise dos desdobramentos de NaCl, dentro de cada nível de Si e P; de Si, dentro de cada nível de NaCl e P; e de P, dentro de cada nível de NaCl e Si, para os teores de carboidratos solúveis na parte aérea de plântulas de sorgo, genótipos CSF 18 e CSF 20, aos 4 dias após a semeadura, cultivadas na ausência ou presença de NaCl, Si ou P .....	80
<b>Figura 20 -</b>	Análise dos desdobramentos de NaCl, dentro de cada nível de Si e P; de Si dentro de cada nível de NaCl e P; e de P, dentro de cada nível de NaCl e Si, para os teores de N-aminossolúveis nas raízes de plântulas de sorgo, genótipo CSF 18, aos 4 dias após a semeadura, cultivadas na ausência ou presença de NaCl, cultivadas na ausência ou presença de NaCl, Si ou P .....	82
<b>Figura 21 -</b>	Teores de N-aminossolúveis nas raízes de plântulas de sorgo, genótipo CSF 20, aos 4 dias após a semeadura, na ausência ou presença de NaCl e em ausência ou presença de Si ou P .....	82
<b>Figura 22 -</b>	Análise dos desdobramentos de NaCl, dentro de cada nível de Si e P; de Si, dentro de cada nível de NaCl e P; e de P, dentro de cada nível de NaCl e Si, para os teores de N-aminossolúveis na parte aérea de plântulas de sorgo, genótipos CSF 18 e CSF 20, aos 4 dias após a semeadura, cultivadas na ausência ou presença de NaCl, Si ou P .....	83
<b>Figura 23 -</b>	Análise dos desdobramentos de NaCl, dentro de cada nível de Si e P; de Si dentro de cada nível de NaCl e P; e de P, dentro de cada nível de NaCl e Si, para os teores de prolina livre nas raízes de plântulas de sorgo, genótipo CSF 20, aos 4 dias após a semeadura, cultivadas na ausência ou presença de NaCl, Si ou P .....	85
<b>Figura 24 -</b>	Teores de prolina livre na parte aérea de plântulas de sorgo, genótipo CSF 18, aos 4 dias após a semeadura, cultivadas na ausência ou presença de NaCl e em ausência ou presença de Si ou P .....	87
<b>Figura 25 -</b>	Análise dos desdobramentos de NaCl, dentro de cada nível de Si e P; de Si dentro de cada nível de NaCl e P; e de P, dentro de cada nível de NaCl e Si, para os teores de prolina livre na parte aérea de plântulas de sorgo, genótipo CSF 20, aos 4 dias após a semeadura, cultivadas na ausência ou presença de NaCl, Si ou P .....	87
<b>Figura 26 -</b>	Análise dos desdobramentos de NaCl, dentro de cada nível de Si e P; de Si, dentro de cada nível de NaCl e P; e de P, dentro de cada nível de NaCl e Si, para os teores de proteínas solúveis nas raízes de plântulas de sorgo, genótipos CSF 18 e CSF 20, aos 4 dias após a semeadura, cultivadas na ausência ou presença de NaCl, Si ou P ..	89

<b>Figura 27 -</b>	Teores de carboidratos solúveis nas raízes de plântulas de sorgo, genótipo CSF 20, aos 10 dias após a semeadura, cultivadas na ausência ou presença de NaCl e em ausência ou presença de Si ou P .....	92
<b>Figura 28 -</b>	Análise dos desdobramentos de NaCl, dentro de cada nível de Si e P; de Si dentro de cada nível de NaCl e P; e de P, dentro de cada nível de NaCl e Si, para os teores de N-aminossolúveis nas raízes de plântulas de sorgo, genótipo CSF 18, aos 10 dias após a semeadura, cultivadas na ausência ou presença de NaCl, Si ou P .....	94
<b>Figura 29 -</b>	Teores de N-aminossolúveis nas raízes de plântulas de sorgo, genótipo CSF 20, aos 10 dias após a semeadura, cultivadas na ausência ou presença de NaCl e em ausência ou presença de Si ou P .....	95
<b>Figura 30 -</b>	Análise dos desdobramentos de NaCl, dentro de cada nível de Si e P; de Si dentro de cada nível de NaCl e P; e de P, dentro de cada nível de NaCl e Si, para os teores de N-aminossolúveis na parte aérea de plântulas de sorgo, genótipo CSF 18, aos 10 dias após a semeadura, cultivadas na ausência ou presença de NaCl, Si ou P .....	96
<b>Figura 31 -</b>	Teores de prolina livre nas raízes de plântulas de sorgo, genótipo CSF 18, aos 10 dias após a semeadura, cultivadas na ausência ou presença de NaCl e em ausência ou presença de Si ou P .....	98
<b>Figura 32 -</b>	Análise dos desdobramentos de NaCl, dentro de cada nível de Si e P; de Si dentro de cada nível de NaCl e P; e de P, dentro de cada nível de NaCl e Si, para os teores de prolina livre nas raízes de plântulas de sorgo, genótipo CSF 20, aos 10 dias após a semeadura, cultivadas na ausência ou presença de NaCl, Si ou P .....	98
<b>Figura 33 -</b>	Análise dos desdobramentos de NaCl, dentro de cada nível de Si e P; de Si, dentro de cada nível de NaCl e P; e de P, dentro de cada nível de NaCl e Si, para os teores de prolina livre na parte aérea de plântulas de sorgo, genótipos CSF 18 e CSF 20, aos 10 dias após a semeadura, cultivadas na ausência ou presença de NaCl, Si ou P .....	100
<b>Figura 34 -</b>	Teores de proteínas solúveis na parte aérea de plântulas de sorgo, genótipo CSF 18, aos 10 dias após a semeadura, cultivadas na ausência ou presença de NaCl e em ausência ou presença de Si ou P .....	103
<b>Figura 35 -</b>	Análise dos desdobramentos de NaCl, dentro de cada nível de Si e P; de Si, dentro de cada nível de NaCl e P e; de P, dentro de cada nível de NaCl e Si, para os teores de proteínas solúveis na parte aérea de plântulas de sorgo, genótipo CSF 20, aos 10 dias após a semeadura, cultivadas na ausência ou presença de NaCl, Si ou P .....	103



<b>Figura 36 -</b>	Análise dos desdobramentos de NaCl, dentro de cada nível de Si e P; de Si, dentro de cada nível de NaCl e P; e de P, dentro de cada nível de NaCl e Si, para a atividade da dismutase do superóxido nas raízes de plântulas de sorgo, genótipos CSF 18 e CSF 20, aos 4 dias após a semeadura, cultivadas na ausência ou presença de NaCl, Si ou P .....	106
<b>Figura 37 -</b>	Atividade da dismutase do superóxido na parte aérea de plântulas de sorgo, genótipo CSF 18, aos 4 dias após a semeadura, cultivadas na ausência ou presença de NaCl e em ausência ou presença de Si ou P .....	107
<b>Figura 38 -</b>	Análise dos desdobramentos de NaCl, dentro de cada nível de Si e P; de Si, dentro de cada nível de NaCl e P; e de P, dentro de cada nível de NaCl e Si, para a atividade da catalase nas raízes de plântulas de sorgo, genótipos CSF 18 e CSF 20, aos 4 dias após a semeadura, cultivadas na ausência ou presença de NaCl, Si ou P .....	109
<b>Figura 39 -</b>	Análise dos desdobramentos de NaCl, dentro de cada nível de Si e P; de Si, dentro de cada nível de NaCl e P e; de P, dentro de cada nível de NaCl e Si, para a atividade da catalase na parte aérea de plântulas de sorgo, genótipo CSF 20, aos 4 dias após a semeadura, cultivadas na ausência ou presença de NaCl, Si ou P .....	110
<b>Figura 40 -</b>	Atividade da peroxidase do ascorbato nas raízes de plântulas de sorgo, genótipo CSF 18, aos 4 dias após a semeadura, cultivadas na ausência ou presença de NaCl e em ausência ou presença de Si ou P .....	112
<b>Figura 41 -</b>	Análise dos desdobramentos de NaCl, dentro de cada nível de Si e P; de Si, dentro de cada nível de NaCl e P e; de P, dentro de cada nível de NaCl e Si, para a atividade da peroxidase do ascorbato nas raízes de plântulas de sorgo, genótipo CSF 20, aos 4 dias após a semeadura, cultivadas na ausência ou presença de NaCl, Si ou P .....	112
<b>Figura 42 -</b>	Análise dos desdobramentos de NaCl, dentro de cada nível de Si e P; de Si, dentro de cada nível de NaCl e P; e de P, dentro de cada nível de NaCl e Si, para a atividade da peroxidase do ascorbato na parte aérea de plântulas de sorgo, genótipos CSF 18 e CSF 20, aos 4 dias após a semeadura, cultivadas na ausência ou presença de NaCl, Si ou P .....	114
<b>Figura 43 -</b>	Análise dos desdobramentos de NaCl, dentro de cada nível de Si e P; de Si, dentro de cada nível de NaCl e P; e de P, dentro de cada nível de NaCl e Si, para a atividade da peroxidase do guaiacol nas raízes de plântulas de sorgo, genótipos CSF 18 e CSF 20, aos 4 dias após a semeadura, cultivadas na ausência ou presença de NaCl, Si ou P .....	116

<b>Figura 44 -</b>	Atividade da dismutase do superóxido na parte aérea de plântulas de sorgo, genótipos CSF 18 e CSF 20, aos 10 dias após a semeadura, cultivadas na ausência ou presença de NaCl e em ausência ou presença de Si ou P .....	117
<b>Figura 45 -</b>	Atividade da dismutase do superóxido na parte aérea de plântulas de sorgo, genótipos CSF 18 e CSF 20, aos 10 dias após a semeadura, cultivadas na ausência ou presença de NaCl e em ausência ou presença de Si ou P .....	119
<b>Figura 46 -</b>	Análise dos desdobramentos de NaCl, dentro de cada nível de Si e P; de Si, dentro de cada nível de NaCl e P; e de P, dentro de cada nível de NaCl e Si, para a atividade da catalase nas raízes de plântulas de sorgo, genótipos CSF 18 e CSF 20, aos 10 dias após a semeadura, cultivadas na ausência ou presença de NaCl, Si ou P .....	121
<b>Figura 47 -</b>	Análise dos desdobramentos de NaCl, dentro de cada nível de Si e P; de Si, dentro de cada nível de NaCl e P e; de P, dentro de cada nível de NaCl e Si, para a atividade da peroxidase do ascorbato nas raízes de plântulas de sorgo, genótipo CSF 18, aos 10 dias após a semeadura, cultivadas na ausência ou presença de NaCl, Si ou P .....	123
<b>Figura 48 -</b>	Atividade da peroxidase do ascorbato nas raízes de plântulas de sorgo, genótipo CSF 20, aos 10 dias após a semeadura, cultivadas na ausência ou presença de NaCl e em ausência ou presença de Si ou P .....	124

## LISTA DE TABELAS

	Página
<b>Tabela 1 -</b> Resumo da análise de variância dos valores médios de massa seca das raízes e da parte aérea, relação entre a massa seca da parte aérea e da raiz e comprimentos da raiz e da parte aérea de plântulas de sorgo, genótipos CSF 18 e CSF 20, aos 4 dias após a semeadura, cultivadas sob condições de estresse salino e em presença de silício e/ou fósforo .....	54
<b>Tabela 2 -</b> Resumo da análise de variância dos valores médios de massa seca das raízes e da parte aérea, relação entre a massa seca da parte aérea e da raiz e comprimentos da raiz e da parte aérea de plântulas de sorgo, genótipos CSF 18 e CSF 20, aos 10 dias após a semeadura, cultivadas sob condições de estresse salino e em presença de silício e/ou fósforo .....	62
<b>Tabela 3 -</b> Resumo da análise de variância dos valores médios dos teores de sódio e potássio nas raízes e na parte aérea de plântulas de sorgo, genótipos CSF 18 e CSF 20, aos 4 dias após a semeadura, cultivadas sob condições de estresse salino e em presença de silício e/ou fósforo .....	69
<b>Tabela 4 -</b> Resumo da análise de variância dos valores médios dos teores de sódio e potássio nas raízes e na parte aérea de plântulas de sorgo, genótipos CSF 18 e CSF 20, aos 10 dias após a semeadura, cultivadas sob condições de estresse salino e em presença de silício e/ou fósforo .....	75
<b>Tabela 5 -</b> Resumo da análise de variância dos valores médios dos teores de carboidratos solúveis nas raízes e na parte aérea de plântulas de sorgo, dos genótipos CSF 18 e CSF 20, aos 4 dias após a semeadura, cultivadas sob condições de estresse salino e em presença de silício e/ou fósforo .....	78
<b>Tabela 6 -</b> Resumo da análise de variância dos valores médios dos teores de N-aminossolúveis nas raízes e na parte de plântulas de sorgo, dos genótipos CSF 18 e CSF 20, aos 4 dias após a semeadura, cultivadas sob condições de estresse salino e em presença de silício e/ou fósforo .....	81
<b>Tabela 7 -</b> Resumo da análise de variância dos valores médios dos teores de prolina livre nas raízes e na parte aérea de plântulas de sorgo, dos genótipos CSF 18 e CSF 20, aos 4 dias após a semeadura, cultivadas sob condições de estresse salino e em presença de silício e/ou fósforo .....	85

<b>Tabela 8 -</b>	Resumo da análise de variância dos valores médios dos teores de proteínas solúveis nas raízes e na parte aérea de plântulas de sorgo, dos genótipos CSF 18 e CSF 20, aos 4 dias após a semeadura, cultivadas sob condições de estresse salino e em presença de silício e/ou fósforo .....	88
<b>Tabela 9 -</b>	Resumo da análise de variância dos valores médios dos teores de carboidratos solúveis nas raízes e na parte aérea de plântulas de sorgo, dos genótipos CSF 18 e CSF 20, aos 10 dias após a semeadura, cultivadas sob condições de estresse salino e em presença de silício e/ou fósforo .....	91
<b>Tabela 10 -</b>	Resumo da análise de variância dos valores médios dos teores de N-aminossolúveis nas raízes e na parte aérea de plântulas de sorgo, dos genótipos CSF 18 e CSF 20, aos 10 dias após a semeadura, cultivadas sob condições de estresse salino e em presença de silício e/ou fósforo .....	94
<b>Tabela 11 -</b>	Resumo da análise de variância dos valores médios dos teores de prolina livre nas raízes e na parte aérea de plântulas de sorgo, dos genótipos CSF 18 e CSF 20, aos 10 dias após a semeadura, cultivadas sob condições de estresse salino e em presença de silício e/ou fósforo .....	97
<b>Tabela 12 -</b>	Resumo da análise de variância dos valores médios dos teores de proteínas solúveis nas raízes e na parte aérea de plântulas de sorgo, dos genótipos CSF 18 e CSF 20, aos 10 dias após a semeadura, cultivadas sob condições de estresse salino e em presença de silício e/ou fósforo .....	102
<b>Tabela 13 -</b>	Resumo da análise de variância dos valores médios da atividade da dismutase do superóxido nas raízes e na parte aérea de plântulas de sorgo, dos genótipos CSF 18 e CSF 20, aos 4 dias após a semeadura, cultivadas sob condições de estresse salino e em presença de silício e/ou fósforo .....	105
<b>Tabela 14 -</b>	Resumo da análise de variância dos valores médios da atividade da catalase nas raízes e na parte aérea de plântulas de sorgo, dos genótipos CSF 18 e CSF 20, aos 4 dias após a semeadura, cultivadas sob condições de estresse salino e em presença de silício e/ou fósforo .....	108
<b>Tabela 15 -</b>	Resumo da análise de variância dos valores médios da atividade da peroxidase do ascorbato nas raízes e na parte aérea de plântulas de sorgo, genótipos CSF 18 e CSF 20, aos 4 dias após a semeadura, cultivadas sob condições de estresse salino e em presença de silício e/ou fósforo .....	111

<b>Tabela 16 -</b> Resumo da análise de variância dos valores médios da atividade da peroxidase do guaiacol nas raízes e na parte aérea de plântulas de sorgo, genótipos CSF 18 e CSF 20, aos 4 dias após a semeadura, cultivadas sob condições de estresse salino e em presença de silício e/ou fósforo .....	114
<b>Tabela 17 -</b> Resumo da análise de variância dos valores médios da atividade específica da enzima superóxido dismutase nas raízes e na parte aérea de plântulas de sorgo, genótipos CSF 18 e CSF 20, aos 10 dias após a semeadura, cultivadas sob condições de estresse salino e em presença de silício e/ou fósforo .....	118
<b>Tabela 18 -</b> Resumo da análise de variância dos valores médios da atividade da catalase nas raízes e na parte aérea de plântulas de sorgo, genótipos CSF 18 e CSF 20, aos 10 dias após a semeadura, cultivadas sob condições de estresse salino e em presença de silício e/ou fósforo ...	120
<b>Tabela 19 -</b> Resumo da análise de variância dos valores médios da atividade da peroxidase do ascorbato nas raízes e na parte aérea de plântulas de sorgo, genótipos CSF 18 e CSF 20, aos 10 dias após a semeadura, cultivadas sob condições de estresse salino e em presença de silício e/ou fósforo .....	122
<b>Tabela 20 -</b> Resumo da análise de variância dos valores médios da atividade da peroxidase do guaiacol nas raízes e na parte aérea de plântulas de sorgo, genótipos CSF 18 e CSF 20, aos 10 dias após a semeadura, cultivadas sob condições de estresse salino e em presença de silício e/ou fósforo .....	125

## LISTA DE ABREVIATURAS

- APX** – Peroxidase do ascorbato  
**ASC** – Ácido ascórbico  
**CAT** – Catalase  
**CPA** – Comprimento da parte aérea  
**CR** – Comprimento da raiz  
**CS** – Carboidratos solúveis  
**DHAR** - Redutase do desidroascorbato  
**DAS** – Dias após a sementeira  
**EROs** – Espécies reativas de oxigênio  
**G-POD** – Peroxidase do guaiacol  
**GR** - Redutase da glutatona  
**GSH** – Glutatona  
**MDA** - Monodesidroascorbato  
**MS** – Matéria seca  
**MSPA** – Matéria seca da parte aérea  
**MSR** – Matéria seca das raízes  
**P** – Fósforo  
**PA** – Parte aérea  
**PL** – Prolina livre  
**PPO** - Polifenoxidase  
**PR** – Proteína solúveis  
**R** – Raízes  
**S** – Estresse salino  
**Si** – Silício  
**SOD** – Superóxido dismutase  
**TOC** - Tocoferóis

## SUMÁRIO

	<b>Página</b>
<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>24</b>
<b>1.1 Objetivos .....</b>	<b>26</b>
<i>1.1.1 Objetivo geral .....</i>	<i>26</i>
<i>1.1.2 Objetivos específicos .....</i>	<i>26</i>
<b>2 REVISÃO DE LITERATURA .....</b>	<b>27</b>
<b>2.1 Cultura do sorgo .....</b>	<b>27</b>
<i>2.1.1 Características gerais .....</i>	<i>27</i>
<i>2.1.2 Características agronômicas .....</i>	<i>28</i>
<i>2.1.3 Resposta ao estresse salino .....</i>	<i>29</i>
<b>2.2 Salinidade .....</b>	<b>30</b>
<i>2.2.1 Salinidade nos solos .....</i>	<i>30</i>
<i>2.2.2 Efeito da salinidade nas plantas .....</i>	<i>31</i>
<i>2.2.2.1 Salinidade, crescimento e desenvolvimento .....</i>	<i>32</i>
<i>2.2.2.2 Salinidade e o ajustamento osmótico .....</i>	<i>34</i>
<i>2.2.2.3 Salinidade e o controle do excesso de íons .....</i>	<i>35</i>
<i>2.2.2.4 Salinidade e o estresse oxidativo .....</i>	<i>37</i>
<b>2.3 Silício .....</b>	<b>39</b>
<i>2.3.1 Silício no solo .....</i>	<i>39</i>
<i>2.3.2 Silício na planta .....</i>	<i>40</i>
<i>2.3.3 Silício e o estresse salino .....</i>	<i>42</i>
<b>2.4 Fósforo .....</b>	<b>43</b>
<i>2.4.1 Fósforo no solo .....</i>	<i>43</i>
<i>2.4.2 Fósforo na planta .....</i>	<i>44</i>
<i>2.4.3 Efeito do fósforo com condições de estresse salino .....</i>	<i>46</i>
<b>3 MATERIAL E MÉTODOS .....</b>	<b>47</b>
<b>3.1 Material vegetal, delineamento experimental e condições de semeadura .....</b>	<b>47</b>
<b>3.2 Variáveis de crescimento .....</b>	<b>48</b>
<b>3.3 Teores de Na<sup>+</sup> e K<sup>+</sup> .....</b>	<b>48</b>

<b>3.4</b>	<b>Solutos orgânicos</b> .....	48
<b>3.4.1</b>	<b><i>Carboidratos solúveis</i></b> .....	48
<b>3.4.2</b>	<b><i>N-aminossolúveis</i></b> .....	49
<b>3.4.3</b>	<b><i>Prolina livre</i></b> .....	50
<b>3.5</b>	<b>Proteínas solúveis</b> .....	50
<b>3.6</b>	<b>Enzimas de proteção contra danos oxidativos</b> .....	51
<b>3.6.1</b>	<b><i>Atividade da dismutase do superóxido</i></b> .....	51
<b>3.6.2</b>	<b><i>Atividade da catalase</i></b> .....	51
<b>3.6.3</b>	<b><i>Atividade da peroxidase do ascorbato</i></b> .....	52
<b>3.6.4</b>	<b><i>Atividade da peroxidase do guaiacol</i></b> .....	52
<b>3.7</b>	<b>Análise Estatística</b> .....	52
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	53
<b>4.1</b>	<b>Crescimento</b> .....	53
<b>4.1.1</b>	<b><i>Aos 4 DAS</i></b> .....	53
<b>4.1.2</b>	<b><i>Aos 10 DAS</i></b> .....	61
<b>4.2</b>	<b>Teores de Na<sup>+</sup> e K<sup>+</sup></b> .....	68
<b>4.2.1</b>	<b><i>Aos 4 DAS</i></b> .....	68
<b>4.2.2</b>	<b><i>Aos 10 DAS</i></b> .....	74
<b>4.3</b>	<b>Solutos orgânicos e proteínas solúveis</b> .....	77
<b>4.3.1</b>	<b><i>Aos 4 DAS</i></b> .....	77
<b>4.3.1.1</b>	<b><i>Carboidratos solúveis</i></b> .....	77
<b>4.3.1.2</b>	<b><i>N-aminossolúveis</i></b> .....	81
<b>4.3.1.3</b>	<b><i>Prolina livre</i></b> .....	84
<b>4.3.1.4</b>	<b><i>Proteínas solúveis</i></b> .....	88
<b>4.3.2</b>	<b><i>Aos 10 DAS</i></b> .....	90
<b>4.3.2.1</b>	<b><i>Carboidratos solúveis</i></b> .....	90
<b>4.3.2.2</b>	<b><i>N-aminossolúveis</i></b> .....	93
<b>4.3.2.3</b>	<b><i>Prolina livre</i></b> .....	97
<b>4.3.2.4</b>	<b><i>Proteínas solúveis</i></b> .....	101
<b>4.4</b>	<b>Atividade das enzimas antioxidantes</b> .....	104
<b>4.4.1</b>	<b><i>Aos 4 DAS</i></b> .....	104
<b>4.4.1.1</b>	<b><i>Dismutase do superóxido (SOD)</i></b> .....	104
<b>4.4.1.2</b>	<b><i>Catalase (CAT)</i></b> .....	107



4.4.1.3	<i>Peroxidase do ascorbato (APX)</i> .....	111
4.4.1.4	<i>Peroxidase do guaiacol (G-POD)</i> .....	114
<b>4.4.2</b>	<b><i>Aos 10 DAS</i></b> .....	118
4.4.2.1	<i>Dismutase do superóxido (SOD)</i> .....	118
4.4.2.2	<i>Catalase (CAT)</i> .....	120
4.4.2.3	<i>Peroxidase do ascorbato (APX)</i> .....	122
4.4.2.4	<i>Peroxidase do guaiacol (G-POD)</i> .....	124
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES</b> .....	126
	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	127

## 1 INTRODUÇÃO

O sorgo é uma importante cultura, sendo a quinta maior em produção de grãos do mundo, atrás apenas do milho, do trigo, do arroz e da cevada (CONAB, 2016a). Devido à sua rusticidade natural e à grande versatilidade de utilização, o sorgo pode ser cultivado em áreas submetidas a condições adversas, como áreas salinizadas. De acordo com alguns autores, o sorgo é reconhecido por sua tolerância moderada ao estresse salino (TABOSA *et al.*, 2007; OLIVEIRA; GOMES FILHO, 2011). Essa espécie pode se constituir uma alternativa viável para o aproveitamento de recursos de água e solos afetados por sais (KRISHNAMURTHY *et al.*, 2007; MORAIS NETO, 2009), principalmente em regiões áridas e semiáridas, com elevadas taxas evapotranspiratórias e baixas precipitações pluviométricas, as quais favorecem os processos de acúmulo de sais no solo (MEDEIROS, 2010). Somado a esses fatores, está o manejo inadequado do solo e da água, que contribui para o aumento da salinidade nessas regiões.

A salinidade é um dos estresses abióticos que mais limitam o crescimento e a produtividade agrícola (HASHEMI; ABDOLZADEH; SADEGHIPOUR, 2010). Com o aumento da salinidade no meio de crescimento, a germinação e o desenvolvimento das plântulas são comprometidos. É provável que isso ocorra em virtude da redução da absorção de água pelas plantas, devido ao excesso de sais, causando redução no potencial hídrico do solo que associada aos efeitos tóxicos dos sais no protoplasma da semente, prejudicam a germinação e a velocidade da germinação, resultando na formação de plântulas com crescimento reduzido, caracterizado pela diminuição no comprimento e menor acúmulo de biomassa (SILVA *et al.*, 2007; BARROSO; FRANKE; BARROSO, 2010).

Além desses distúrbios, o estresse salino pode acarreta o acúmulo de espécies reativas de oxigênio (EROs) nas células vegetais, que danificam o metabolismo celular, causam, dentre outros problemas a fotoinibição, a fotooxidação nos cloroplastos, a inativação de enzimas, a degradação de pigmentos fotossintéticos e a peroxidação lipídica de membranas celulares, além de danos ao DNA (WILLADINO *et al.*, 2011; ASHRAF; HARRIS, 2013). Para evitar os danos oxidativos, a concentração das EROs é mantida em níveis não tóxicos por meio de mecanismos antioxidantes enzimáticos e não enzimáticos (MOLLER *et al.*, 2007). Dentre os mecanismos enzimáticos envolvidos na detoxificação das EROs, destacam-se as dismutase do superóxido (SOD), a catalase (CAT), a peroxidase do guaiacol (G-POD) e a peroxidase do ascorbato (APX) (MILLER *et al.*, 2010). Essas enzimas convertem os compostos potencialmente danosos ao metabolismo vegetal em H<sub>2</sub>O e O<sub>2</sub> (WANG *et al.*, 2013; GILL *et*

*al.*, 2013). Para garantir sua sobrevivência em condições ambientais desfavoráveis, as plantas também acumulam solutos compatíveis, que aumentam a habilidade das células em reter a água, sem afetar o metabolismo normal (HAMILTON; HECKATHORN, 2001). No entanto, os mecanismos de tolerância à salinidade também envolvem processos complexos de transporte iônico e síntese molecular e indução enzimática e não enzimática (TAIZ; ZEIGER, 2013).

Estudos têm demonstrado que o silício atenua os efeitos deletérios do estresse salino nas plantas, como preconizam Ashraf *et al.* (2010), Lee *et al.* (2010), Shi *et al.* (2013) e Zhu e Gong (2014), os quais verificaram que a aplicação do Si estimulou o crescimento de plantas de cana de açúcar (*Saccharum officinarum* L.), soja (*Glycine max* L.), arroz (*Oryza sativa* L.) e milho (*Zea mays* L.) cultivadas em meio salino, respectivamente. No entanto, ainda não foram descobertos nem completamente elucidados todos os mecanismos pelos quais o silício contribui com a tolerância ao estresse salino. Prova disto é que vários autores têm proposto várias hipóteses tentando explicar o efeito do silício sobre o estresse salino, porém nenhuma tem uma evidência clara. Dentro destas proposições são três hipóteses que têm ganhado mais aceitabilidade na comunidade científica. A primeira, é que o silício diminui a concentração de sais na planta devido à diminuição da transpiração pelo acúmulo do elemento nas folhas; a segunda é que o silício diminui o transporte de sódio nas raízes e a terceira, é que esse elemento tem funções fisiológicas que aumentam o metabolismo antioxidante (SHI *et al.*, 2013).

Da mesma forma, alguns estudos têm sido desenvolvidos para avaliar a influência da adubação fosfatada em plantas cultivadas sob condições salinas. De acordo com Shibli *et al.* (2001), o aumento de doses de P pode minimizar os efeitos adversos da salinidade sobre o desenvolvimento das plantas. Assim, uma adequada nutrição fosfatada é de fundamental importância em plantas cultivadas sob condições de estresse salino. No entanto, segundo Grattan e Grieve (1999), a interação entre salinidade e nutrição fosfatada em plantas é bastante complexa e dependente da espécie vegetal ou cultivar dentro de uma mesma espécie, do estágio de desenvolvimento, da composição e da disponibilidade de P no substrato.

Diante do exposto, é possível que a aplicação combinada do silício com o fósforo seja uma alternativa eficiente para minimizar os efeitos danosos causados pela salinidade às culturas, do que a aplicação individualizada de cada. Apesar de alguns trabalhos evidenciarem que o silício e o fósforo minimizam os efeitos do estresse salino em sorgo, pouco se sabe sobre os efeitos da aplicação conjunta deles nas respostas fisiológicas e bioquímicas em plântulas de sorgo em condições de estresse salino.

## 1.1 Objetivos

### 1.1.1 Objetivo geral

Esta pesquisa teve como objetivo estudar os efeitos da aplicação de silício e fósforo no estabelecimento de plântulas de dois genótipos de sorgo, submetidos ao estresse salino, avaliando o crescimento inicial, a homeostase  $\text{Na}^+/\text{K}^+$ , o acúmulo de solutos orgânicos e proteínas solúveis, bem como a atividade de enzimas do sistema antioxidativo.

### 1.1.2 Objetivos específicos

Utilizando-se plântulas de sorgo dos genótipos CSF 18 e CSF 20, aos 4 e 10 dias após a semeadura, sob condições controle e de estresse salino, avaliou-se o efeito da aplicação conjunta do silício e fósforo:

- No crescimento, por meio das medidas de comprimento e de massa seca das raízes e parte aérea;
- Na homeostase iônica, determinando-se os teores de  $\text{Na}^+$  e  $\text{K}^+$  das raízes e parte aérea;
- No acúmulo de solutos orgânicos (carboidratos solúveis, N-aminossolúveis e prolina) e proteínas solúveis nas raízes e parte aérea;
- Na atividade das enzimas do sistema de defesa antioxidativo (SOD, APX, CAT e G-POD) nas raízes e parte aérea.

## 2 REVISÃO DE LITERATURA

### 2.1 Cultura do sorgo

#### 2.1.1 Características gerais

O sorgo (*Sorghum bicolor* L. Moench) pertencente à família Poaceae, sendo uma espécie originária da região central do continente africano (PURCINO, 2011). Foi domesticada, provavelmente, na Etiópia, há cerca de 7.000 anos, quando, em seguida, foi distribuída por toda a África, pelas rotas de comércio. Do Oriente Médio, o sorgo chegou à Índia, há 3.000 anos; da Índia, ele alcançou a China pela rota da seda, no século III. Na América do Norte, o sorgo chegou em 1857, nos Estados Unidos, pelos escravos, e depois chegou à América Latina e à Austrália (SANTOS; CASELA; WAQUIL, 2005).

Embora o sorgo seja uma cultura antiga, foi no final do século XIX que apresentou importância entre os cereais, sendo hoje o quinto mais produzido no mundo, atrás apenas do arroz (*Oryza sativa* L.), do trigo (*Triticum aestivum* L.), do milho (*Zea mays* L.) e da cevada (*Secale cereale* L.) (FAO, 2012). A África e a Ásia respondem por mais de 90% da área plantada no mundo, destacando-se a Nigéria e o Sudão, no continente africano, e a China e Índia, no asiático. Os EUA são os maiores produtores do planeta, com 25% do total produzido. Na América Latina, a produção é significativa no México, na Argentina, na Colômbia, na Venezuela, além de no Brasil (KILL; MENEZES, 2005). A produção mundial de sorgo, para a safra de 2015/16, está estimada, de acordo com o último relatório de Oferta e Demanda do Departamento de Agricultura dos Estados Unidos (USDA), em 67,1 milhões de toneladas, representando um aumento de 5,5% (3,53 milhões de toneladas) em relação aos 63,6 milhões de toneladas produzidas na safra de 2014/15 (CONAB, 2016a).

No Brasil, a cultura de sorgo expandiu-se a partir de 1971, por iniciativa de empresas produtoras de sementes e rações, como uma alternativa promissora para substituir o milho, por ser mais rústica e de grande adaptabilidade climática (MARIGUELE; SILVA, 2002). Todavia, a área cultivada com sorgo somente deu um salto extraordinário, a partir do início dos anos 90, passando de 78.209 ha para 137.758 ha (RIBAS, 2003). Para a safra de 2015/2016, estima-se que o Brasil terá uma área plantada de 698,8 mil ha de sorgo, sendo o Centro-Oeste e o Sudeste as regiões com maiores áreas plantadas, com 360,6 e 174,4 mil ha, respectivamente (CONAB, 2016b). No entanto, vale ressaltar que, nos últimos anos, houve uma intensificação do cultivo

de sorgo na região Nordeste, hoje a terceira maior área plantada de sorgo no Brasil, sendo a Bahia o maior produtor dessa região (IBGE, 2015).

O sorgo possui múltipla utilização, desde a alimentação humana, como na maioria dos países da África e da Ásia, até a alimentação animal, que predomina na maioria dos países ocidentais que o utilizam como principal substituto do milho. Esta espécie é classificada em diferentes tipos de acordo com o seu potencial de uso para os diferentes fins da agroindústria. O sorgo pode ser do tipo forrageiro, destinado à produção de forragem para silagem ou pastagem para animais; do tipo granífero, destinado à produção de grãos; do tipo vassoura, cultivado essencialmente no sul do país para a confecção de vassouras caseiras; e por fim, do tipo sacarino, que apresenta a característica de acumular altos teores de açúcares fermentescíveis no colmo (PONTES, 2013).

Para a utilização específica na agropecuária, o sorgo é destinado à ração animal, silagem e pastejo. Com o uso de variedades híbridas de elevadas qualidades e produtividades, o sorgo vem se transformando em uma cultura de grande expressão para a produção animal (ração), devido a um conjunto de fatores como: alto potencial de produção; boa adequação à mecanização; reconhecida qualificação como fonte de energia para arraçamento animal; grande versatilidade (feno, silagem e pastejo direto); e facilidade de adaptação às regiões secas, tornando-se, assim, uma cultura mais segura que a do milho, mesmo apresentando preços menos convidativos (NEUMANN *et al.*, 2002). Além disso, a cultura tem mostrado bom desempenho como alternativa para o uso no sistema de integração lavoura/pecuária e para a produção de massa vegetal, proporcionando maior proteção do solo contra erosão, maior quantidade de matéria orgânica e melhor capacidade de retenção de água no solo, além de proporcionar condições para o uso no plantio direto (REUNIÃO TÉCNICA ANUAL DE MILHO E SORGO, 2013).

### ***2.1.2 Características agronômicas***

O sorgo é uma gramínea anual, típica de clima quente, de baixa exigência quanto à fertilidade de solo e tolerante/resistente a fatores abióticos, tais como: estresse hídrico, salinidade e encharcamento (BONFIM-SILVA *et al.*, 2012). Essa resistência/tolerância a fatores abióticos é devido às características morfofisiológicas do sistema radicular e da parte aérea dos diferentes genótipos de sorgo. O sistema radicular, composto por raízes finas e ramificadas e com desenvolvimento subsuperficial, permite que a planta absorva uma maior quantidade de água em um mesmo volume de solo (SILVA, 2011). O acúmulo de água em

maior quantidade nas raízes, colmos e bainhas do que nas folhas, juntamente com uma camada espessa de cera que recobre a epiderme das folhas (cutícula), contribui para que ocorra uma menor taxa de transpiração e desidratação e maior tolerância ao estresse hídrico (VIEIRA, 2006).

A planta de sorgo possui características fisiológicas que a permitem paralisar o seu crescimento e reduzir sua atividade metabólica durante o período de estresse hídrico, sendo capaz de reiniciar seu crescimento e aumentar sua atividade metabólica logo que a água se torna disponível (MASOJIDEK *et al.*, 1991; AMARAL *et al.*, 2003). Essa paralisação no crescimento faz com que as plantas acumulem fotoassimilados antes da ocorrência do estresse hídrico, os quais podem manter um crescimento mais acelerado após o término do estresse (DONATELLI; HAMMER, VANDERLIP, 1992).

Quanto às características do solo, o sorgo é considerado tolerante a diversas condições, podendo ser cultivado satisfatoriamente em solos que variam de argilosos a ligeiramente arenosos. No entanto, apesar de bem adaptado a solos arenosos e de baixa fertilidade, o sorgo responde melhor em solos de textura leve a média, bem preparados, com acidez corrigida, ricos em matéria orgânica, pH entre 5,5 e 6,5, topografia plana e sem excesso de umidade (LANDAU; SANS, 2010).

Segundo Silva (2003), para alcançar altas produtividades, o sorgo requer dias e noites quentes, com temperaturas médias acima de 25 °C, atingindo a maturidade entre 90 e 140 dias. É uma espécie indicada para regiões que apresentam regime hídrico desfavorável, com precipitações variando de 400 a 600 mm por ano ou menos.

Assim, o sorgo pode ser cultivado em zonas áridas e semiáridas, como é o caso do Nordeste brasileiro, onde metade da região está sob a influência de fatores adversos, apresentando uma área de cerca de 840 000 km<sup>2</sup>, classificada como semiárida. A precipitação média anual, nessa área, varia de 500 a 1.000 mm, com grandes áreas apresentando precipitação abaixo de 750 mm (TABOSA *et al.*, 1993).

### **2.1.3 Resposta ao estresse salino**

O sorgo, de acordo com Ayres e Westcot (1999), tem sido reconhecido por sua tolerância moderada ao estresse salino. Rhoades, Kandiah e Mashali (2000) afirmam que o sorgo tem sua salinidade limiar em torno de 6,8 dS m<sup>-1</sup> (condutividade elétrica do extrato de saturação do solo) e 4,5 dS m<sup>-1</sup> (condutividade elétrica da água de irrigação), com as plantas já estabelecidas no campo. No entanto, Saadat e Homae (2015), estudando níveis de salinidade

em plantas jovens de sorgo, encontraram um limiar de salinidade de 1 dS m<sup>-1</sup> para as plântulas, sendo que em 11 dS m<sup>-1</sup> o desenvolvimento das plântulas apresentou redução de 50%.

Coelho (2013), estudando a influência da salinidade nos aspectos nutricionais e morfológicos de vários genótipos de sorgo forrageiro, concluiu que sua moderada tolerância à salinidade provavelmente está associada à ativação de mecanismos, tais como: restrição no acúmulo de sódio nas folhas; aumento da eficiência do uso da água; ajustamento osmótico, com acúmulo predominante de açúcares solúveis, principalmente redutores; e manutenção na síntese e proteção de pigmentos, como as clorofilas.

Oliveira (2002), avaliando o efeito do estresse salino provocado por concentrações iso-osmóticas de NaCl + KCl, em diferentes combinações, sobre o crescimento e o acúmulo de íons em folhas de dois genótipos de sorgo forrageiro, um sensível (CSF 18) e outro tolerante (CSF 20), comprovou que o genótipo sensível foi o mais afetado pelo estresse salino, sendo que sua maior sensibilidade parece estar relacionada com o maior acúmulo de íons potencialmente tóxicos, menor acúmulo de K<sup>+</sup> e maior relação Na<sup>+</sup>/K<sup>+</sup> nos tecidos foliares. No entanto, o aumento das concentrações de KCl na solução nutritiva resultou na diminuição dos teores de Na<sup>+</sup> e no aumento dos teores de K<sup>+</sup> nas folhas, porém isso não resultou em uma maior tolerância ao estresse salino. Por outro lado, Silva *et al.* (2003a) observaram que a salinidade reduziu a produção de matéria seca das raízes e da parte aérea, a área foliar, o tamanho e o número de folhas emitidas e a taxa de crescimento relativo de plantas de sorgo em fase de crescimento vegetativo, sendo esses efeitos mais pronunciados no genótipo CSF 18. Esse genótipo apresentou maiores acúmulos de íons potencialmente tóxicos (Na<sup>+</sup> e Cl<sup>-</sup>) e de prolina nos tecidos fotossintetizantes, enquanto o genótipo CSF 20 apresentou maiores teores de carboidratos solúveis e maiores teores de K<sup>+</sup>. Portanto, a grande capacidade de adaptação do sorgo é bastante útil e permite a utilização dessa espécie com rendimentos economicamente aceitáveis, principalmente quando o cultivo em condições salinas é inevitável, o que permite o aproveitamento de solo e águas salinas (AQUINO; LACERDA; GOMES-FILHO, 2007).

## **2.2 Salinidade**

### **2.2.1 Salinidade nos solos**

O termo salinidade se refere à existência de níveis de sais solúveis no solo que possam prejudicar significativamente o rendimento das plantas cultivadas (RIBEIRO *et al.*, 2007; MUNNS; TESTER, 2008). Os sais mais frequentes em solos salinos são os formados



por cátions de cálcio, magnésio e sódio e ânions de cloreto e sulfato; também, com menos frequência, nesses solos encontram-se outros íons, como o potássio, carbonatos, bicarbonatos e nitratos (AYRES; WESTCOT, 1999; QADIR *et al.*, 2007; HOLANDA *et al.*, 2010).

De acordo com Richards (1954), os solos são considerados salinos, quando a condutividade elétrica do extrato de saturação ( $CE_{es}$ ) é  $\geq 4 \text{ dS m}^{-1}$  e a porcentagem de sódio trocável (PST) é  $< 15\%$ , sendo que, o pH desses solos é  $< 8,5$ . A elevada concentração de sais no solo pode ocorrer em função de características naturais (salinização primária), ou pode ser decorrente das atividades humanas (salinização secundária). A salinização primária dos solos pode ocorrer pela intemperização das rochas e pela deposição de sais provenientes dos oceanos pela ação das chuvas ou ventos (RICHARDS, 1954; RIBEIRO; BARROS; FREIRE, 2009; MUNNS, 2012). A salinização é denominada secundária quando a elevação na concentração dos sais é resultante de alguma atividade antrópica, geralmente associada ao desmatamento, ao excesso de água de irrigação, ao padrão de água de irrigação abaixo do recomendado, uso de adubos químicos e sistema de drenagem ineficientes (RIBEIRO *et al.*, 2003; MUNNS, 2016).

As zonas de clima árido e semiárido, onde está inserida a região de escassez de água no Nordeste brasileiro, que ocupa uma extensão de 150 milhões de hectares, possuem condições favoráveis à ocorrência de solos afetados por excesso de sais, em virtude das características de clima, relevo, geologia e drenagem, entre outros fatores. Nessa parte do Nordeste, a maioria dos perímetros de irrigação apresenta reflexos da degradação, que vão desde a diminuição nos rendimentos das culturas até o abandono das áreas exploradas (RIBEIRO, 2010).

Portanto, o desenvolvimento de pesquisas que possibilitem o melhor manejo do solo e da água, face às projeções futuras de aumento da população e da demanda por alimentos, configura-se como de grande importância para a produção agrícola nessa região, tendo em vista que a prática da irrigação, a qual vem aumentando nas últimas décadas, apresenta-se como a única maneira de garantir a produção agrícola com segurança no semiárido (HOLANDA *et al.*, 2010).

### ***2.2.2 Efeito da salinidade nas plantas***

Um dos efeitos mais imediatos do estresse salino envolve a inibição considerável no crescimento e desenvolvimento vegetal. Essa alteração é decorrente dos efeitos iônico, osmótico ou de ambos (MUNNS; TESTER, 2008; SILVEIRA *et al.*, 2010; HASEGAWA, 2013). Os efeitos iônicos resultam da elevada absorção de íons, especialmente  $Na^+$  e  $Cl^-$ , que alteram a homeostase iônica das células, a qual é essencial para as atividades de muitas enzimas

citossólicas e para a manutenção do potencial de membrana celular (YU; WANG; WANG, 2012). Por outro lado, os efeitos osmóticos decorrem das elevadas concentrações de sais na solução do solo, os quais reduzem o potencial hídrico do ambiente radicular, acarretando a diminuição da disponibilidade de água aos tecidos celulares, limitando, dessa forma, as etapas de crescimento e expansão celular (DIAS; BLANCO, 2010; PRISCO; GOMES-FILHO, 2010; ALVES *et al.*, 2011). Secundariamente, a salinidade também induz o estresse oxidativo, ao provocar o acúmulo de espécies reativas de oxigênio (EROs), tais como o peróxido de hidrogênio ( $H_2O_2$ ) e os radicais livres superóxido ( $\cdot O_2^-$ ) e hidroxil ( $\cdot OH$ ). Tais espécies, quando em altas concentrações, são prejudiciais à célula, podendo causar danos oxidativos aos lipídios de membrana, proteínas e ácidos nucleicos (MITTLER, 2002; AZEVEDO NETO; GOMES-FILHO; PRISCO, 2008).

O grau com que a salinidade afeta o crescimento depende de fatores intrínsecos à planta (espécie, cultivar e estágio de desenvolvimento), fatores relacionados ao estresse (tipo de sal, concentração salina, tempo de exposição aos sais e seu modo de aplicação) e fatores ambientais (luz, temperatura e umidade relativa do ar), bem como depende da interação entre eles (BRAY; BAILEY-SERRES; WERETILNYK, 2000).

Enquanto algumas espécies apresentam elevada tolerância à salinidade (halófitas), outras são altamente suscetíveis (glicófitas). A maioria das culturas é afetada por uma condutividade elétrica do extrato de saturação do solo ( $CE_{es}$ ) superior a  $3,0 \text{ dS m}^{-1}$  (CHINNUSAMY; JAGENDORF; ZHU, 2005). Convém salientar que, mesmo em baixas concentrações de sais, a maioria das espécies tem seu crescimento inibido ou retardado (GREENWAY; MUNNS, 1980).

#### 2.2.2.1 Salinidade, crescimento e desenvolvimento

A principal resposta das plantas à salinidade é a inibição do crescimento (GHOULAM; FOURSRY; FARES, 2002). Com o aumento dos níveis de NaCl, todos os aspectos de crescimento das plantas (altura, número de folhas, massa seca das raízes, caules e folhas) são reduzidos (OLIVEIRA *et al.*, 2010; PATEL *et al.*, 2010; SAYYED *et al.*, 2014; SANTOS *et al.*, 2016). De acordo com alguns autores, o crescimento da parte aérea é geralmente mais afetado que o do sistema radicular, sendo observada uma redução na razão de massa seca entre a parte aérea e a raiz (MUNNS; TESTER, 2008; MATOS *et al.*, 2013).

Os efeitos deletérios da salinidade no crescimento das plantas estão associados com a redução do potencial de solutos do solo (estresse hídrico), distúrbios nutricionais, efeitos

específicos de alguns íons (estresse iônico) ou uma combinação desses fatores (ASHRAF, 1994). Santos (2006), destaca que a redução da taxa de crescimento das plantas sob estresse salino ocorre de forma mais acentuada nos tecidos jovens, afetando tanto o processo de divisão como o de expansão celular.

Uma hipótese, formulada por Munns e Termaat (1986), propõe que a inibição do crescimento caracteriza-se por ser uma resposta bifásica, na qual a diminuição do potencial de solutos seria o primeiro fator de redução do crescimento, e o efeito específico dos íons, o segundo (MUNNS, 1993; MUNNS, 2002). Na primeira fase, que se manifesta em uma escala de tempo de horas ou dias, a redução no crescimento vegetal resulta do efeito osmótico dos sais presentes no solo (estresse hídrico). Nessa etapa, diferentes cultivares de uma mesma espécie mostram uma redução similar no crescimento, não havendo respostas celulares e fisiológicas contrastantes que permitam a discriminação de cultivares com tolerâncias diferenciadas à salinidade. A segunda fase inicia-se após semanas ou meses de exposição ao estresse salino, quando os sais absorvidos começam a se acumular em níveis excessivos nas folhas, excedendo a habilidade das células em compartimentar os sais no vacúolo. Consequentemente, a concentração de sais no citosol aumenta e inibe a atividade de enzimas de várias rotas metabólicas (MUNNS, 2005). Alternativamente, os sais podem ser transportados para as paredes celulares, o que resulta, por sua vez, na desidratação das células (MUHLING; LAUCHLI, 2002). Essa segunda fase é a que separa claramente espécies e genótipos que diferem na habilidade de tolerar a salinidade (MUNNS, 2002).

A injúria provocada pelo acúmulo excessivo de íons tóxicos, sódio e cloreto, especialmente, manifesta-se como clorose marginal e surgimento de manchas necróticas (MUNNS, 2002; SILVA, 2003; CUNHA *et al.*, 2013), que contribuem para a aceleração dos processos de senescência e abscisão foliar (MATOS *et al.*, 2013) e para a redução da área foliar disponível para a fotossíntese, a qual pode resultar em perda de biomassa dos órgãos da planta (PARIDA; DAS, 2005; NASCIMENTO *et al.*, 2015). Decréscimos na produção de biomassa da parte aérea e das raízes foram observados em várias espécies, incluindo: feijão caupi (LIMA *et al.*, 2007), soja (TUNÇTURK; TUNÇTURK; YASAR, 2008), banana (SILVA JUNIOR *et al.*, 2012a), sorgo (MAHMOOD *et al.*, 2010), mamoneira (SOARES *et al.*, 2012) e abóbora (KURUM *et al.*, 2013). Outro fator que também pode contribuir para a diminuição da biomassa em condições de estresse salino é o redirecionamento do fluxo de carbono para os processos que não estão diretamente envolvidos no crescimento, como por exemplo, aqueles relacionados ao ajustamento osmótico das plantas cultivadas em ambientes salinos (BINZEL *et al.*, 1985).

### 2.2.2.2 Salinidade e o ajustamento osmótico

O primeiro efeito da salinidade nas plantas pode ser descrito como efeito osmótico. À medida que o teor de umidade do solo diminui, as forças de retenção da água restante tornam-se maiores. Quando a água do solo é retida com força superior às forças de extração, inicia-se a escassez de água na planta (CAVALCANTI *et al.*, 2005). A acumulação de sais no solo proporciona uma diminuição no potencial osmótico e, conseqüentemente, no potencial hídrico do solo, acarretando redução no gradiente do potencial hídrico no sistema solo - água - planta, o qual aumenta as forças que retêm a água do solo e, portanto, favorecem o problema de escassez de água na planta (LÚCIO, 2008).

Na presença de déficit hídrico, as plantas podem utilizar mecanismos de tolerância, como o ajustamento osmótico, para conseguir manter o gradiente de potencial hídrico favorável à absorção de água. O ajustamento osmótico, ou osmorregulação, é um processo pelo qual o potencial osmótico celular é reduzido, devido ao acúmulo de solutos inorgânicos (íons) do meio externo, ou pela mobilização de seus próprios constituintes orgânicos, acarretando diminuição do potencial hídrico, sem que ocorra diminuição na turgescência celular (YAMAGUCHI; BLUMWALD, 2005; TAIZ; ZEIGER, 2013). Segundo esses autores, com a manutenção da turgescência, é possível a continuação do alongamento celular e uma condutância estomática mais alta sob potenciais hídricos mais baixos, sugerindo assim que o ajustamento osmótico seja um processo de aclimação das plantas às condições de seca ou de salinidade, podendo, de acordo com Hasegawa *et al.* (2000), ocorrer tanto em plantas halófitas quanto em glicófitas. O ajustamento osmótico pode contribuir para a manutenção dos processos fisiológicos, tais como a abertura estomática, a fotossíntese e a expansão celular (SERRAJ; SINCLAIR, 2002).

Em geral, os solutos inorgânicos, principalmente os íons  $\text{Na}^+$  e  $\text{Cl}^-$ , são compartimentados no vacúolo, enquanto os solutos orgânicos, (carboidratos solúveis, N-aminossolúveis, prolina, betaínas, etc.), que são compatíveis com as atividades metabólicas celulares, acumulam-se no citosol, equilibrando dessa forma o potencial hídrico entre os diversos compartimentos celulares (PRISCO; GOMES-FILHO, 2010; CHIRAZ *et al.*, 2012; ASHRAF; HARRIS, 2013). Além de sua participação no ajustamento osmótico, esses solutos compatíveis também atuam na estabilização da estrutura de proteínas e membranas, e na remoção de EROs (AZEVEDO NETO; GOMES-FILHO; PRISCO, 2008). Do ponto de vista energético, o ajustamento osmótico utilizando íons inorgânicos é menos dispendioso do que através da síntese de solutos orgânicos (CHINNUSANMY; JAGENDORF; ZHU, 2005), a qual pode limitar o crescimento, por desviar substratos de vias metabólicas essenciais (MUNNS,

2005).

Os solutos que mais comumente participam do ajustamento osmótico são os aminoácidos, dentre eles a prolina, os compostos quaternários de amônio, como a glicina betaina, os carboidratos solúveis e os poliálcoois (ASHRAF; HARRIS, 2013; CHANG *et al.*, 2014).

Os carboidratos solúveis são considerados, em muitas plantas, os principais osmólitos (CONCEIÇÃO, 2015). Segundo Kerepesi e Galiba (2000), as alterações nos teores de carboidratos podem ser de grande importância para a adaptação das plantas submetidas à salinidade, devido à sua relação direta com alguns processos fisiológicos, como a fotossíntese, a translocação e a respiração. Em contrapartida, para Lutts, Majerus e Kinet (1999) o acúmulo de prolina é uma das modificações mais frequentemente reportadas, sendo induzida pelo déficit hídrico e pelo estresse salino em plantas. Apesar da forte correlação entre tolerância aos estresses e acúmulo de prolina em plantas superiores, essa relação não é universal (ASHRAF; FOOLAND, 2007), pois alguns autores sugerem que o acúmulo de prolina é apenas uma consequência do estresse e não uma resposta adaptativa (COSTA *et al.*, 2003). No entanto, o acúmulo de prolina em plantas submetidas ao estresse tem sido relacionado mais à tolerância do que à susceptibilidade às condições de estresse (ASHRAF; FOOLAND, 2007).

### 2.2.2.3 Salinidade e o controle do excesso de íons

Em condições fisiológicas normais, as plantas mantêm elevadas concentrações de  $K^+$  (100–200 mM) e baixas concentrações de  $Na^+$  (0–10 mM) no citosol (BLUMWALD; AHARON; APSE, 2000). Essa situação é essencial aos processos fisiológicos das plantas, pois o  $Na^+$  é inibidor de várias enzimas citoplasmáticas, enquanto que o  $K^+$ , que é um íon móvel, é essencial à manutenção do balanço osmótico e no controle estomático, atuando como cofator enzimático e auxiliando na ascensão capilar do  $NO_3^-$  no xilema (MUNNS; TESTER, 2008; TURKAN, 2011; TAIZ; ZEIGER, 2013).

Internamente, os íons  $Na^+$  e  $Cl^-$  podem ser transportados para a parede celular, o que pode causar, por sua vez, a desidratação da célula (DIAS; BLANCO, 2010; AMORIM *et al.*, 2010; ISLÃ; ARAGUÉS, 2010). O acúmulo de íons sódio e cloreto em excesso nas células pode causar na planta danos por toxicidade, quando não excluídos ou compartimentados no vacúolo (WILLADINO *et al.*, 2011; ULRICH *et al.*, 2014). Além disso, o aumento na concentração desses íons no citoplasma interfere negativamente no funcionamento de algumas proteínas, compromete a integridade das membranas e limita a absorção, o transporte, a

assimilação e a distribuição de nutrientes necessários ao desenvolvimento vegetal (MUNNS; TESTER, 2008).

O  $\text{Na}^+$ , quando acumulado em excesso, pode provocar o surgimento de manchas necróticas e a queima da ponta das folhas (BOSCO *et al.*, 2009); em concentrações acima de 100 mM, é potencialmente tóxico, promovendo o desbalanço iônico e desequilibrando o estado nutricional da planta, por impedir a absorção de outros nutrientes essenciais como  $\text{K}^+$  e  $\text{Ca}^{2+}$  (ZHU, 2003). O  $\text{Na}^+$  compete pelos sítios de absorção dos transportadores de  $\text{K}^+$  presentes na membrana plasmática das células das raízes. Tal competição se deve às propriedades físicas semelhantes existentes entre o  $\text{Na}^+$  e o  $\text{K}^+$ , como a similaridade do raio iônico, o que proporciona dificuldade aos transportadores na discriminação desses íons (BLUMWALD; AHARON; APSE, 2000; DEINLEIN *et al.*, 2014; SHABALA; POTTOSIN, 2014). Com o influxo massivo de  $\text{Na}^+$  na célula, há uma despolarização significativa da membrana plasmática, o que torna termodinamicamente impossível a absorção passiva de  $\text{K}^+$  através de canais, fazendo com que esse macronutriente fique indisponível às plantas (CHINNUSAMY; JAGENDORF; ZHU, 2005; MANSOUR, 2014).

A absorção em excesso de  $\text{Cl}^-$  também provoca alterações no metabolismo como, por exemplo, inibição da fotossíntese, por seu acúmulo nos cloroplastos, e o surgimento de injúrias nas folhas (TAIZ; ZEIGER, 2013). O  $\text{Cl}^-$  é acumulado rapidamente nas folhas mais jovens nos estágios iniciais de crescimento (COSTA *et al.*, 2003). As concentrações de cloreto, em condições fisiológicas normais, se mantêm em torno de 10-20 mM (TYERMANN; SKERRETT, 1999) e sua compartimentação vacuolar é um processo que pode ser controlado através de transportadores dirigidos pelo fluxo eletroforético gerado pelas bombas de prótons através da membrana vacuolar (NIU *et al.*, 1995; SZE; LI; PALMGREM, 1999). O cloreto pode ser compartimentado no vacúolo através de seu cotransporte com o íon  $\text{H}^+$ , já que a principal força termodinâmica é o gradiente de pH. Um sistema antiporte  $\text{H}^+$ /ânion também foi proposto para o transporte, que operaria na compartimentação do  $\text{Cl}^-$  no vacúolo (REA; SANDERS, 1987).

A homeostase iônica deve envolver a exclusão de íons citotóxicos ( $\text{Na}^+$  e  $\text{Cl}^-$ ) do citosol para o meio externo e/ou sua compartimentação no vacúolo, a fim de manter uma alta relação  $\text{K}^+/\text{Na}^+$  e o balanço hídrico entre o meio externo, o citosol, as organelas nele mergulhadas e vacúolo (PRISCO; GOMES-FILHO, 2010). O controle do balanço iônico tem sido sugerido como um dos elementos-chave para tolerar o estresse salino e frequentemente é utilizado como critério para selecionar materiais sensíveis e tolerantes à salinidade (OLIVEIRA; GOMES-FILHO; ENÉAS-FILHO, 2010; PLETT; MØLLER, 2010; TEAKLE;

TYEMAN, 2010; ALMODARES *et al.*, 2014).

#### 2.2.2.4 Salinidade e o estresse oxidativo

Em condições de estresse salino, as alterações fisiológicas e bioquímicas induzidas pelos efeitos osmóticos e iônicos dos sais podem ser acompanhadas por um aumento na produção de espécies reativas de oxigênio (EROs) nas células vegetais (MITTLER *et al.*, 2004). Nessas condições, o fechamento estomático, promovido pelo ácido abscísico, leva a uma diminuição na concentração de CO<sub>2</sub> e aumento na de O<sub>2</sub>. Essas condições, associadas à baixa disponibilidade de NADP<sup>+</sup> para captar os elétrons provenientes do fotossistema I, favorece a formação das EROs nos cloroplastos, devido ao desvio dos elétrons para o oxigênio molecular (EL-BAKY *et al.*, 2003; ASHRAF; HARRIS, 2004). Nos cloroplastos, as EROs podem ser geradas pela transferência direta da energia de ativação da clorofila para produzir o oxigênio *singleto*, ou por uma redução monovalente do oxigênio molecular pelo fotossistema I, gerando o radical superóxido (reação de Mehler), a partir do qual são originadas as outras EROs nas células (DEMIRAL; TURKAN, 2005; EDREVA, 2005). As EROs produzidas durante o metabolismo normal ou sob condições de estresse são: o peróxido de hidrogênio (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>), o radical superóxido (<sup>•</sup>O<sub>2</sub><sup>-</sup>), o radical hidroxil (<sup>•</sup>OH) e o oxigênio *singleto* (<sup>1</sup>O<sub>2</sub>) (NABATI *et al.*, 2011; RISHI; SNEHA, 2013). Tais espécies também são produzidas nas mitocôndrias e nos peroxissomos sob condições de estresse (AZEVEDO NETO; GOMES-FILHO; PRISCO, 2008; VOSS *et al.*, 2013).

As EROs são altamente reativas e podem causar estresse oxidativo (YAO *et al.*, 2012). Os efeitos do estresse oxidativo nas células traduzem-se em diversos processos degenerativos, incluindo a fotoinibição, a fotooxidação nos cloroplastos, a inativação de enzimas, a degradação de pigmentos fotossintéticos e a peroxidação de lipídeos de membranas, além de danos no DNA (WILLADINO *et al.*, 2011; ASHRAF; HARRIS, 2013). Por outro lado, as EROs também podem agir como sinalizadoras na ativação de resposta ao estresse e como vias de defesa. Nesse contexto, as EROs são consideradas um indicador celular de estresse e um mensageiro secundário envolvido na transdução de sinal em resposta ao estresse (MITTLER, 2002).

Para minimizar os danos oxidativos causados pelas EROs, as plantas dispõem de um complexo sistema antioxidativo de defesa (não enzimático e enzimático) presente em diversos compartimentos subcelulares, como cloroplastos, mitocôndrias e peroxissomos (MITTLER, 2002; PANG; WANG, 2008; KIM; KWAK, 2010; DINAKAR; DJILIANOV;

BARTELS, 2012). Os sistemas não enzimáticos incluem antioxidantes de baixa massa molecular, hidrofílicos, como o ácido ascórbico (ASC) e a glutathiona (GSH), os tocoferóis (TOC) e os compostos fenólicos (KARUPPANAPANDIAN *et al.*, 2011; MILLER *et al.*, 2010). Os enzimáticos incluem as enzimas dismutase do superóxido (SOD), peroxidase do ascorbato (APX), redutase da glutathiona (GR); peroxidases (G-POD), catalase (CAT) e polifenoxidase (PPO) (MITTLER, 2002; KIM; KWAK, 2010; DINAKAR; DJILIANOV; BARTELS, 2012). O grau do estresse oxidativo em uma célula é determinado pela quantidade de superóxido,  $H_2O_2$  e radicais hidroxis. Portanto, o balanço das atividades da SOD, APX e CAT é crucial na supressão dos níveis tóxicos de EROs na célula (APEL; HIRT, 2004).

A dismutase do superóxido (SOD), enzima presente nos cloroplastos, mitocôndrias, citosol e peroxissomos, é considerada a primeira linha de barreira enzimática contra o estresse oxidativo, convertendo o superóxido ( $\cdot O_2^-$ ) a peróxido de hidrogênio ( $H_2O_2$ ) (BROU *et al.*, 2010; GILL; TUTEJA, 2010). O produto da dismutação do superóxido pela SOD, o  $H_2O_2$ , precisa ser removido a fim de evitar sua conversão em radicais mais reativos, como o  $\cdot OH$  (PERL-TREVES; PERL, 2002). A CAT, é uma das principais enzimas na eliminação do  $H_2O_2$  gerado durante a fotorrespiração e a  $\beta$ -oxidação dos ácidos graxos. Atua nos peroxissomos e glioxissomos e pode ser encontrada também nas mitocôndrias. Ela converte duas moléculas de  $H_2O_2$  a duas moléculas de  $H_2O$  e oxigênio molecular (HELDT; HELDT, 2005; DUBEY, 2011). As peroxidases (POX e APX) são distribuídas por toda a célula e catalisam a redução do  $H_2O_2$  a  $H_2O$  e  $O_2$  (BRAY; BAILEY-SERRES; WERETILNYK, 2000; KANG; SALTVEIT, 2001). A POX, que é encontrada no citosol, vacúolo e parede celular (MAIA, 2004; MITTLER *et al.*, 2004), é pouco específica quanto ao substrato doador de elétrons e decompõe o  $H_2O_2$  pela oxidação de co-substratos tais como os compostos fenólicos (ex.: guaiacol ou pirogallol) ou o ascorbato (FOYER; HALLIWELL, 1976; NAKANO; ASADA, 1980). Já a APX, encontrada em cloroplastos, mitocôndrias, citosol e peroxissomos, é uma peroxidase que catalisa a conversão de  $H_2O_2$  a  $H_2O$  e  $O_2$  e concomitantemente produz o monodesidroascorbato (MDA), utilizando o ascorbato como um doador específico de elétrons (GARA *et al.*, 2010; KARUPPANAPANDIAN *et al.*, 2011). Em seguida, duas moléculas de monodesidroascorbato podem sofrer dismutação não enzimática, formando uma molécula de ascorbato e outra de desidroascorbato. Este último é reduzido a ascorbato através da rota redutase do desidroascorbato (DHAR) e redutase da glutathiona (GR). Nessa rota, a glutathiona é oxidada pela ação da DHAR e, em seguida, é novamente reduzida pela ação da GR. Independentemente da rota utilizada (via MDHAR ou DHAR e GR), a regeneração do ascorbato tem como doador final de elétrons o NADPH (SHIGEOKA *et al.*, 2002).



Acredita-se que a eliminação das EROs a partir do aumento na atividade de enzimas antioxidantes melhora a tolerância aos sais (ALSCHER; DONAHUE; CRAMER, 2002), sendo esta relação demonstrada em várias espécies como ervilha (*Pisum sativum* L.) (HERNANDEZ *et al.*, 2000), milho (*Zea mays* L.) (AZEVEDO-NETO *et al.*, 2006), sorgo (*Sorghum bicolor* L. Moench) (COSTA *et al.*, 2005; HEIDARI, 2009), soja (*Glycine max* L. Merr) (CICEK; CAKYRLAR, 2008), trigo (*Triticum aestivum* L.) (SAIRAM; VEERABHADRA RAO; SRIVASTAVA, 2002) e arroz (*Oriza sativa* L.) (DEMIRAL; TURKAN, 2005).

## 2.3 Silício

### 2.3.1 Silício no solo

O silício (Si) é o segundo elemento em abundância na crosta terrestre, sendo o óxido de silício (SiO<sub>2</sub>) o mineral mais abundante nos solos, constituindo a base da estrutura da maioria dos argilominerais (MARSCHNER, 1995). Na solução do solo, o Si encontra-se como ácido monossilícico (H<sub>4</sub>SiO<sub>4</sub>), a maior parte na forma não dissociada, dado seu elevado pKa (9,6), o qual é facilmente absorvido pelas plantas (RAVEN, 1983; WERNER; ROTH, 1983; WILD, 1988). Por isso, apesar de ser um ácido, possui comportamento de base, sendo representado por alguns autores como Si(OH)<sub>4</sub> ao invés de H<sub>4</sub>SiO<sub>4</sub> (MENGEL; KIRKBY, 1987; SAVANT *et al.*, 1997).

O ácido silícico é a única forma disponível de silício para as plantas, porém diversos fatores podem influenciar seu teor no solo (REIS *et al.*, 2007). Os principais fatores que aumentam a sua disponibilidade são: adição de fertilizantes silicatados na água de irrigação, dissolução de ácido silícico polimérico, liberação de Si dos óxidos de ferro e alumínio, dissolução de minerais cristalinos e não cristalinos e decomposição de resíduos vegetais. Os principais drenos são: absorção pelas plantas, formação de polímeros de silício, lixiviação, formação de minerais cristalinos e a adsorção em óxidos e hidróxidos de Fe e Al (SAVANT *et al.*, 1999; LIMA FILHO; LIMA; TSAI, 1999).

O Si ocorre principalmente na forma de mineral inerte das areias, tais como o quartzo (SiO<sub>2</sub> puro), a caulinita, as micas, o feldspato e outros argilominerais silicatados (MARSCHNER, 1995; REIS *et al.*, 2007). Em solos tropicais, em razão do avançado grau de intemperismo, o Si é encontrado basicamente na forma de opala e quartzo (SiO<sub>2</sub>.nH<sub>2</sub>O), sendo essa última não disponível às plantas (BARBOSA FILHO *et al.*, 2001).

Camargo, Korndörfer e Corrêa (2002) avaliaram a disponibilidade de silício em relação às características físicas de 19 solos sob vegetação de cerrado. Os autores observaram que os valores de silício diminuíram à medida que o teor de areia dos solos aumentou, apresentando correlação significativa. Portanto, solos com altas porcentagens de areia apresentaram tendência a baixos teores de Si, pois o quartzo com alto teor de SiO<sub>2</sub>, presente em grande quantidade nesses solos, é praticamente inerte. Além disso, solos muito arenosos possuem drenagem excessiva, carreando o Si disponível para horizontes mais profundos. Esses autores observaram também que os teores de silício aumentaram com a quantidade crescente de argila dos solos, comportamento esse que pode ser explicado pela capacidade de adsorção de Si pelas argilas, evitando sua lixiviação.

Dessa forma, Korndörfer *et al.* (1999a) ressaltam que, em solos com baixos teores de “silício disponível”, a adubação com silicato de cálcio, além de fornecer silício, pode melhorar as características químicas do solo, tais como pH, saturação por bases, saturação por alumínio e cálcio trocável.

Para Snyder (1991), solos que apresentam teores de Si menores que 10 mg dm<sup>-3</sup> devem receber adubação silicatada, enquanto solos com teores iguais ou maiores que 15 mg dm<sup>-3</sup> não necessitam de adubação silicatada. Korndörfer *et al.* (1999b) conduziram 28 experimentos de campo no período de 1992 a 1996 com a cultura do arroz e classificaram os níveis de silício no solo como baixo, menor que 6 mg dm<sup>-3</sup>, médio, entre 6 a 24 mg dm<sup>-3</sup>, e alto, acima de 24 mg dm<sup>-3</sup>.

Não existe ainda definição para a quantidade máxima de silício a ser utilizada nos solos. Tudo indica que, quanto mais silício a planta absorver, maiores serão seus efeitos benéficos. Ainda não se constatou nenhum efeito tóxico do silício para as plantas, não havendo limites para a aplicação desse insumo. O limite acontece, se considerarmos o efeito corretivo dos silicatos, isto é, quando a dose de silicatos provocar aumentos de pH e de saturação por bases acima dos valores desejados. Nesse caso, podem acontecer desequilíbrios nutricionais, principalmente de micronutrientes (cobre, ferro, zinco e manganês) e de fósforo, devido aos processos de insolubilização deles (KORNDÖRFER; PEREIRA; CAMARGO, 2003).

### **2.3.2 Silício na planta**

As plantas absorvem o silício da solução do solo na forma de ácido monossilícico (MITAMI; MA, 2005). O processo de absorção do ácido monossilícico, que possui carga neutra, ocorre pela dissolução através da membrana, podendo ocorrer através do apoplasto ou

do simplasto. O mecanismo de absorção radicular de silício pelas plantas foi considerado por muito tempo como sendo exclusivamente passivo, feito por difusão ou fluxo de massa (JONES; HANDRECK, 1967). Contudo, estudos mais recentes mostraram mecanismos de absorção ativa de silício, o qual é feito por proteínas de membrana específicas, codificadas por genes específicos para esse fim em arroz, como também observado em milho e cevada (MA *et al.*, 2007; MITAMI; YAMAJI; MA, 2009; CHIBA *et al.*, 2009). O transporte do silício é feito pelo xilema e sua distribuição depende das taxas de transpiração dos diferentes órgãos da planta (YOSHIDA; OHNISHI; KITAGISHI, 1962). Após ser absorvido e transportado até a parte aérea, o ácido monossilícico deposita-se na forma de sílica amorfa hidratada, inicialmente nos tecidos mais jovens e, posteriormente, vai acumulando-se rapidamente nas células senescentes, sob a forma de sílica polimerizada ( $\text{SiO}_2$ ), também chamada de opala biogênica ou fitólitos (DAYANANDAM; KAUFFMAN; FRANKIN, 1983; MA; YAMAJI, 2008).

Em geral, o conteúdo médio de silício das raízes é menor, se comparado com os de caule e folhas, porém, em alguns casos, como em soja, o teor de silício na raiz é maior do que nas folhas (OLIVEIRA; CASTRO, 2002). Segundo Yoshida (1975), a maior parte de silício é depositada nas folhas (71% do total), seguidas pelo caule (13%), pelas raízes (10%) e pelo colmo (6%).

De acordo com Chagas (2004), a deposição de silício absorvido é influenciada por vários fatores: idade da planta, tipo e localização dos tecidos envolvidos e absorção através das raízes, além da transpiração. A variação ampla dos teores de silício no tecido vegetal é resultado tanto da fisiologia das diferentes espécies, quanto do ambiente onde as plantas se desenvolvem. Nos cereais, o conteúdo de silício nos órgãos é maior com o aumento da idade da planta (SANGSTER; HORSON; PARRY, 2001). A deposição de silício na forma de sílica polimerizada ocorre com 99% do silício total absorvido e menos de 1% fica na forma coloidal ou iônica (MA; MIYAKE; TAKAHASHI, 2001) e ocorre com maior frequência nas regiões onde a água é perdida em grande quantidade (EPSTEIN, 1999; MA; MIYAKE; TAKAHASHI, 2001). Porém o transporte e acúmulo de silício podem ser regulados também por processo ativo, que é desencadeado pelo estímulo à proteção contra doenças, pragas e outras condições de estresse (MARSCHNER, 1995; CURRIE; PERRY, 2007).

Em geral, as plantas apresentam teores de silício de 1 a 100 g kg<sup>-1</sup> de matéria seca (MS) (EPSTEIN, 1999). A forma como o silício é absorvido e depositado difere entre as espécies, as quais podem ser classificadas em três grupos: as acumuladoras de silício, em geral as monocotiledôneas (gramíneas), que têm processo ativo de absorção de silício, possuindo teor foliar acima de 10,0 g kg<sup>-1</sup> de MS; as intermediárias na acumulação de silício, que têm absorção

de Si via simplasto, na mesma velocidade que a absorção de água, e possuem teor desse elemento menor que  $10 \text{ g kg}^{-1}$  de MS; e as não acumuladoras, em geral leguminosas, que absorvem silício a favor do fluxo de transpiração, porém de forma mais lenta que a absorção de água e discriminam o silício na absorção via simplasto, são as que excluem o silício, ou seja, à medida que as raízes absorvem o silício, elas também o eliminam para a solução do solo. Essas últimas possuem teor foliar menor que  $5,0 \text{ g kg}^{-1}$  de MS (TAKAHASHI; MA; MIYAKE, 1990).

O silício não é considerado essencial, do ponto de vista fisiológico e metabólico, para o crescimento e desenvolvimento das plantas (EPSTEIN, 1999), entretanto o aumento da sua disponibilidade tem resultado em incrementos no crescimento e na produtividade, uma vez que esse elemento pode atuar de forma indireta sobre alguns aspectos fisiológicos e bioquímicos, e especialmente quando as plantas estão submetidas a algum tipo de estresse, seja ele de natureza biótica ou abiótica (MA; YAMAJI, 2006; ABDALLA, 2011). Nessas condições, o Si pode atuar, por exemplo, no aumento de resistência a insetos herbívoros e a outros artrópodes (KVEDARAS *et al.*, 2007; KVEDARAS; KEEPING, 2007); na redução dos efeitos negativos das doenças (EPSTEIN, 2009; GUNTZER; KELLER; MEUNIER, 2012; THILAGAM *et al.*, 2014); na maior tolerância ao estresse hídrico (NEVES, 2014); na redução da severidade da necrose das brácteas de poinsettia, que é uma desordem fisiológica causada pela deficiência de cálcio (McAVOY; BIBLE, 1996); e na melhoria da qualidade das flores em girassol (SAVVAS *et al.*, 2002; KAMENIDOU; CAVINS; MAREK, 2008).

O silício também tem importante papel na redução do estresse salino. O emprego desse elemento na redução da toxidez causada pelo excesso de NaCl foi proposto por Ahmad, Zaheer e Ismail (1992), que conseguiram resultados positivos na produção de matéria seca em trigo (*Triticum vulgare*) tratado com esse elemento e submetido à salinidade. Recentemente, Ashraf *et al.* (2010), Lee *et al.* (2010), Shi *et al.* (2013) e Zhu e Gong (2014) verificaram que a aplicação do Si estimulou o crescimento de plantas de cana de açúcar (*Saccharum officinarum* L.), soja (*Glycine max* L.), arroz (*Oryza sativa* L.) e milho (*Zea mays* L.) cultivadas em meio salino, respectivamente.

### **2.3.3 Silício e o estresse salino**

A aplicação de Si em plantas, como amenizador dos efeitos deletérios de estresses bióticos e abióticos, como o estresse salino, tem apresentado resultados promissores (EPSTEIN, 1999; MA, 2004). De acordo com alguns autores, o silício promove tolerância das plantas ao estresse salino, provavelmente por garantir a integridade e estabilidade da membrana celular

(ZUCCARINI, 2008; KAFI; RAHIMI, 2011; MATEOS; ANDRADES; DAVY, 2013). No entanto, ainda não foram descobertos, nem completamente elucidados, todos os mecanismos pelos quais o silício contribui para a tolerância ao estresse salino. Prova disso, é que vários autores têm proposto hipóteses tentando explicar o efeito do silício sobre o estresse salino, porém nenhuma tem uma evidência clara. Dentro dessas proposições, três hipóteses têm ganhado mais aceitabilidade na comunidade científica. A primeira, é que o silício diminui a concentração de sais na planta devido à diminuição da transpiração pelo acúmulo desse elemento nas folhas; a segunda é que o silício diminui o transporte de sódio nas raízes; e a terceira, é que esse elemento tem funções fisiológicas que aumentam o metabolismo antioxidante (SHI *et al.*, 2013).

Em algumas espécies agrícolas, dentre elas o girassol (*Helianthus annuus* L.), o arroz (*Oryza sativa* L.) e a alface (*Lactuca sativa* L.), a nutrição com silício aumentou a atividade das enzimas antioxidantes (MILNE *et al.*, 2012; ALI *et al.*, 2013; KIM *et al.*, 2014). Contudo, as alterações nas vias bioquímicas induzidas pelo silício em plantas sob essa condição adversa, também envolvem aumentos na concentração de osmólitos compatíveis, como observado por Kafi e Rahami (2011), em beldroega (*Potularca oleracea* L.). A nutrição com silício também aumenta a taxa fotossintética de tomateiros (*Solanum lycopersicum* L.) (ROMERO-ARANDA; JURADO; CUARTERO, 2006), bem como reduz de forma significativa a absorção e a translocação de  $\text{Na}^+$ , com aumento na concentração de  $\text{K}^+$  nas raízes de cana-de-açúcar (ASHRAF *et al.*, 2010).

Outros resultados evidenciam a ação do Si em reduzir os efeitos do estresse salino nos processos de crescimento e desenvolvimento das plantas, como confirmado pelo melhor resultado no crescimento e redução dos danos de membrana em plantas de milho (LIMA *et al.*, 2011; ZHU; GONG, 2014); pelos maiores incrementos na produção de biomassa de folhas e raízes de plantas de tomate (HAGHIGHI; PESSARAKLI, 2013) e pelo aumento dos padrões de crescimento da cultivar CSF 20 de sorgo (LIMA; COSTA; ENÉAS-FILHO, 2009).

## **2.4 Fósforo**

### **2.4.1 Fósforo no solo**

Na litosfera, o fósforo (P) se encontra, principalmente na forma de pentóxido de fósforo ( $\text{P}_2\text{O}_5$ ), com teor médio de  $2,8 \text{ g kg}^{-1}$  de solo, embora existam solos com teores mais baixos ( $0,2$  a  $0,8 \text{ g kg}^{-1}$ ) (FASSBENDER, 1994). Na prática agrícola, as plantas dispõem de

duas fontes de fósforo: presente no solo e como no fertilizante. O P total dos solos é composto de diferentes formas orgânicas e inorgânicas, que apresentam diferentes graus de labilidade. Segundo Barber (1995), o P no solo pode ser dividido em três categorias: a) fósforo na forma iônica e em compostos na solução do solo; b) na forma de minerais cristalinos e amorfos; c) e como componente da matéria orgânica. Segundo Malavolta (2006), as concentrações de P na solução do solo na forma disponível são usualmente baixas, sendo que, mais de 90% das análises de solo no Brasil mostram teores desse elemento menores que  $10 \text{ mg dm}^{-3}$  e, especificadamente, em solos de cerrado estes teores são de  $1 \text{ mg dm}^{-3}$  ou menores. Para Sanchez e Salinas (1983), o baixo teor de P disponível no solo é o que mais limita nutricionalmente a produção em solos tropicais, sendo que a maioria das culturas apresenta resposta à aplicação desse nutriente.

A deficiência de P nos solos tropicais é intensa, devido ao baixo pH e à presença de grandes proporções de argila sesquixídica, o que aumenta muito a adsorção de fosfatos e a formação de precipitados com ferro e alumínio, reduzindo a disponibilidade de P às plantas (SANCHEZ; SALINAS, 1981; CARDOSO, KUYPER, 2006). Portanto, doses elevadas de fertilizantes fosfatados são necessárias para que o teor de P disponível se mantenha em níveis adequados ao desenvolvimento das plantas cultivadas (BARROW, 1978; GOEDERT; LOBATO, 1984).

Sabe-se que as características de solubilidade das fontes de P são de grande importância em relação à sua eficiência. Os fosfatos de maior solubilidade, são os mais prontamente disponíveis, e favorecem a absorção e o aproveitamento do nutriente, principalmente pelas culturas de ciclo curto (rápido crescimento). As fontes mais solúveis de P são: superfosfato triplo, fosfato monoamônico, fosfato diamônico e os termofosfatos (NOVAIS *et al.*, 2007).

#### ***2.4.2 Fósforo na planta***

As plantas absorvem a maior parte do P na solução do solo, principalmente na forma de íons ortofosfatos ( $\text{H}_2\text{PO}_4^-$ , e  $\text{HPO}_4^{2-}$ ) (DECHEN; NACHTIGALL, 2007), que se originam da solubilização de minerais fosfatados e da mineralização da matéria orgânica (GATIBONI, 2003; SCHUMACHER; CESSONI; SANTANA, 2003), sendo que o contato íon – raiz, quase que, exclusivamente, ocorre por difusão (HOROWITZ; FREITAS, 2005). Contrariamente ao que ocorre no solo, o fósforo apresenta alta mobilidade no interior da planta, sendo facilmente

distribuído entre os órgãos, ou seja, das folhas velhas para as novas e para os frutos e sementes (SILVA, 2006).

O P é imprescindível ao crescimento e à reprodução das plantas, as quais não alcançam seu máximo potencial produtivo sem um adequado suprimento nutricional (MARSCHNER, 1995). Desse modo, limitações na disponibilidade de P no início do ciclo vegetativo podem resultar em restrições ao desenvolvimento, e a planta não se recupera posteriormente, mesmo aumentando seu suprimento a níveis adequados (GRANT *et al.*, 2001). As plantas requerem um suprimento constante de fosfato durante toda a sua vida, porém ele é absorvido principalmente durante o estágio de desenvolvimento vegetativo, sendo posteriormente, retranslocado das folhas para frutos e sementes, durante os estádios reprodutivos (MARSCHNER, 1995).

De acordo com Naiff (2007), o P tem importante função nas plantas, sendo constituinte de compostos armazenadores de alta energia, como o ATP (adenosina trifosfato). É através da utilização dessa forma de energia química que a semente germina, que a planta efetua a fotossíntese (ciclo de Calvin), que se absorve de forma ativa os nutrientes do solo e se sintetiza vários compostos orgânicos.

Os teores de P nas plantas variam de 0,5 a 3,0 g kg<sup>-1</sup> de MS, porém teores entre 1,0 a 1,5 g kg<sup>-1</sup> de MS são considerados como adequados para um crescimento normal das plantas. Plantas deficientes em P apresentam teores foliares menores do que 1,0 g kg<sup>-1</sup>, enquanto que em teores acima de 3,0 g kg<sup>-1</sup> de MS pode-se observar sintomas de toxidez (MALAVOLTA, 1980; MALAVOLTA; VITTI; OLIVEIRA, 1989; FURLANI, 2004).

De acordo com a literatura, plantas sob deficiência de P aumentam o dreno de fotoassimilados para a raiz, a fim de aumentar a capacidade da planta para absorção desse nutriente (FREEDEN; RAO; TERRY, 1989). Portanto, as plantas deficientes em fósforo têm seu crescimento retardado, por esse nutriente estar ligado também à função estrutural e ao processo de transferência de energia (MALAVOLTA; VITTI; OLIVEIRA, 1989), afetando, dessa forma, vários processos metabólicos, como a síntese de proteínas e de ácido nucleico (MENGEL; KIRKBY, 1987). Larcher (2000), complementa que a deficiência de fosfato resulta em uma acumulação de assimilados (sacarose e amido) no cloroplasto, reduzindo a fotossíntese até mesmo sob condições favoráveis.

Segundo Formiga *et al.* (2012), na cultura do sorgo, o fósforo promove a formação e o desenvolvimento inicial da raiz, bem como promove o crescimento da planta em altura, diâmetro do caule, e é vital para a formação de sementes. Além disso, a adubação fosfatada

proporciona aumento na absorção de N, Ca, S e Mn (LEÃO; FREIRE; MIRANDA, 2011), sendo assim de extrema importância no desenvolvimento das plantas de sorgo.

#### ***2.4.3 Efeito do fósforo com condições de estresse salino***

Diversos estudos mostram que plantas cultivadas em meio salino acumulam fósforo em suas folhas. Como exemplo, podem ser citados os trabalhos com milho (MAAS; GRIEVE, 1987), arroz (ANDRADE, 1989), tomate (AWAD; EDWARDS; CAMPBELL, 1990) e feijão-de-corda (LACERDA, 1995; SILVA *et al.*, 2003b) submetidos a estresse salino. Portanto, tais resultados evidenciam a necessidade de cautela quanto ao uso de adubação fosfatada em meio salino. É possível que o nível ótimo do nutriente para a produção vegetal, na ausência de sais, possa ser tóxico para algumas plantas quando cultivadas em meio salino (NIEMAN; CLARK, 1976; GRATTAN; MAAS, 1984).

Alguns estudos têm sido desenvolvidos para avaliar a influência da adubação fosfatada em plantas cultivadas em condições salinas. Cerda, Bingham e Hoffmann (1977) avaliaram o desenvolvimento e a produção de gergelim, cultivado em solução nutritiva com diferentes níveis de salinidade e de fósforo e verificaram que a tolerância da cultura à salinidade foi reduzida com o aumento do fósforo. No entanto, Lacerda *et al.* (2006a) avaliaram o desenvolvimento de plantas de sorgo forrageiro submetidas a concentrações variadas de fósforo em diferentes níveis de salinidade da solução nutritiva e, constataram a existência de interação entre a salinidade e o fósforo sobre o desenvolvimento e nutrição das plantas. Esses autores observaram ainda que os teores de P no tecido foliar aumentaram em resposta ao aumento de P na solução, independentemente do nível de salinidade.

De acordo com Shibli *et al.* (2001), o aumento de doses de P pode minimizar os efeitos adversos da salinidade sobre o desenvolvimento das plantas. Assim, uma adequada nutrição fosfatada é de fundamental importância, em plantas cultivadas em condições de estresse salino. No entanto, segundo Grattan e Grieve (1999), a interação entre salinidade e nutrição fosfatada em plantas é bastante complexa e dependente da espécie vegetal ou cultivar, do estágio de desenvolvimento, da composição e disponibilidade de P no substrato.



### 3 MATERIAL E MÉTODOS

#### 3.1 Material vegetal, delineamento experimental e condições de semeadura

No presente estudo foram utilizadas sementes de dois genótipos de sorgo forrageiro [*Sorghum bicolor* (L.) Moench], um tolerante (CSF 20) e outro sensível (CSF 18) à salinidade (Lacerda *et al.*, 2001), cedidas pelo banco de germoplasma da Empresa Pernambucana de Pesquisa Agropecuária (IPA). O experimento foi conduzido no Laboratório de Análise de Sementes e as análises foram realizadas no Laboratório de Fisiologia Vegetal, pertencentes, respectivamente, aos Departamentos de Fitotecnia e de Bioquímica e Biologia Molecular, da Universidade Federal do Ceará.

O delineamento experimental foi o inteiramente casualizado, com quatro repetições, em esquema fatorial 2 x 2 x 2, tendo como tratamentos a combinação de duas concentrações de NaCl (0 e 100 mM), duas concentrações de Si (0 e 0,5 mM) e duas concentrações de P (0 e 0,025 mM). O silício e o fósforo foram fornecidos na solução de cultivo na forma de metassilicato de sódio [ $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  (25%  $\text{SiO}_2$ )] e fosfato de potássio monobásico ( $\text{KH}_2\text{PO}_4$ ), respectivamente.

As sementes foram tratadas com hipoclorito de sódio, a 2% em cloro ativo, por 5 min e, em seguida, lavadas com água desionizada, para retirar os resíduos de hipoclorito. A semeadura foi feita em papel Germitest (28 x 38 cm), autoclavado à temperatura de 121 °C, durante 20 min e a 1,5 atm. Para cada tratamento e data de avaliação, foram utilizadas 200 sementes, distribuídas em quatro repetições de 50. As sementes foram colocadas entre duas folhas de papel umedecidas com soluções dos respectivos tratamentos, e em volume igual a 2,5 vezes a massa do papel seco, sendo o pH das soluções previamente ajustado para o valor 5,5. Elas foram dispostas a aproximadamente 1,5 cm da borda superior do papel e a 3,0 cm das bordas laterais.

Após a semeadura, as duas folhas de papel contendo 50 sementes foram dispostas na forma de um rolo. Em seguida, quatro conjuntos de rolos, de um mesmo tratamento, foram acondicionados verticalmente em recipientes plásticos, sendo o conjunto envolto em saco plástico transparente e preso com elástico, visando manter constante a umidade interna. Durante a germinação, as condições experimentais foram temperatura média de  $25 \pm 1$  °C e fotoperíodo de 12 h em câmara de germinação (BOD) (BRASIL, 2009).

Aos quatro e dez dias após a semeadura (DAS), coletaram-se as plântulas já estabelecidas, que foram separadas em parte aérea e raízes, para análises subsequentes.

### 3.2 Variáveis de crescimento

No momento da coleta, selecionaram-se dez plântulas mais uniformes de cada repetição, sendo determinado os comprimentos da parte aérea (CPA) e das raízes (CR), o que foi feito com o auxílio de uma régua graduada em centímetros. Os valores foram somados e divididos pelo número de amostras (10 plântulas), resultando no comprimento médio da parte aérea e das raízes por plântula, cujos valores foram expressos em centímetros. Após essas medições, o material vegetal foi congelado a  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ , liofilizado e pesado em balança de precisão com quatro casas decimais para determinação das massas secas da parte aérea (MSPA) e das raízes (MSR). Os valores dessas variáveis foram expressos em mg, sendo utilizados para o cálculo da relação entre a massa seca da parte aérea e aquela das raízes (MSPA/MSR)

O material vegetal, após liofilização e pesagem, foi macerado e o pó liofilizado armazenado a  $4\text{ }^{\circ}\text{C}$  até posterior utilização nas análises químicas e bioquímicas.

### 3.3 Teores de $\text{Na}^+$ e $\text{K}^+$

Os teores de  $\text{Na}^+$  e  $\text{K}^+$  foram determinados nas raízes e parte aérea, exceto no caso do genótipo CSF 20 aos 10 DAS, cujas determinações foram realizadas apenas na parte aérea, em função da pequena quantidade de material de raízes. Os extratos para a determinação dos íons foram preparados a partir da homogeneização de 100 mg do pó liofilizado da parte aérea ou das raízes com 10 mL de água desionizada, durante 1 h à  $45\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Em seguida, o homogenato foi centrifugado a  $3.000 \times g$  a  $25\text{ }^{\circ}\text{C}$  por 10 min, sendo o sobrenadante coletado e filtrado em papel de filtro (extrato) e armazenado a  $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Os teores de sódio e potássio foram determinados por fotometria de chama, segundo Malavolta, Vitti e Oliveira (1989). As determinações dos íons sódio e potássio foram realizadas em uma única leitura do extrato, e os teores foram expressos em  $\mu\text{mol g}^{-1}$  de MS.

### 3.4 Solutos orgânicos

#### 3.4.1 Carboidratos solúveis

Em tubos de ensaio contendo 25 mg do pó liofilizado da parte aérea ou das raízes, foram adicionados 2,5 mL de etanol a 80%, sendo os tubos, em seguida, mantidos a  $75\text{ }^{\circ}\text{C}$  em banho-maria, durante 1 h, com agitações a cada 15 min. Decorrido esse tempo, o material foi

centrifugado a 3.000 x g, por 15 min, à temperatura ambiente (25 °C), e o sobrenadante obtido foi coletado. A extração foi repetida mais duas vezes, partindo-se do precipitado remanescente, sob as mesmas condições já descritas, com exceção do tempo de extração, que foi reduzido para 30 min. Todos os sobrenadantes coletados foram reunidos e tiveram seu volume completado para 10 mL com etanol a 80%, em balão volumétrico, sendo em seguida armazenados a -25 °C até posterior utilização.

Os carboidratos solúveis foram determinados de acordo com Dubois *et al.* (1956). Em uma alíquota de 0,2 mL do extrato, convenientemente diluído com etanol a 80%, foram adicionados 0,2 mL de fenol a 5% e 1,0 mL de ácido sulfúrico concentrado. A mistura foi agitada vigorosamente e deixada em repouso para seu resfriamento. Em seguida, as amostras foram submetidas à quantificação dos carboidratos solúveis, por meio de leituras de absorvância em 490 nm, utilizando-se como branco uma mistura contendo 0,2 mL de etanol a 80% (em substituição ao extrato), 0,2 mL de fenol a 5% e 1,0 mL de ácido sulfúrico concentrado. A curva padrão foi obtida utilizando-se concentrações crescentes de D(+) glicose anidra. Os resultados de carboidratos foram expressos em  $\mu\text{mol g}^{-1}$  MS e representam a média de quatro repetições, sendo cada repetição dosada em duplicata.

### 3.4.2 N-aminossolúveis

Os N-aminossolúveis foram determinados de acordo com o método de Yemm e Cocking (1955), utilizando-se o mesmo extrato preparado para carboidratos solúveis. Em tubos de ensaio, foram adicionados 0,5 mL do extrato, convenientemente diluído, 0,25 mL de tampão citrato a 0,2 M (pH 5,0), 0,5 mL de cianeto de potássio a 0,2 mM, em metilcelosolve ( $\text{C}_3\text{H}_8\text{O}_2$ ) a 100%, e 0,1 mL de ninhidrina a 5%, em metilcelosolve a 100%. Em seguida, os tubos foram fechados, agitados vigorosamente e mantidos a 95 °C, em banho-maria, durante 20 min. A reação foi interrompida abruptamente colocando-se os tubos em banho de gelo e, após resfriamento, foram adicionados 0,65 mL de etanol a 60%. Os teores de N-aminossolúveis foram estimados através de leituras de absorvância em 570 nm, tomando-se como branco todos os constituintes do meio de reação, exceto o extrato que foi substituído por igual volume de etanol a 80%. A curva padrão foi ajustada a partir de concentrações crescentes de glicina. Os resultados de N-aminossolúveis foram expressos em  $\mu\text{mol g}^{-1}$  MS e representam a média de quatro repetições, sendo cada repetição dosada em duplicata.

### 3.4.3 Prolina livre

A concentração de prolina livre foi determinada de acordo com Bates, Waldren e Teare (1973), sendo o extrato o mesmo descrito no item 3.2. Em uma alíquota de 0,5 mL do extrato, convenientemente diluído, foram adicionados 0,5 mL do reagente da ninhidrina ácida (1,25 g de ninhidrina, dissolvida em 30 mL de ácido acético glacial e 20 mL de ácido fosfórico a 6 M) e 0,5 mL de ácido acético glacial. Os tubos de ensaio foram hermeticamente fechados e, após homogeneização da mistura de reação, foram deixados em banho-maria fervente por 1 h. A reação foi interrompida colocando-se os tubos de ensaio em banho de gelo. Após o resfriamento, ao meio de reação, foi adicionado 1,0 mL de tolueno. Após agitação vigorosa da solução, a fase superior menos densa (cromóforo + tolueno) foi aspirada com o auxílio de uma pipeta Pasteur e submetida à leitura de absorvância em 520 nm, sendo utilizado como branco o tolueno. A concentração de prolina foi estimada com base em uma curva padrão ajustada a partir de concentrações crescentes de prolina. Os resultados de prolina foram expressos em  $\mu\text{mol g}^{-1}$  MS e representam a média de quatro repetições, sendo cada repetição dosada em duplicata.

### 3.5 Proteínas solúveis

A obtenção do extrato foi feita a partir da homogeneização, em almofariz, de 0,1 g do pó liofilizado da parte aérea ou das raízes com 5,0 mL de tampão fosfato de potássio (4 °C) a 0,1 mM (pH 7,0) contendo EDTA 0,1 mM, por 4 min. Após homogeneização, o material foi filtrado em tecido de náilon de malha fina, e transferido para tubos de ensaio, sendo mantidos a 4 °C por duas horas com agitações a cada 15 min. Posteriormente, o homogenato foi transferido para microtubos de 1,5 mL e centrifugado a 12.000 x g, por 15 min a 4 °C. O sobrenadante (extrato proteico) foi coletado e armazenado a -25 °C, para posterior utilização na determinação do teor de proteína. Esse extrato também foi utilizado para as determinações das atividades das enzimas antioxidantes.

Para a determinação dos teores de proteínas solúveis, foi usada uma alíquota de 100  $\mu\text{L}$  do extrato, convenientemente diluído com o tampão de extração, na qual foi adicionado 1 mL do reagente composto de *coomassie blue* G-250 a 0,01% (p/v), em etanol a 4,75% (v/v) e ácido fosfórico a 8,5% (p/v) (BRADFORD, 1976). As proteínas solúveis foram estimadas pela medida de absorvância a 595 nm, utilizando-se como branco a água desionizada. Os resultados foram calculados através de uma curva de calibração utilizando-se como padrão a albumina

sérica bovina (BSA) e foram expressos em  $\text{mg g}^{-1}$  MS e representam a média de quatro repetições, sendo cada repetição dosada em duplicata.

### **3.6 Enzimas de proteção contra danos oxidativos**

#### ***3.6.1 Atividade da dismutase do superóxido***

A atividade da dismutase do superóxido (SOD, E.C. 1.15.1.1) foi determinada pela medição de sua capacidade de inibir a redução fotoquímica do cloreto de azul de nitrotetrazólio (NBT), conforme descrito por Giannopolitis e Ries (1977). A mistura de reação (1,5 mL) continha tampão fosfato de potássio a 50 mM (pH 7,8), EDTA a 1  $\mu\text{M}$ , metionina a 13 mM, NBT a 75  $\mu\text{M}$ , riboflavina a 2  $\mu\text{M}$  e 50  $\mu\text{l}$  do extrato, convenientemente diluído com o tampão de extração. A riboflavina foi adicionada por último e os tubos foram agitados e deixados sob luz fluorescente (duas lâmpadas de 20 W). Após 15 min de reação, os tubos foram mantidos ao abrigo da luz. A absorbância da mistura de reação foi lida a 560 nm, devido a produção de azul de formazana, resultante da fotorredução do NBT. Uma unidade de atividade (UA) foi definida como sendo a quantidade de enzima capaz de inibir 50% da taxa de fotorredução do NBT, no tempo de 15 min. Os resultados da atividade da SOD foram expressos em  $\text{UA mg}^{-1}$  Prot e representam a média de quatro repetições, sendo cada repetição dosada em duplicata.

#### ***3.6.2 Atividade da catalase***

A catalase (CAT, E.C. 1.11.1.6) teve sua atividade medida de acordo com o método de Beers Jr. e Sizer (1952), com algumas modificações. A mistura de reação (1,5 mL) foi constituída de tampão fosfato de potássio a 100 mM (pH 7,0), EDTA a 0,1  $\mu\text{M}$ ,  $\text{H}_2\text{O}_2$  a 20 mM e 150  $\mu\text{L}$  do extrato. A reação foi iniciada pela adição do extrato ao meio de reação. A concentração de  $\text{H}_2\text{O}_2$  foi monitorada por leituras de absorbância a 240 nm, por 5 min, e quantificada por seu coeficiente de extinção molar ( $36 \text{ M}^{-1} \text{ cm}^{-1}$ ). Um controle com o meio de reação e tampão de extração, ao invés do extrato, foi usado para correção da decomposição não enzimática do substrato. Os resultados da atividade da CAT foram expressos em  $\mu\text{mol de H}_2\text{O}_2 \text{ min}^{-1} \text{ mg}^{-1}$  Prot e representam a média de quatro repetições, sendo cada repetição dosada em duplicata.

### **3.6.3 Atividade da peroxidase do ascorbato**

Para a determinação da atividade da peroxidase do ascorbato (APX, E.C. 1.11.1.1), utilizou-se a metodologia descrita por Nakano e Asada (1981). A mistura de reação (1,5 mL) foi composta de tampão fosfato de potássio a 50 mM (pH 6,0), EDTA a 0,1  $\mu$ M, ascorbato a 0,5 mM, H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> a 1 mM e 300  $\mu$ L do extrato, convenientemente diluído com o tampão de extração. A reação foi iniciada pela adição de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> e a oxidação do ascorbato foi medida pela leitura de absorbância a 290 nm por 1 min. A atividade enzimática foi quantificada usando o coeficiente de extinção molar do ascorbato (2,8 mM<sup>-1</sup> cm<sup>-1</sup>), e levando-se em consideração que dois moles de ascorbato são necessários para a redução de 1 mol de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> (MCKERSIE; LESHEM, 1994). Os resultados da atividade da APX foram expressos em  $\mu$ mol de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> min<sup>-1</sup> mg<sup>-1</sup> Prot. e representam a média de quatro repetições, sendo cada repetição dosada em duplicata.

### **3.6.4 Atividade da peroxidase do guaiacol**

A atividade da peroxidase do guaiacol (G-POD, E.C. 1.11.1.7) foi determinada conforme descrito por Urbanek, Kuzniak-Gebarowska e Herka (1991). A mistura de reação (2 mL) foi composta de tampão fosfato de potássio a 100 mM (pH 7,0), EDTA a 0,1  $\mu$ M, guaiacol a 5 mM, H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> a 15 mM e 50  $\mu$ L do extrato. A reação foi iniciada pela adição do extrato ao meio de reação e o aumento na absorbância a 470 nm foi monitorada por 1 min. A atividade enzimática foi quantificada pela determinação do tetraguaiacol formado, usando seu coeficiente de extinção molar (26,6 mM<sup>-1</sup> cm<sup>-1</sup>), e levando em consideração que 4 moles de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> são necessários para a redução de 1 mol de tetraguaiacol (PLEWA *et al.*, 1991). Os resultados da atividade da G-POD foram expressos em  $\mu$ mol de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> min<sup>-1</sup> mg<sup>-1</sup> Prot e representam a média de quatro repetições, sendo cada repetição dosada em duplicata.

## **3.7 Análise Estatística**

Os dados obtidos foram submetidos à análise de variância (ANOVA). O teste de Tukey foi aplicado para as variáveis com teste F significativo a 5%, realizando os desdobramentos das interações duplas e triplas das variáveis resposta quando significativa, conforme Banzatto e Kronka (2006). O software utilizado para a análise estatística foi o SISVAR (FERREIRA, 2011).

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 Crescimento

#### 4.1.1 Aos 4 DAS

Os resultados da análise de variância mostraram que, aos 4 DAS, quase todas as variáveis de crescimento das plântulas de ambos os genótipos de sorgo em estudo, apresentaram interação tripla, ou seja, foram influenciadas tanto pela salinidade como pelo silício (Si) e pelo fósforo (P) (Tabela 1). Entretanto, para as variáveis comprimento da raiz (CR) e da parte aérea (CPA), do genótipo CSF 18, verificou-se interações duplas significativas entre salinidade  $\times$  Si, salinidade  $\times$  P e Si  $\times$  P (Tabela 1).

Sob condições de estresse salino, em ausência de Si e P no meio de cultivo, plântulas de sorgo dos genótipos CSF 18 e CSF 20, aos 4 DAS, apresentam acréscimo significativo na biomassa seca da raiz (Figura 1A, D). Esse comportamento corrobora com o relato de Taiz e Zeiger (2013), que as plântulas tendem a direcionar suas reservas para o desenvolvimento radicular à medida que seus tecidos passam por estresse salino ou hídrico, sendo isso um mecanismo adaptativo às condições adversas do ambiente no qual estão inseridas.

A adição de Si ou P no meio de cultivo promoveu acréscimo significativo na MSR das plântulas de sorgo que cresceram sob condições controle (NaCl ausente) (Figura 1B, C, E e F). Os aumentos observados nessa variável foram de 63 e 69% no genótipo CSF 18, enquanto que, no genótipo CSF 20, foram de 80 e 92%, proporcionadas pelo Si e pelo P, respectivamente. Contudo, a presença de NaCl no meio contendo Si e/ou P, reverteu o efeito positivo desses nutrientes na produção de biomassa radicular (Figura 1A, D).

De modo contrário, sob condições de estresse salino, o Si no meio de cultivo não teve efeito sobre a MSR em ambos genótipos (Figura 1B, E). Já o P, diferentemente do observado com o Si, contribuiu para elevar essa variável em 15,6% além do aumento já proporcionado pelo NaCl no genótipo CSF 18, contudo, não teve efeito no genótipo CSF 20 (Figura 1C). Da mesma forma, a adição associada de Si e P em meio salino também promoveu maiores aumentos na MSR além do já proporcionado pelo NaCl, porém, apenas no genótipo CSF 20 (Figura 1E, F).

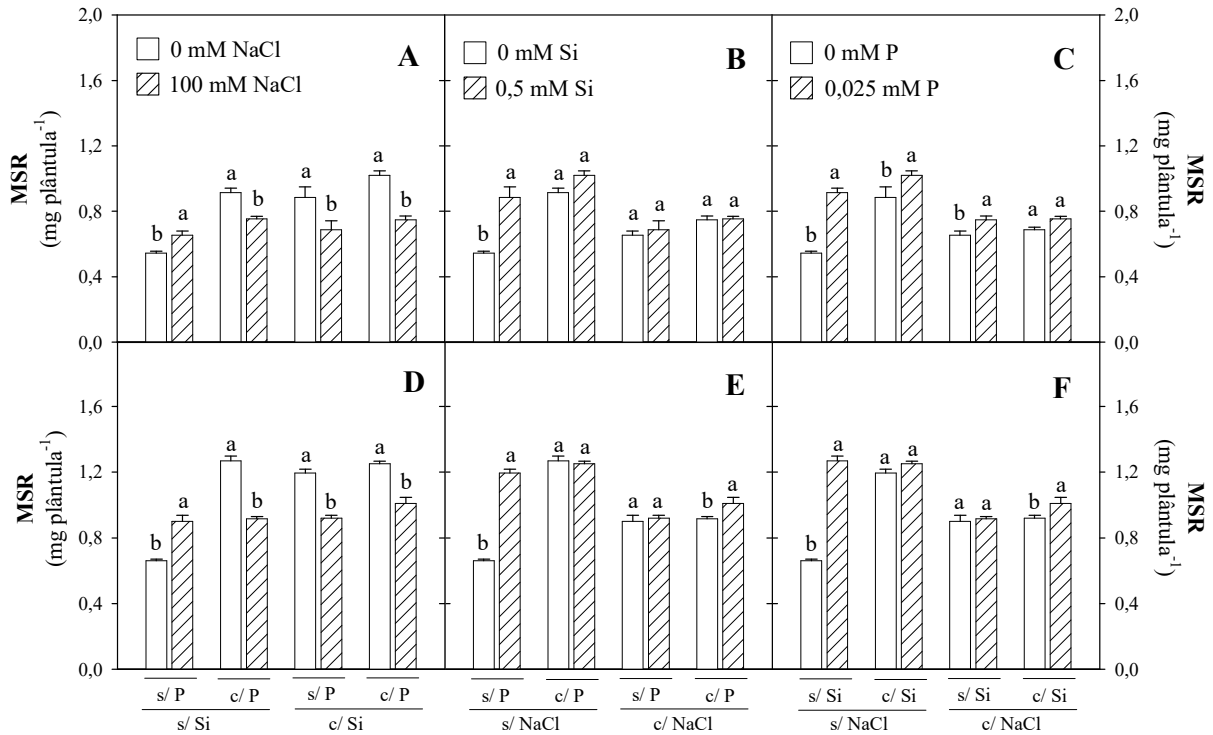
**Tabela 1** - Resumo da análise de variância dos valores médios de massa seca das raízes (MSR) e da parte aérea (MSPA), relação entre a massa seca da parte aérea e da raiz (MSPA/MSR) e comprimentos da raiz (CR) e da parte aérea (CPA) de plântulas de sorgo, genótipos CSF 18 e CSF 20, aos 4 dias após a semeadura, cultivadas sob condições de estresse salino (S) e em presença de silício (Si) e/ou fósforo (P).

Fonte de variação	G.L.	Quadrado Médio									
		CSF 18					CSF 20				
		MSR	MSPA	MSPA/MSR	CR	CPA	MSR	MSPA	MSPA/MSR	CR	CPA
S	1	0,14**	3,37**	1,81**	2,00**	24,12**	0,20**	6,60**	3,28**	0,80 <sup>ns</sup>	53,87**
Si	1	0,11**	0,15**	0,56**	8,16**	6,91**	0,20**	0,30**	0,51**	66,90**	6,72**
P	1	0,22**	0,25**	1,29**	10,86**	6,44**	0,30**	0,41**	0,68**	96,12**	2,64**
S x Si	1	0,09**	0,03 <sup>ns</sup>	0,84**	19,44**	3,61**	0,08**	0,31**	0,15**	47,63**	2,52**
S x P	1	0,06**	0,33**	0,07 <sup>ns</sup>	4,45**	4,88**	0,16**	0,41**	0,28**	114,08**	1,93**
Si x P	1	0,04**	0,39**	0,01 <sup>ns</sup>	4,92**	5,81**	0,12**	0,30**	0,22**	63,95**	11,04**
S x Si x P	1	0,02*	0,08**	0,15*	0,33 <sup>ns</sup>	0,01 <sup>ns</sup>	0,20**	0,07**	0,90**	30,00**	9,75**
Resíduo	24	4,0E-3	0,01	0,02	0,22	0,06	2,0E-3	0,01	0,01	0,82	0,19
CV (%)		7,95	4,59	5,75	16,09	9,57	4,95	3,70	4,60	13,67	12,48

(\*\*) = significativo ( $p < 0,01$ ); (\*) = significativo ( $p < 0,05$ ); (<sup>ns</sup>) = não significativo pelo teste F; CV = coeficiente de variação.



**Figura 1.** Análise dos desdobramentos de NaCl, dentro de cada nível de Si e P (A e D); de Si, dentro de cada nível de NaCl e P (B e E); e de P, dentro de cada nível de NaCl e Si (C e F), para a massa seca das raízes (MSR) de plântulas de sorgo, genótipos CSF 18 (A, B e C) e CSF 20 (D, E e F), aos 4 dias após a semeadura, cultivadas na ausência ou presença de NaCl, Si ou P. Colunas seguidas por letras iguais não diferem significativamente entre si, dentro de cada tratamento ( $p > 0,05$ ). As barras verticais representam o erro padrão da média.

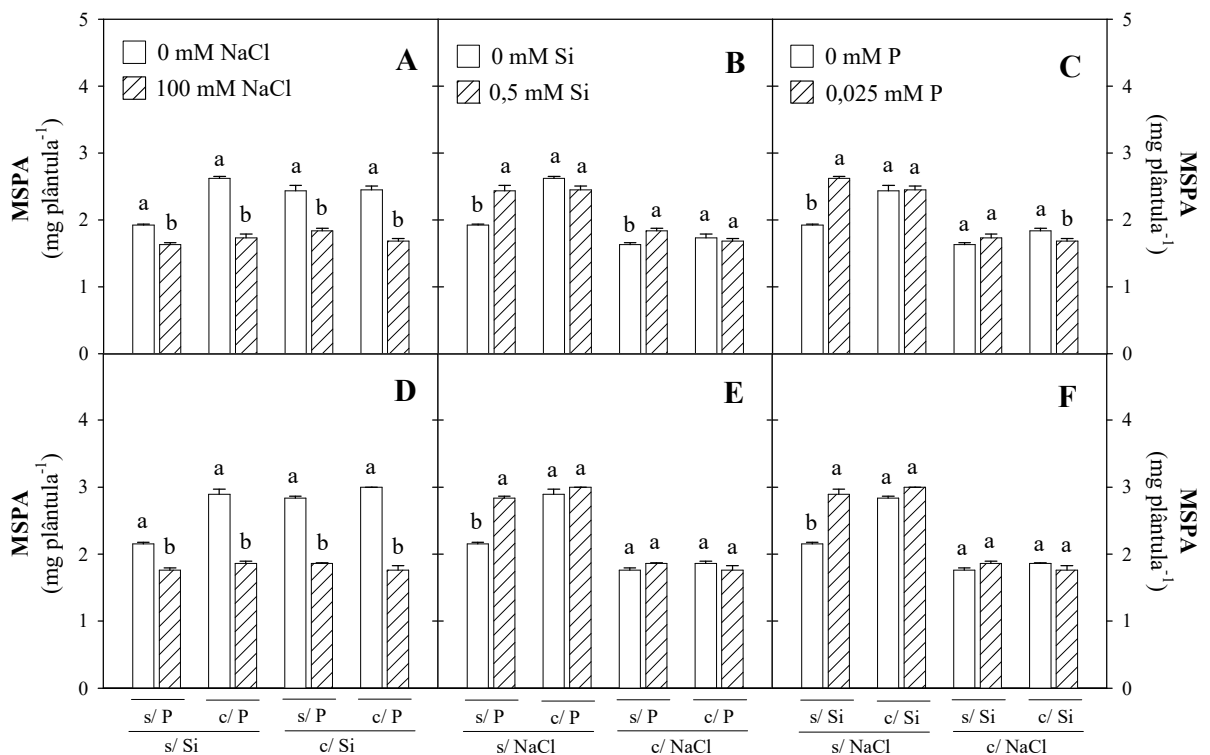


Contrariamente ao que foi observado com a MSR, a salinidade reduziu a MSPA de ambos os genótipos de sorgo, independentemente da presença de Si e/ou P no meio de cultivo (Figura 2A, D), indicando a maior sensibilidade da parte aérea ao estresse salino, como observado em outros estudos com os mesmos genótipos de sorgo (LACERDA *et al.*, 2003). As raízes de sorgo parecem suportar mais a salinidade que a parte aérea, fenômeno que, pode estar associado a um ajustamento osmótico mais rápido e a uma perda de turgescência mais lenta das raízes, quando comparadas com a parte aérea (LIMA *et al.*, 2007).

Os efeitos negativos da salinidade na produção de biomassa seca da parte aérea foram maiores no genótipo CSF 20 (Figura 2A, D). Considerando a média das inibições, a salinidade reduziu essa variável em 27 e 33,4% nos genótipos CSF 18 e CSF 20, respectivamente (Figura 2A, D). Esses resultados, porém, divergem dos encontrados por outros autores, os quais trabalhando com os mesmos genótipos de sorgo forrageiro na fase de crescimento vegetativo, verificaram que a redução na produção de massa seca da parte aérea, bem como das raízes, foi mais pronunciada no genótipo CSF 18, considerado previamente sensível ao estresse salino (SILVA *et al.*, 2003a; LACERDA *et al.*, 2006a; AQUINO;

LACERDA; GOMES-FILHO, 2007). Segundo Shannon (1997) e Munns (2002), isso ocorre porque a tolerância à salinidade varia entre as espécies, entre variedades/genótipos de uma mesma espécie e até mesmo entre estádios fenológicos de um mesmo genótipo, níveis e forma de aplicação de sais e o tempo de duração do estresse.

**Figura 2.** Análise dos desdobramentos de NaCl, dentro de cada nível de Si e P (A e D); de Si, dentro de cada nível de NaCl e P (B e E); e de P, dentro de cada nível de NaCl e Si (C e F), para a massa seca da parte aérea (MSPA) de plântulas de sorgo, genótipos CSF 18 (A, B e C) e CSF 20 (D, E e F), aos 4 dias após a semeadura, cultivadas na ausência ou presença de NaCl, Si ou P. Colunas seguidas por letras iguais não diferem significativamente entre si, dentro de cada tratamento ( $p > 0,05$ ). As barras verticais representam o erro padrão da média.



Da mesma forma que observado para a MSR, a adição de Si e/ou P no meio de cultivo promoveu acréscimos significativos na MSPA das plântulas de sorgo que cresceram em condições controle (Figura 2B, C, E, F). Já em condições de estresse salino, pode-se verificar que, no genótipo CSF 18, o Si minimizou o efeito do NaCl na redução da MSPA, em ausência de P (Figura 2B), e não teve efeito sobre essa variável no genótipo CSF 20 (Figura 2E). O emprego do Si na redução da toxidez causada pelo excesso de NaCl foi proposto por Ahmad, Zaherr e Ismael (1992), os quais obtiveram resultados positivos na produção de matéria seca de trigo (*Triticum vulgare*) tratado com esse nutriente e submetido à salinidade. Outros autores também demonstraram efeito semelhante em diversas espécies vegetais, tais como trigo (*Triticum spp.*) (MA, 2004), arroz (*Oryza sativa*) (MA, 2004; GONG; RANDALL; FLOWERS,

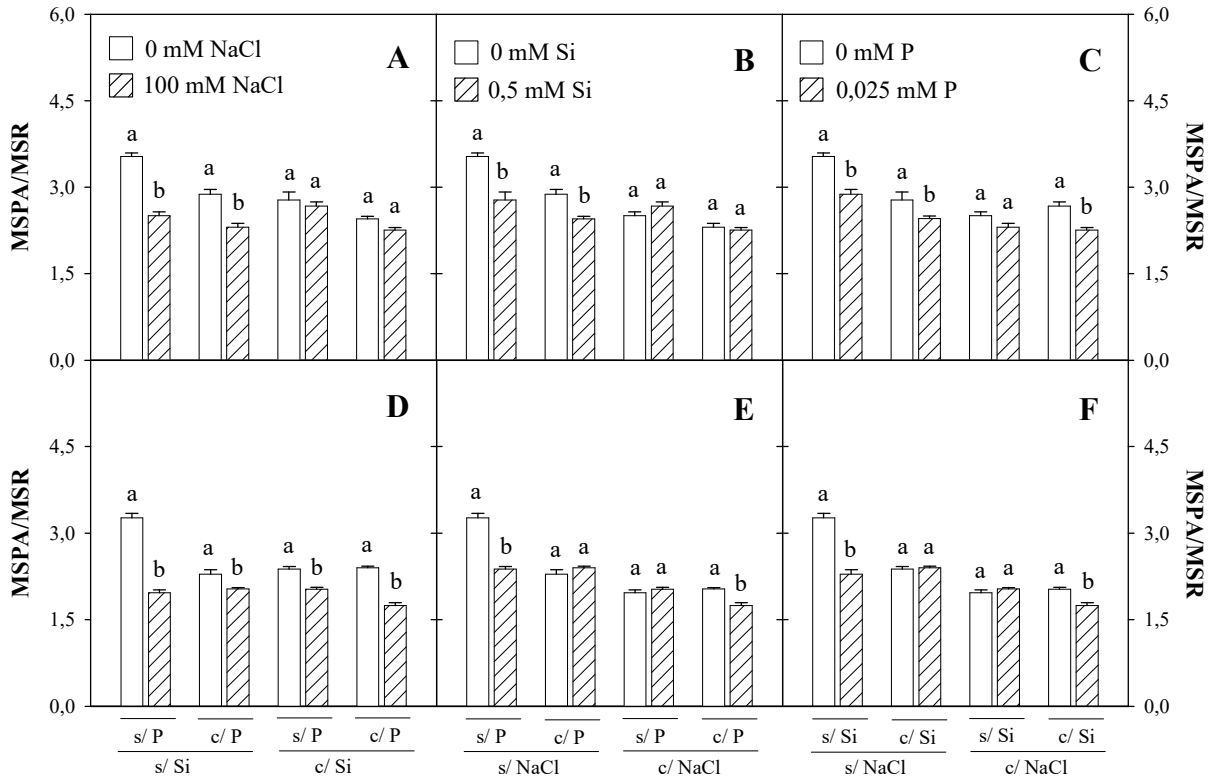
2006), cevada (*Hordeum vulgare* L.) (LIANG; SI; RÖMHELD, 2005; LIANG *et al.*, 2006) e milho (*Zea mays subsp. mays*) (KAYA; TUNA; HIGGS, 2006). No entanto, nesta pesquisa, quando se adicionou P na solução de cultivo contendo Si, houve inibição do efeito benéfico do Si na atenuação do dano causado pelo NaCl na MSPA das plântulas do genótipo CSF 18 (Figura 2C).

As variações observadas na massa seca das raízes e parte aérea das plântulas de sorgo influenciaram a relação MSPA/MSR (Figura 3). Assim, as plântulas controle de ambos os genótipos, quando estressadas com NaCl e em ausência de Si e P, apresentaram, aos 4 DAS, redução na relação MSPA/MSR (Figura 3A, D). Reduções na relação MSPA/MSR em função do estresse salino também foram observadas em plântulas que cresceram em meio contendo Si e/ou P no genótipo CSF 20 (Figura 3D), e apenas na presença de P no genótipo CSF 18 (Figura 3A). Tal fato ocorreu em virtude da maior redução do crescimento da parte aérea em relação ao das raízes em plântulas submetidas à salinidade, resultado semelhante ao observado por outros autores (PRAXEDES, 2008; FREITAS *et al.*, 2011; SOUSA *et al.*, 2011), que sugerem que isso ocorra para manter a absorção de nutrientes e água do meio de crescimento, de forma a minimizar os efeitos prejudiciais dos sais.

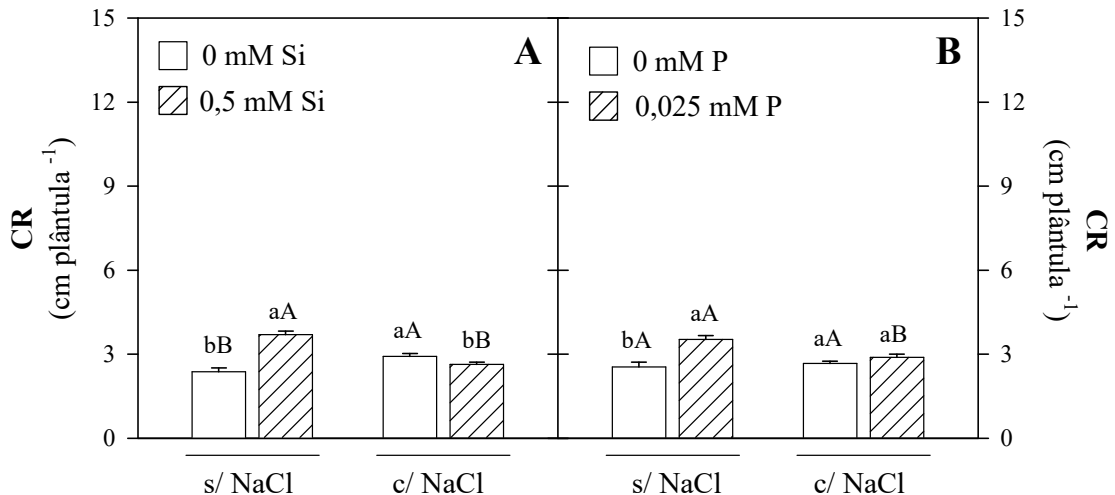
A relação MSPA/MSR foi reduzida nas plântulas controle de ambos os genótipos, em função da adição isolada de Si e P no meio de cultivo, contudo, em plântulas estressadas quando na adição conjunta desses dois nutrientes, também se observou redução dessa variável, porém em menor proporção (Figura 3B, C, E, F). Esse fato deve-se ao maior desenvolvimento da raiz em relação à parte aérea, proporcionado pela nutrição com Si e/ou P. De modo contrário, Lacerda *et al.* (2006a) observaram que o aumento na concentração de P na solução nutritiva provocou aumento na relação MSPA/MSR, sendo os maiores aumentos em plantas controle do que naquelas estressadas.

Plântulas de sorgo do genótipo CSF 18, aos 4 DAS, apresentaram aumento significativo de 23% no CR em função da salinidade, quando em ausência de Si (Figura 4A). Já o genótipo CSF 20, o aumento desta variável em função da adição de NaCl foi expressivamente maior em comparação ao genótipo CSF 18, sendo observado aumento de 213%, quando em ausência de Si e P (Figura 5A). De modo contrário, a salinidade inibiu o comprimento da raiz no genótipo CSF 18, na presença de Si ou P (Figura 4A, B), e no genótipo CSF 20, na presença de P, independentemente da presença de Si (Figura 5A).

**Figura 3.** Análise dos desdobramentos de NaCl, dentro de cada nível de Si e P (A e D); de Si, dentro de cada nível de NaCl e P (B e E); e de P, dentro de cada nível de NaCl e Si (C e F), para a relação entre a massa seca da parte aérea e das raízes (MSPA/MSR) de plântulas de sorgo, genótipos CSF 18 (A, B e C) e CSF 20 (D, E e F), aos 4 dias após a semeadura, cultivadas na ausência ou presença de NaCl, Si ou P. Colunas seguidas por letras iguais não diferem significativamente entre si, dentro de cada tratamento ( $p > 0,05$ ). As barras verticais representam o erro padrão da média.

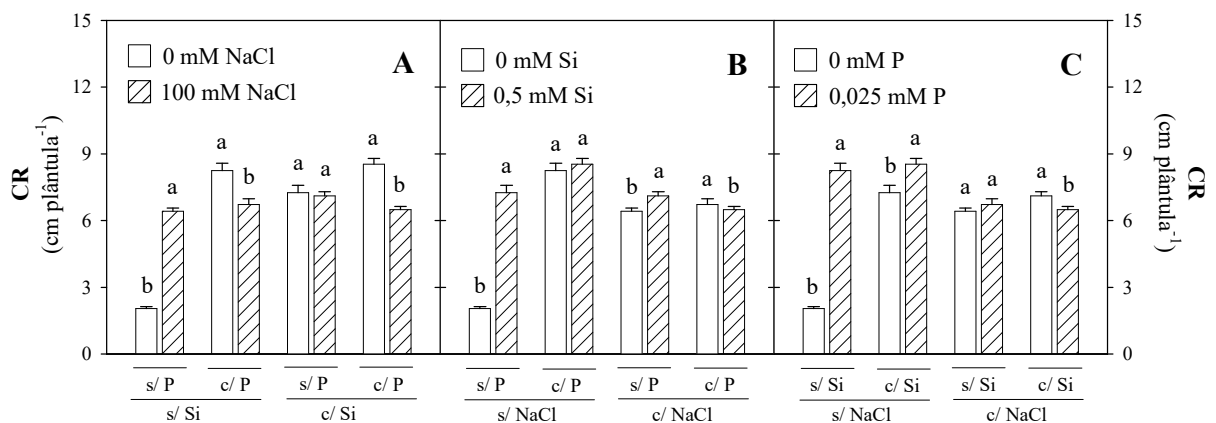


**Figura 4.** Comprimento da raiz (CR) de plântulas de sorgo, genótipo CSF 18, aos 4 dias após a semeadura, cultivadas na ausência ou presença de NaCl e em ausência ou presença de Si (A) ou P (B). Colunas seguidas por letras minúsculas iguais, em um mesmo nível de NaCl, ou por letras maiúsculas iguais, em um mesmo nível de Si ou P, não diferem significativamente entre si ( $p > 0,05$ ). As barras verticais representam o erro padrão da média.



Sob condições controle (em ausência de NaCl), o Si proporcionou aumento de 56% no CR do genótipo CSF 18, em comparação às plântulas que não receberam esse nutriente (Figura 4A). Contudo, sob condições de estresse salino, o CR no tratamento com Si foi cerca de 9,7% menor que aquele em ausência desse nutriente. O tratamento com P também promoveu aumentos no CR, porém isso só ocorreu nas plântulas sob condições controle (aumento de 39%) pois em condições salinas, o efeito benéfico do P no crescimento das raízes foi inibido pela presença de NaCl (Figura 4B).

**Figura 5.** Análise dos desdobramentos de NaCl, dentro de cada nível de Si e P (A); de Si, dentro de cada nível de NaCl e P (B); e de P, dentro de cada nível de NaCl e Si (C), para comprimento das raízes (CR) de plântulas de sorgo, genótipo CSF 20, aos 4 dias após a semeadura, cultivadas na ausência ou presença de NaCl, Si ou P. Colunas seguidas por letras iguais não diferem significativamente entre si, dentro de cada tratamento ( $p > 0,05$ ). As barras verticais representam o erro padrão da média.



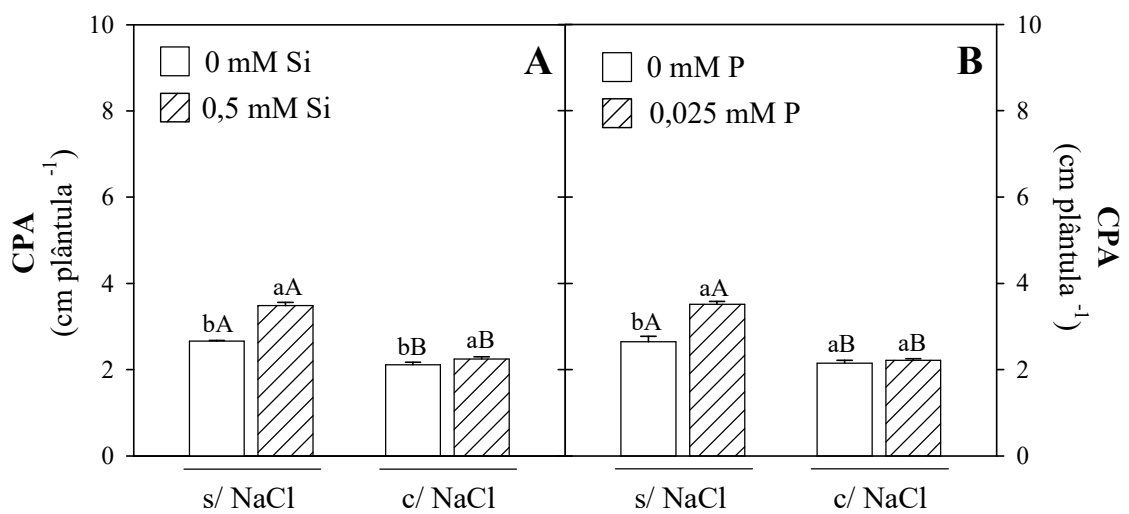
No genótipo CSF 20, como pode ser visto na figura 5, foram observados aumentos de 255 e 303% no CR das plântulas controle, proporcionados, respectivamente, pelo Si e pelo P, e de apenas 11,1% proporcionado pelo Si quando na ausência de P em plântulas estressadas. A adição conjunta de Si e P, teve efeito negativo sobre o CR em plântulas estressadas, reduzindo-o (Figura 5B, C).

A salinidade inibiu o crescimento da parte aérea do genótipo CSF 18, independentemente da presença de Si ou P (Figura 6A, B). Já no genótipo CSF 20, a inibição ocorreu apenas em presença de Si e/ou P (Figura 7A), ou seja, o NaCl reduziu o efeito benéfico do Si e do P no aumento do CPA das plântulas controle do genótipo CSF 20, observado nas figuras 7B e 7C.

No genótipo CSF 18, também pode-se verificar que, tanto o Si como o P estimularam o crescimento da parte aérea das plântulas sob condições controle (Figura 6A, B).

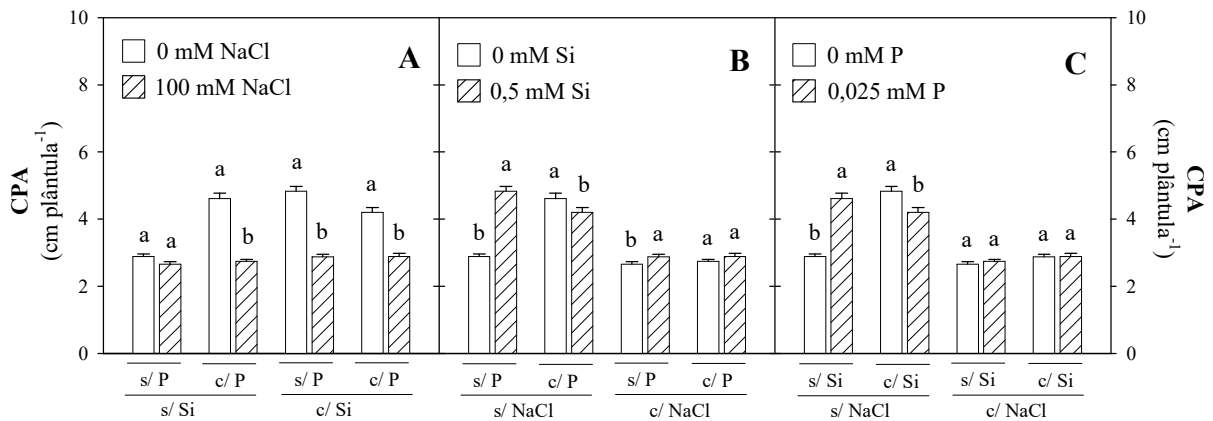
Porém, em ambos os genótipos, sob condições de estresse salino esses nutrientes praticamente não exerceram qualquer efeito sobre esta variável, verificando-se apenas um pequeno acréscimo proporcionado pelo Si, entretanto, esse aumento não foi suficiente para reverter o efeito negativo do NaCl na inibição do crescimento da parte aérea (Figura 6A, 7B).

**Figura 6.** Comprimento da parte aérea (CPA) de plântulas de sorgo, genótipo CSF 18, aos 4 dias após a semeadura, cultivadas na ausência ou presença de NaCl e em ausência ou presença de Si (A) ou P (B). Colunas seguidas por letras minúsculas iguais, em um mesmo nível de NaCl, ou por letras maiúsculas iguais, em um mesmo nível de Si ou P, não diferem significativamente entre si ( $p > 0,05$ ). As barras verticais representam o erro padrão da média.



Tais resultados envolvendo os efeitos do Si e do P, em ausência e presença de NaCl, sobre as medidas de crescimento da raiz e da parte aérea foram concordantes com aqueles de matéria seca (MSR e MSPA) (Figura 1, 2) e confirmam que o efeito benéfico desses nutrientes foi mais evidente em plântulas cultivadas em ausência de estresse salino. Esses resultados foram inesperados, visto que muitos autores reportam o efeito benéfico do silício como atenuador dos efeitos deletérios do estresse salino no crescimento e desenvolvimento das culturas, como cana de açúcar (ASHRAF *et al.*, 2010), soja (LEE *et al.*, 2010), arroz (SHI *et al.*, 2013), tomate (HAGHIGHI; PESSARAKLI, 2013), milho (ZHU; GONG, 2014), citros (KOSTOPOULOU; THERIOS, 2014) entre outros. Da mesma forma, outros autores relatam efeito benéfico do P em minimizar os efeitos adversos da salinidade em culturas como pepino (ABU-ROMMAN; SUWWAN; AL-RAMAMNEH, 2013) e violeta africana (SHIBLI *et al.*, 2001).

**Figura 7.** Análise dos desdobramentos de NaCl, dentro de cada nível de Si e P (A); de Si, dentro de cada nível de NaCl e P (B); e de P, dentro de cada nível de NaCl e Si (C), para comprimento da parte aérea (CPA) de plântulas de sorgo, genótipo CSF 20, aos 4 dias após a semeadura, cultivadas na ausência ou presença de NaCl, Si ou P. Colunas seguidas por letras iguais não diferem significativamente entre si, dentro de cada tratamento ( $p > 0,05$ ). As barras verticais representam o erro padrão da média.



#### 4.1.2 Aos 10 DAS

De acordo com a análise de variância, as variáveis de crescimento das plântulas de ambos os genótipos de sorgo, avaliados aos 10 DAS, não evidenciaram nenhuma interação tripla entre os fatores salinidade, Si e P (Tabela 2). No entanto, no genótipo CSF 18, houve interações duplas significativas entre os fatores: salinidade  $\times$  Si, para as variáveis MSR e relação MSPA/MSR; salinidade  $\times$  P, para as variáveis relação MSPA/MSR, CR e CPA; Si  $\times$  P, para as variáveis MSR, relação MSPA/MSR, CR e CPA. No genótipo CSF 20, ocorreu apenas interação significativa entre salinidade  $\times$  Si para a variável CPA e entre o Si  $\times$  P para a CR.

Também pode-se verificar através da análise de variância que, em ambos os genótipos, praticamente todas as variáveis de crescimento foram influenciadas pela salinidade. De modo geral, as plântulas de sorgo apresentaram, aos 10 DAS, redução considerável no seu crescimento em virtude da presença de NaCl na solução de cultivo. Outros autores também observaram reduções significativas no crescimento de plantas de sorgo submetidas ao estresse salino (AQUINO; LACERDA; GOMES-FILHO, 2007; SOUSA, 2007; FREITAS, 2010; MIRANDA *et al.*, 2013). Segundo Oliveira (2010), o estresse salino provocado pelo NaCl afeta negativamente a absorção de água, a germinação das sementes e o crescimento inicial das plântulas de sorgo. É provável que isso ocorra em virtude da redução da absorção de água pelas plantas, devido ao excesso de sais, causando redução no potencial hídrico do solo que associada

**Tabela 2** - Resumo da análise de variância dos valores médios de massa seca das raízes (MSR) e da parte aérea (MSPA), relação entre a massa seca da parte aérea e da raiz (MSPA/MSR) e comprimentos da raiz (CR) e da parte aérea (CPA) de plântulas de sorgo, genótipos CSF 18 e CSF 20, aos 10 dias após a semeadura, cultivadas sob condições de estresse salino (S) e em presença de silício (Si) e/ou fósforo (P).

Fonte de variação	G.L.	Quadrado Médio									
		CSF 18					CSF 20				
		MSR	MSPA	MSPA/MSR	CR	CPA	MSR	MSPA	MSPA/MSR	CR	CPA
S	1	3,42 <sup>**</sup>	3,02 <sup>**</sup>	1,07 <sup>**</sup>	453,63 <sup>**</sup>	154,29 <sup>**</sup>	0,89 <sup>**</sup>	2,37 <sup>**</sup>	0,01 <sup>ns</sup>	22,58 <sup>*</sup>	66,07 <sup>**</sup>
Si	1	0,41 <sup>**</sup>	0,09 <sup>ns</sup>	0,32 <sup>**</sup>	41,33 <sup>**</sup>	0,17 <sup>ns</sup>	0,52 <sup>**</sup>	0,13 <sup>ns</sup>	1,30 <sup>**</sup>	1,83 <sup>ns</sup>	18,92 <sup>**</sup>
P	1	0,64 <sup>**</sup>	0,44 <sup>*</sup>	0,30 <sup>**</sup>	44,55 <sup>**</sup>	1,49 <sup>ns</sup>	0,95 <sup>**</sup>	0,02 <sup>ns</sup>	1,21 <sup>*</sup>	0,35 <sup>ns</sup>	30,88 <sup>**</sup>
S x Si	1	0,61 <sup>**</sup>	0,11 <sup>ns</sup>	0,28 <sup>**</sup>	9,32 <sup>ns</sup>	5,05 <sup>ns</sup>	0,08 <sup>ns</sup>	0,52 <sup>ns</sup>	0,56 <sup>ns</sup>	0,17 <sup>ns</sup>	17,02 <sup>**</sup>
S x P	1	0,04 <sup>ns</sup>	1,6E-4 <sup>ns</sup>	0,16 <sup>*</sup>	40,19 <sup>**</sup>	32,90 <sup>**</sup>	0,09 <sup>ns</sup>	0,14 <sup>ns</sup>	0,38 <sup>ns</sup>	0,67 <sup>ns</sup>	0,38 <sup>ns</sup>
Si x P	1	0,25 <sup>*</sup>	5,0E-3 <sup>ns</sup>	0,20 <sup>*</sup>	25,88 <sup>*</sup>	24,09 <sup>**</sup>	0,04 <sup>ns</sup>	0,31 <sup>ns</sup>	0,05 <sup>ns</sup>	22,37 <sup>*</sup>	3,24 <sup>ns</sup>
S x Si x P	1	0,01 <sup>ns</sup>	0,23 <sup>ns</sup>	0,07 <sup>ns</sup>	2,15 <sup>ns</sup>	1,33 <sup>ns</sup>	0,13 <sup>ns</sup>	0,06 <sup>ns</sup>	0,31 <sup>ns</sup>	1,71 <sup>ns</sup>	2,15 <sup>ns</sup>
Resíduo	24	0,04	0,09	0,03	4,52	1,82	0,06	0,14	0,16	3,23	1,61
CV (%)		8,95	6,20	7,84	12,35	14,89	13,12	8,84	17,28	10,38	15,85

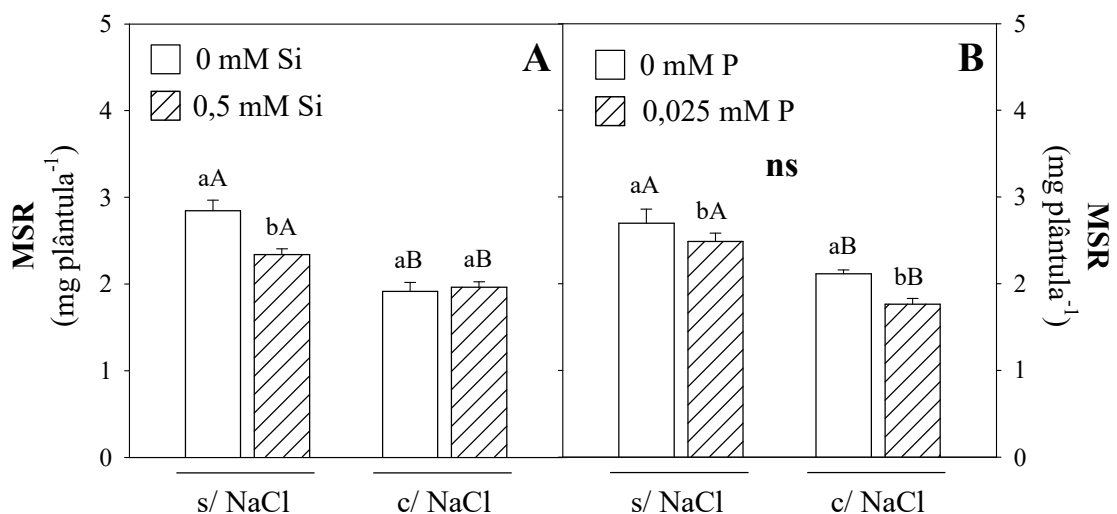
(\*\*) = significativo ( $p < 0,01$ ); (\*) = significativo ( $p < 0,05$ ); (ns) = não significativo pelo teste F; CV = coeficiente de variação.



aos efeitos tóxicos dos sais no protoplasma da semente, prejudicam a germinação e a velocidade da germinação, resultando na formação de plântulas com crescimento reduzido, caracterizado pela diminuição no comprimento dos órgãos e menor acúmulo de biomassa (SILVA *et al.*, 2007; BARROSO; FRANKE; BARROSO, 2010). A redução no crescimento causado pelo estresse salino, de acordo com Lopes e Klar (2009), também pode ser devido ao gasto energético necessário para a síntese de compostos orgânicos osmoticamente ativos.

No genótipo CSF 18, verificou-se que a produção de biomassa seca das raízes foi inibida pela presença de NaCl no meio de cultivo, independentemente da presença de Si ou P (Figura 8). Da mesma forma, tanto o Si como o P, também inibiram a produção de MSR em plântulas não estressadas. Da mesma forma que observado no genótipo CSF 18, reduções na produção da biomassa seca das raízes também foram observadas no genótipo CSF 20, em resposta ao estresse salino. Considerando a média das inibições, a salinidade reduziu a produção de MSR em 25 e 16% nos genótipos CSF 18 e CSF 20, respectivamente (resultados não apresentados). Segundo Cruz *et al.* (2003) a redução de massa seca é um dos principais efeitos negativos do estresse salino, sendo esse efeito reportado em outras culturas, como algodão (OLIVEIRA *et al.*, 2012), milho (FEIJÃO *et al.*, 2013; ROHANIPOOR *et al.*, 2013) e girassol (CENTENO *et al.*, 2014).

**Figura 8.** Massa seca das raízes (MSR) de plântulas de sorgo, genótipo CSF 18, aos 10 dias após a sementeira, cultivadas na ausência ou presença de NaCl e em ausência ou presença de Si (A) ou P (B). Colunas seguidas por letras minúsculas iguais, em um mesmo nível de NaCl, ou por letras maiúsculas iguais, em um mesmo nível de Si ou P, não diferem significativamente entre si ( $p > 0,05$ ). As barras verticais representam o erro padrão da média e ns representa desdobramentos não significativos.



Como observado na figura 8A, a adição de Si no meio de cultivo não foi capaz de minimizar o efeito negativo do estresse salino na inibição da produção da biomassa seca da raiz do genótipo CSF 18. Resultado esse que não corrobora com o observado em diversas espécies, onde a tolerância à salinidade foi aumentada ao se aplicar Si no meio de cultivo ou através de pulverização foliar, como por exemplo, em milho (LIMA *et al.*, 2011), canola (FARSHIDI; ABDOLZADEH; SADEGHIPOUR, 2012), calêndula (BAYAT *et al.*, 2013) e até mesmo em sorgo (NASCIMENTO *et al.*, 2014), e em todos esses casos houve indução do crescimento pelo Si.

Sob estresse salino, a adição de P no meio de cultivo acentuou a redução no crescimento radicular (MSR) das plântulas de sorgo do genótipo CSF 18 (Figura 8B). Esses resultados corroboram com aqueles encontrados por Lacerda *et al.* (2006a), que verificaram que o crescimento radicular foi inibido pelo incremento na concentração de P na solução nutritiva, tanto nas plantas controle como nas plantas estressadas de dois genótipos de sorgo estudados. De acordo com Marschner (1995) e Taiz e Zeiger (2013), a redução na MSR pode representar uma adequação entre o tamanho do órgão responsável pela absorção e a disponibilidade do nutriente no meio de crescimento.

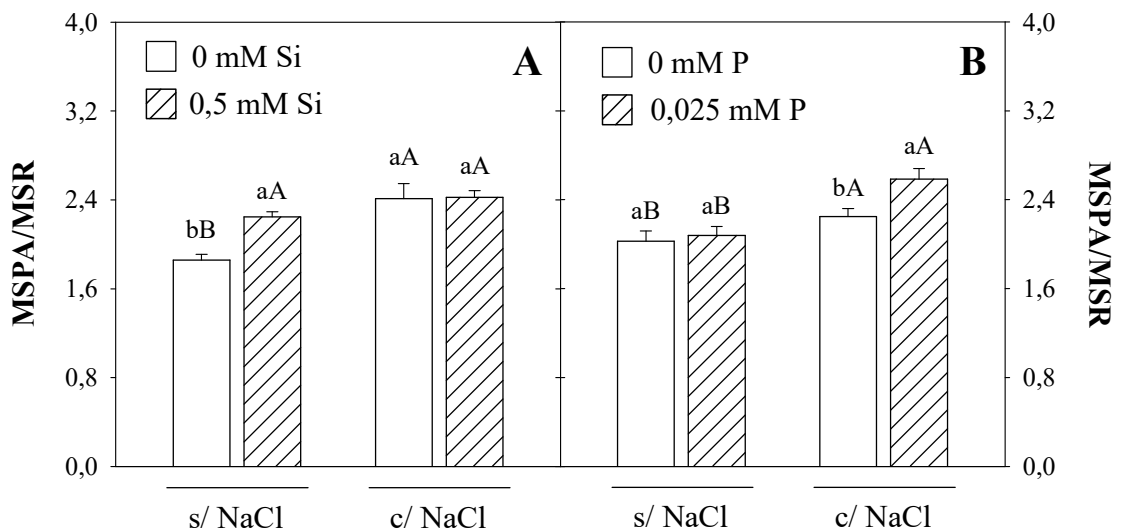
Ao contrário do observado aos 4 DAS, as plântulas de sorgo do genótipo CSF 18 avaliadas aos 10 DAS apresentaram, de modo geral, incrementos na relação MSPA/MSR em função da salinidade (Figura 9). Esse aumento ocorreu em virtude da inibição da produção de MSR em relação à de MSPA, o que indica que as raízes das plântulas de sorgo se mostraram mais sensíveis aos sais do que a parte aérea aos 10 DAS. No entanto, é aceito pela maioria dos autores que a parte aérea é normalmente mais sensível ao estresse salino (MUNNS; TESTER, 2008; MATOS *et al.*, 2013). Porém, maior redução no crescimento radicular de plantas expostas ao estresse salino também tem sido observada por outros autores (MAEDA; SILVA; BELLOTE, 2010; FEIJÃO *et al.*, 2013).

Plântulas não estressadas do genótipo CSF 18, apresentaram acréscimo na relação MSPA/MSR em função da adição de Si no meio de cultivo (Figura 9A), fato que se deve à redução da MSR proporcionada por esse nutriente (Figura 8A). Do mesmo modo, a adição de P no meio de cultivo também aumentou a relação MSPA/MSR, porém apenas nas plântulas estressadas (Figura 9B).

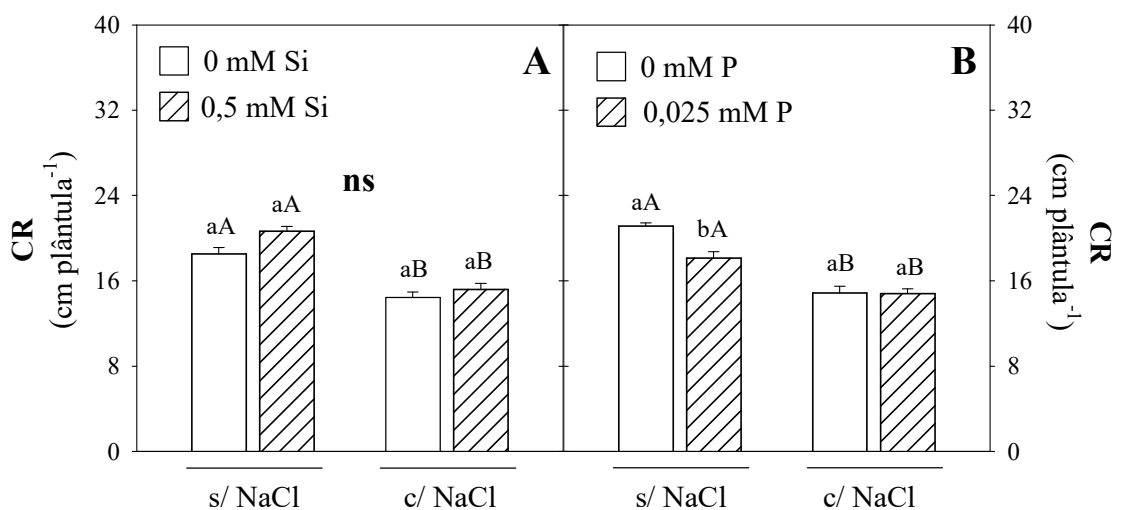
Aos 10 DAS, a salinidade inibiu significativamente o CR das plântulas de sorgo do genótipo CSF18, independentemente da presença de Si ou P no meio de cultivo (Figura 10), fato este que também pode ser verificado no genótipo CSF 20. Considerando a média dos comprimentos das raízes nos dois níveis de Si e P, a salinidade inibiu o crescimento deste órgão

em 24 e 20 %, nos genótipos CSF 18 e CSF 20, respectivamente. No entanto, tanto o Si como o P, não atenuaram os danos causados pelo NaCl no crescimento da raiz.

**Figura 9.** Relação entre a massa seca da parte aérea e das raízes (MSPA/MSR) de plântulas de sorgo, genótipo CSF 18, aos 10 dias após a semeadura, cultivadas na ausência ou presença de NaCl e em ausência ou presença de Si (A) ou P (B). Colunas seguidas por letras minúsculas iguais, em um mesmo nível de NaCl, ou por letras maiúsculas iguais, em um mesmo nível de Si ou P, não diferem significativamente entre si ( $p > 0,05$ ). As barras verticais representam o erro padrão da média.



**Figura 10.** Comprimento da raiz (CR) de plântulas de sorgo, genótipo CSF 18, aos 10 dias após a semeadura, cultivadas na ausência ou presença de NaCl e em ausência ou presença de Si (A) ou P (B). Colunas seguidas por letras minúsculas iguais, em um mesmo nível de NaCl, ou por letras maiúsculas iguais, em um mesmo nível de Si ou P, não diferem significativamente entre si ( $p > 0,05$ ). As barras verticais representam o erro padrão da média e ns representa desdobramentos não significativos.



Conforme Hattori *et al.* (2003) e Lux *et al.* (2003), o Si aumenta a extensibilidade da parede celular na zona de crescimento da raiz e diminui na zona basal do estelo, o que evidencia seu papel no alongamento da raiz e na indução de uma camada protetora na região do estelo, formando uma barreira mecânica pelo enrijecimento da parede celular dos tecidos do estelo e da endoderme. Portanto, com base nos dados de comprimento obtidos, o silício parece não ter esta mesma resposta em plântulas de sorgo sob condições de estresse salino.

Do mesmo modo que observado para o CR, a salinidade também inibiu o crescimento da parte aérea de plântulas de sorgo de ambos os genótipos avaliadas aos 10 DAS, independentemente da presença de Si ou P (Figura 11), no entanto, os efeitos foram maiores no genótipo CSF 20 do que no genótipo CSF 18. Considerando a média das inibições nos dois níveis de Si e P, a salinidade reduziu o comprimento da parte aérea em 27 e 6% nos genótipos CSF 18 e CSF 20, respectivamente (resultados não apresentados).

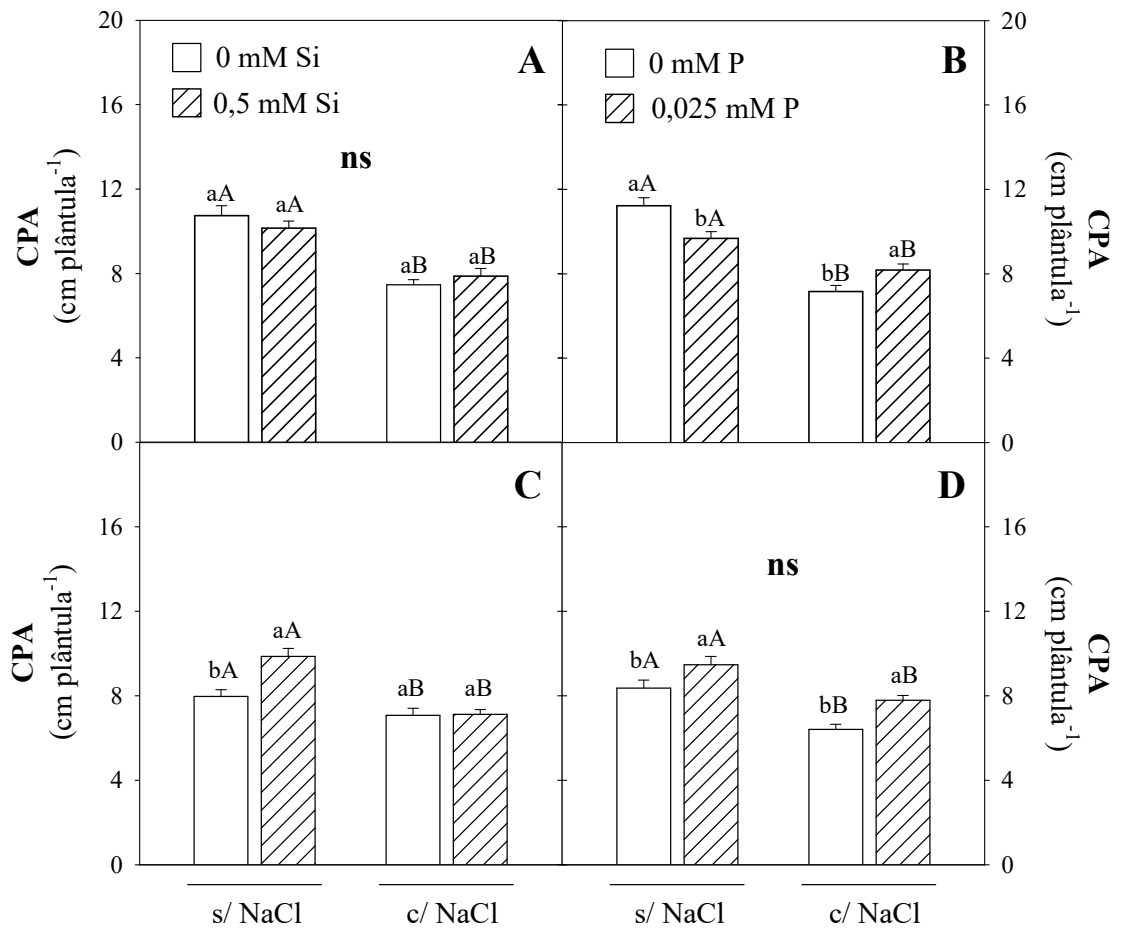
Reduções nos comprimentos da parte aérea e da raiz em resposta à salinidade são comuns a várias culturas e têm sido reportadas por diversos autores, como por exemplo: Moterle *et al.* (2006), em milho pipoca; Corrêa (2012), em cebola; e Araújo *et al.* (2016), em melão. Segundo Dell'Áquilla (1992), a redução no comprimento das plântulas se deve às mudanças na turgescência celular, em função da diminuição da síntese de proteína nas condições de estresse hídrico. Tobe, Li e Omasa (2000) e Taiz e Zeiger (2013) relatam que o primeiro efeito mensurável do estresse hídrico/salino é a diminuição no crescimento, causada pela redução da expansão celular ocasionada pela seca fisiológica produzida e ao efeito tóxico, resultante da concentração de íons no protoplasma.

O Si não exerceu qualquer efeito significativo no CPA nas plântulas sob condições de estresse salino (Figura 11A, B). Diferentemente do observado para o Si, a adição de P no meio de crescimento atenuou os danos causados pelo NaCl na inibição do crescimento da parte aérea das plântulas de sorgo de ambos os genótipos (Figura 11B, C). Em experimento realizado com pepino, Abu-Romman, Suwwan e Al-Ramamneh (2013) verificaram que, apesar do comprimento da parte aérea ter sido reduzido pela salinidade, a adição de P aumentou esta variável em todas as concentrações de NaCl. O fósforo, de acordo com Santos *et al.* (2002), desempenha um papel importante no crescimento de gramíneas, pois é integrante de compostos importantes das células vegetais, incluindo intermediários da respiração e fotossíntese, bem como nucleotídeos utilizados no metabolismo energético das plantas (TAIZ; ZEIGER, 2013).

Portanto, os dados aqui obtidos revelaram que, aos 10 DAS, as maiores reduções no crescimento em resposta ao estresse salino ocorreram no genótipo CSF 18, diferentemente do observado aos 4 DAS, quando o genótipo CSF 20 se mostrou mais sensível a salinidade.

Esses resultados, porém, corroboram dos encontrados por outros autores, os quais trabalhando com os mesmos genótipos de sorgo forrageiro na fase de crescimento vegetativo, verificaram que a redução no crescimento da parte aérea, bem como das raízes, foi mais pronunciada no genótipo CSF 18, considerado previamente sensível ao estresse salino (SILVA *et al.*, 2003a; LACERDA *et al.*, 2006a; AQUINO; LACERDA; GOMES-FILHO, 2007).

**Figura 11.** Comprimento da parte aérea (CPA) de plântulas de sorgo, genótipo CSF 18 (A e B) e CSF 20 (C e D), aos 10 dias após a semeadura, cultivadas na ausência ou presença de NaCl e em ausência ou presença de Si (A e C) ou P (B e D). Colunas seguidas por letras minúsculas iguais, em um mesmo nível de NaCl, ou por letras maiúsculas iguais, em um mesmo nível de Si ou P, não diferem significativamente entre si ( $p > 0,05$ ). As barras verticais representam o erro padrão da média e ns representa desdobramentos não significativos.



## 4.2 Teores de Na<sup>+</sup> e K<sup>+</sup>

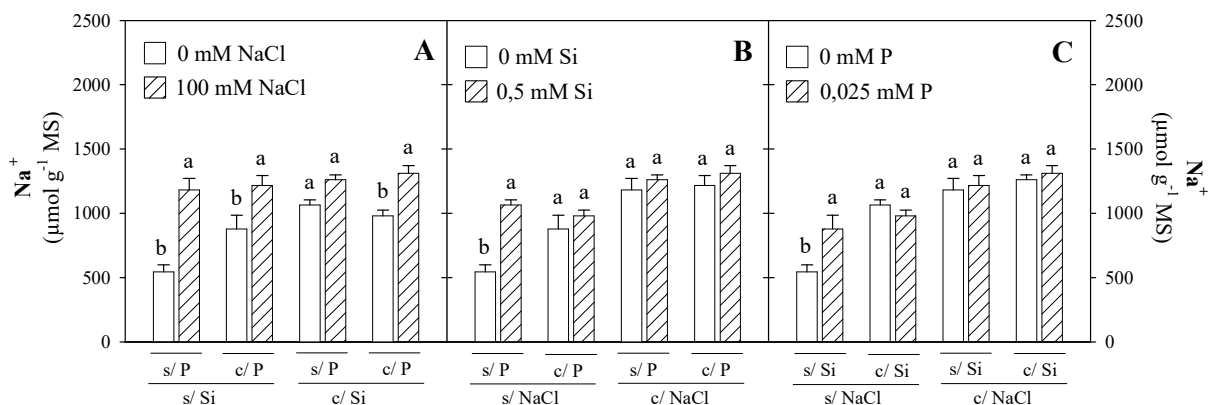
### 4.2.1 Aos 4 DAS

A análise dos dados mostrou que, aos 4 DAS, os teores dos íons Na<sup>+</sup> e K<sup>+</sup> nas raízes das plântulas de sorgo dos genótipos CSF 18 e CSF 20, foram influenciados significativamente pela salinidade (Tabela 3). Além disso, se pode observar que ocorreu interação significativa entre os fatores: salinidade × Si, para os teores de K<sup>+</sup> no genótipo CSF 18; e salinidade × Si × P para os teores de Na<sup>+</sup> e K<sup>+</sup> no genótipo CSF 20.

Os teores médios de Na<sup>+</sup> nas raízes do genótipo CSF 18 foi de 812,4 μmol g<sup>-1</sup> MS e do CSF 20 foi de 867,0 μmol g<sup>-1</sup> MS, e apresentaram acréscimos, de 63 e 43% em função da salinidade do meio de cultivo, respectivamente (resultados não apresentados). Em presença de Si, como observado na figura 12A, apesar da adição de NaCl na solução de cultivo ter proporcionado acréscimo nos teores desse íon, este aumento não foi significativo.

Analisando-se os desdobramentos do efeito de Si e de P nos teores de Na<sup>+</sup>, nas raízes do genótipo CSF 20, se pode verificar que, a adição isolada de cada nutriente na solução de cultivo contribuiu para a elevação nos teores de Na<sup>+</sup> em ausência de NaCl, porém não se observaram qualquer efeito em condições de estresse salino (Figura 12B, C).

**Figura 12.** Análise dos desdobramentos de NaCl, dentro de cada nível de Si e P (A); de Si, dentro de cada nível de NaCl e P (B); e de P, dentro de cada nível de NaCl e Si (C), para teores de sódio (Na<sup>+</sup>) nas raízes de plântulas de sorgo, genótipo CSF 20, aos 4 dias após a semeadura, cultivadas na ausência ou presença de NaCl, Si ou P. Colunas seguidas por letras iguais não diferem significativamente entre si, dentro de cada tratamento ( $p > 0,05$ ). As barras verticais representam o erro padrão da média.



**Tabela 3** – Resumo da análise de variância dos valores médios dos teores de sódio (Na<sup>+</sup>) e potássio (K<sup>+</sup>) das raízes (R) e da parte aérea (PA) de plântulas de sorgo, genótipos CSF 18 e CSF 20, aos 4 dias após a semeadura, cultivadas sob condições de estresse salino (S) e em presença de silício (Si) e/ou fósforo (P).

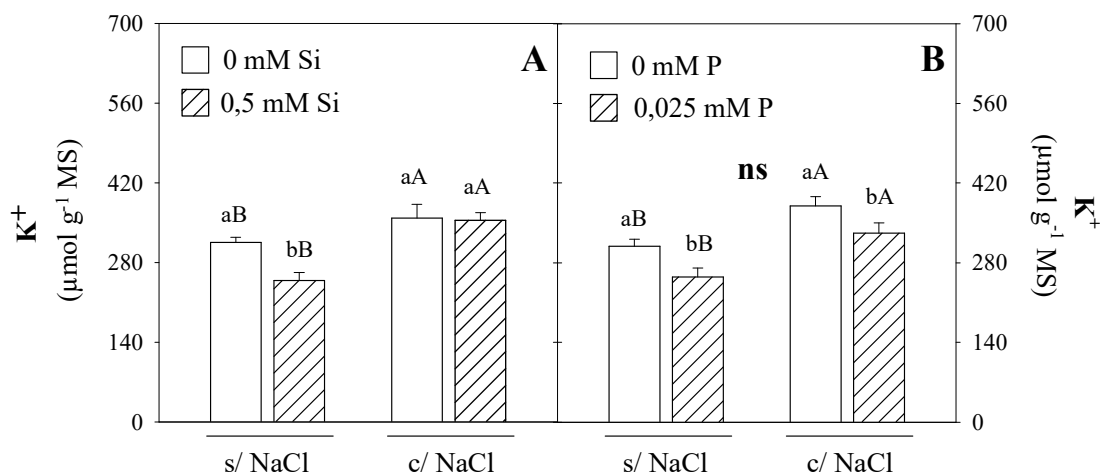
Fonte de variação	G.L.	Quadrado médio							
		CSF 18				CSF 20			
		Na <sup>+</sup> (R)	K <sup>+</sup> (R)	Na <sup>+</sup> (PA)	K <sup>+</sup> (PA)	Na <sup>+</sup> (R)	K <sup>+</sup> (R)	Na <sup>+</sup> (PA)	K <sup>+</sup> (PA)
S	1	2078196,40 <sup>**</sup>	44115,60 <sup>**</sup>	411899,15 <sup>**</sup>	1494,40 <sup>ns</sup>	1129796,14 <sup>**</sup>	177185,78 <sup>**</sup>	407599,96 <sup>**</sup>	1694,36 <sup>ns</sup>
Si	1	3063,92 <sup>ns</sup>	9983,35 <sup>*</sup>	6591,72 <sup>*</sup>	214,31 <sup>ns</sup>	318369,34 <sup>**</sup>	3005,87 <sup>ns</sup>	19498,94 <sup>**</sup>	316,39 <sup>ns</sup>
P	1	13197,30 <sup>ns</sup>	20802,55 <sup>**</sup>	3271,00 <sup>ns</sup>	423,29 <sup>ns</sup>	56600,77 <sup>ns</sup>	2736,94 <sup>ns</sup>	69,62 <sup>ns</sup>	98,67 <sup>ns</sup>
S x Si	1	14679,22 <sup>ns</sup>	7881,69 <sup>*</sup>	1249,82 <sup>ns</sup>	729,16 <sup>ns</sup>	100306,72 <sup>*</sup>	310,43 <sup>ns</sup>	5966,55 <sup>*</sup>	1355,75 <sup>ns</sup>
S x P	1	100,85 <sup>ns</sup>	66,29 <sup>ns</sup>	1483,34 <sup>ns</sup>	5335,64 <sup>ns</sup>	13110,73 <sup>ns</sup>	1108,00 <sup>ns</sup>	380,86 <sup>ns</sup>	644,71 <sup>ns</sup>
Si x P	1	16659,21 <sup>ns</sup>	1333,52 <sup>ns</sup>	12376,22 <sup>**</sup>	1459,48 <sup>ns</sup>	82307,47 <sup>*</sup>	2084,79 <sup>ns</sup>	57,09 <sup>ns</sup>	0,98 <sup>ns</sup>
S x Si x P	1	17127,68 <sup>ns</sup>	25,41 <sup>ns</sup>	246,46 <sup>ns</sup>	12341,45 <sup>*</sup>	95035,67 <sup>*</sup>	16066,08 <sup>**</sup>	1759,87 <sup>ns</sup>	2360,52 <sup>ns</sup>
Resíduo	24	5499,36	1510,71	1184,27	1462,23	18311,20	1713,28	1049,08	767,58
CV (%)		6,95	12,18	16,93	18,44	12,83	14,12	14,91	14,61

(\*\*) = significativo ( $p < 0,01$ ); (\*) = significativo ( $p < 0,05$ ); (ns) = não significativo pelo teste F; CV = coeficiente de variação.

Como resultado da maior absorção de  $\text{Na}^+$ , esperava-se que os teores de  $\text{K}^+$  fossem reduzidos, entretanto, os teores deste íon aumentaram nas raízes das plântulas de sorgo mantidas sob estresse salino, independentemente da presença de Si ou P no meio de cultivo (Figuras 13A, B e 14A). Portanto, aos 4 DAS, parece não ter ocorrido competição do  $\text{Na}^+$  pelos sítios de absorção dos transportadores de  $\text{K}^+$  presentes na membrana plasmática das células das raízes. Visto que, de acordo com Marschner (1995) e Maggio *et al.* (2007), a redução no teor de  $\text{K}^+$  tem sido apontada como uma resposta comum em plantas submetidas ao estresse salino, podendo estar relacionada com a competição entre o  $\text{Na}^+$  e o  $\text{K}^+$  pelos sítios de absorção de potássio. Entretanto, os resultados sobre os teores de  $\text{K}^+$  em condições de estresse salino são conflitantes, havendo autores que relatam aumentos, tais como Lacerda *et al.* (2006b), em plantas de sorgo, e Chen *et al.* (2005), em cevada, enquanto outros observaram reduções, dentre os quais se podem citar Araújo (2012), Silva *et al.* (2014) e Silva (2015b), em plantas de feijão-de-corda, girassol e sorgo, respectivamente. De acordo com Flowers (2004) e Lacerda *et al.* (2006b), essas divergências ocorrem em função de diversos fatores, tais como manejo da cultura, idade das plantas, intensidade e duração do estresse.

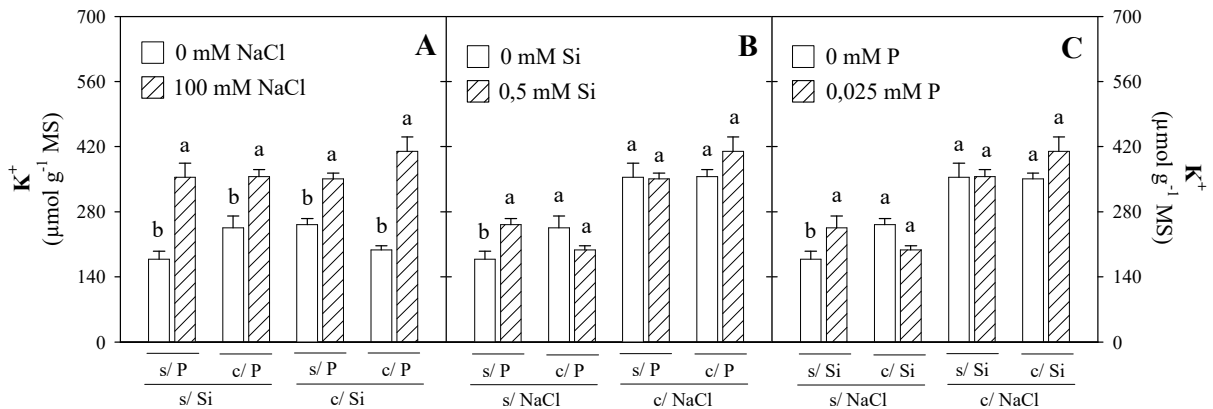
Considerando a média dos teores de  $\text{K}^+$  nos dois níveis de P, como observado na figura 13A, a presença de Si no meio de cultivo reduziu os teores desse íon nas raízes de plântulas não estressadas do genótipo CSF 18, e não teve efeito em plântulas sob estresse salino. O oposto foi observado no genótipo CSF 20, onde a presença de Si aumentou os teores de  $\text{K}^+$  em plântulas não estressadas, contudo apenas na ausência de P (Figura 14B).

**Figura 13.** Teores de potássio ( $\text{K}^+$ ) nas raízes de plântulas de sorgo, genótipo CSF 18, aos 4 dias após a semeadura, cultivadas na ausência ou presença de NaCl e em ausência ou presença de Si (A) ou P (B). Colunas seguidas por letras minúsculas iguais, em um mesmo nível de NaCl, ou por letras maiúsculas iguais, em um mesmo nível de Si ou P, não diferem significativamente entre si ( $p > 0,05$ ). As barras verticais representam o erro padrão da média e ns representa desdobramentos não significativos.





**Figura 14.** Análise dos desdobramentos de NaCl, dentro de cada nível de Si e P (A); de Si dentro de cada nível de NaCl e P (B); e de P, dentro de cada nível de NaCl e Si (C), para teores de potássio ( $K^+$ ) nas raízes de plântulas de sorgo, genótipo CSF 20, aos 4 dias após a semeadura, cultivadas na ausência ou presença de NaCl, Si ou P. Colunas seguidas por letras iguais não diferem significativamente entre si, dentro de cada tratamento ( $p > 0,05$ ). As barras verticais representam o erro padrão da média.



Os teores de potássio nas raízes das plântulas do genótipo CSF 18, foram significativamente reduzidos pela presença de P no meio de cultivo, tanto sob condições controle como de estresse (Figura 13B). Já no genótipo CSF 20, sob condições controle (ausência de NaCl), os teores de  $K^+$  foram elevados nas raízes das plântulas em função da adição de P no meio de cultivo em ausência de Si, e não teve efeito sob condição de estresse salino (Figura 14C). Contrariamente, aos resultados obtidos neste estudo, Abu-Romman, Suwwan e Al-Ramamneh (2013) verificaram que a presença de P favoreceu a absorção de  $K^+$  em plantas de pepino submetidas à salinidade por meio da adição de NaCl a 100mM. Resultado semelhante foi obtido por Shibli *et al.* (2001), em violeta Africana, que observaram que a adição de P melhorou a absorção de  $K^+$  e  $Ca^+$  em condição de estresse salino.

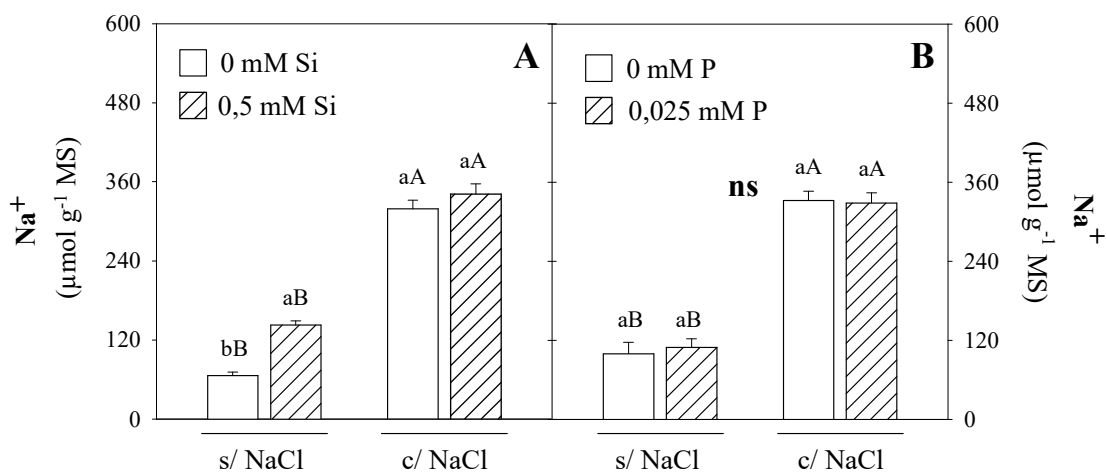
Na parte aérea, em ambos os genótipos, de acordo com a análise estatística dos dados, os teores de  $Na^+$  foram influenciados pela salinidade, bem como pelo Si (Tabela 3). Também se pode observar que, para os teores desse íon, ocorreu interação significativa de interesse entre salinidade  $\times$  Si, apenas no genótipo CSF 20,

Os teores médios de  $Na^+$  na parte aérea do genótipo CSF 18 foram de  $89,8 \mu\text{mol g}^{-1}$  MS e do CSF 20 foram de  $104,4 \mu\text{mol g}^{-1}$  MS, e apresentaram acréscimos de 253 e 216% em resposta ao estresse salino, respectivamente (resultados não apresentados). Tais resultados justificam, pelo menos em parte, a maior redução do crescimento da parte aérea das plântulas de sorgo expostas à salinidade, em relação às raízes (Figuras 1 e 2). Como relatado por diversos autores, altas concentrações de  $Na^+$  na parte aérea de plântulas podem causar sérios problemas

osmóticos e metabólicos (TSAI *et al.*, 2004; OLIVEIRA, 2010; MARQUES *et al.*, 2013). De modo geral, em plantas em fase de crescimento vegetativo, as folhas são mais vulneráveis aos efeitos deletérios do estresse salino que as raízes, porque os íons  $\text{Na}^+$  e  $\text{Cl}^-$  se acumulam em maior quantidade nos tecidos aéreos, incluindo os fotossintéticos, do que nos subterrâneos, acarretando alterações que resultam na diminuição do crescimento e desenvolvimento vegetal (TESTER; DAVENPORT, 2003).

Considerando a média dos teores de  $\text{Na}^+$  nos dois níveis de sal e de Si, verificou-se que, de modo geral, o silício promoveu maior absorção de  $\text{Na}^+$  pela parte aérea das plântulas de sorgo de ambos os genótipos, avaliadas aos 4 DAS. Esse resultado pode ser justificado devido ao fato da fonte de Si utilizada neste estudo ter sido o silicato de sódio ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ), uma fonte adicional de íon sódio (LIMA, 2011; SILVA, 2015a). No entanto, avaliando o efeito da interação salinidade  $\times$  silício nos teores de  $\text{Na}^+$ , verificou-se que no genótipo CSF 20, a adição de Si elevou os teores desse íon sob condições controle, e não teve efeito sob estresse salino (Figura 15A).

**Figura 15.** Teores de sódio ( $\text{Na}^+$ ) na parte aérea de plântulas de sorgo, genótipo CSF 20, aos 4 dias após a semeadura, cultivadas na ausência ou presença de NaCl e em ausência ou presença de Si (A) ou P (B). Colunas seguidas por letras minúsculas iguais, em um mesmo nível de NaCl, ou por letras maiúsculas iguais, em um mesmo nível de Si ou P, não diferem significativamente entre si ( $p > 0,05$ ). As barras verticais representam o erro padrão da média e ns representa desdobramentos não significativos.



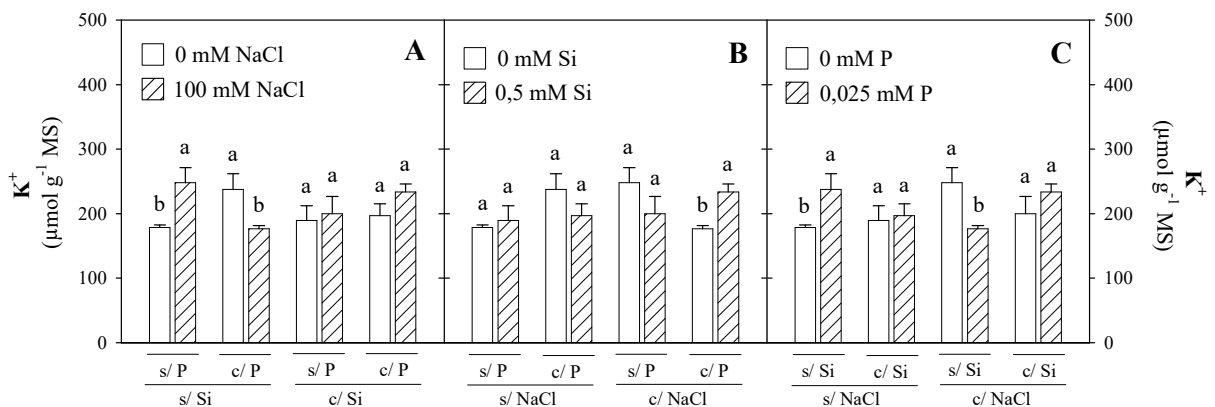
De acordo com Kafi e Rahimi (2011) e Mateos, Andrades e Davy (2013), os silicatos promovem tolerância às condições de estresse hídrico ou salino, garantindo a integridade e a estabilidade da membrana celular, especialmente quando as plantas são cultivadas em ambientes salinos, pois o silício induz a redução da absorção de íons tóxicos,

como o  $\text{Na}^+$ , e promove o aumento na captação de  $\text{K}^+$  (ASHRAF *et al.*, 2010). Entretanto, no presente estudo, não foram observados efeitos do Si na redução da absorção de  $\text{Na}^+$  pela salinidade nas diferentes partes das plântulas estudadas (Figura 12B e 15A). Resultado esse que difere de um número crescente de evidências que tem demonstrado que, sob estresse salino, a aplicação de silício pode reduzir as concentrações de sódio (ASHRAF *et al.*, 2010; ZHU; GONG, 2014; YIN *et al.*, 2015).

Na parte aérea, os teores de  $\text{K}^+$ , apesar de não terem sido influenciados por cada um dos fatores estudados isoladamente, apresentaram interação significativa entre salinidade, Si e P no genótipo CSF 18, e não se observou interação entre fatores no genótipo CSF 20 (Tabela 3).

Em plântulas mantidas sob estresse salino, na ausência de Si e P, foram observados aumentos significativos nos níveis de  $\text{K}^+$  em função do estresse com NaCl a 100 mM (Figura 16A). Tal resultado contrasta com os obtidos por vários autores (AZEVEDO NETO *et al.*, 2004; ALVAREZ-PIZARRO *et al.*, 2009; CUNHA *et al.*, 2013), que apontam a redução nos teores de  $\text{K}^+$  como uma resposta comum em plantas submetidas ao estresse salino. Como citado anteriormente, isso pode estar relacionado ao antagonismo entre o  $\text{Na}^+$  e o  $\text{K}^+$  pelos sítios de absorção desse último íon (SILVA *et al.*, 2009a; 2009b; 2010; DEINLEIN *et al.*, 2014). No entanto, como ressaltado por Lacerda *et al.* (2006b), o aumento no acúmulo de  $\text{K}^+$  pode estar relacionado à redução na translocação desse íon, em função da menor demanda para o crescimento das plantas sob condições de estresse salino.

**Figura 16.** Análise dos desdobramentos de NaCl, dentro de cada nível de Si e P (A); de Si dentro de cada nível de NaCl e P (B); e de P, dentro de cada nível de NaCl e Si (C), para teores de potássio ( $\text{K}^+$ ) na parte aérea de plântulas de sorgo, genótipo CSF 18, aos 4 dias após a semeadura, cultivadas na ausência ou presença de NaCl, Si ou P. Colunas seguidas por letras iguais não diferem significativamente entre si, dentro de cada tratamento ( $p > 0,05$ ). As barras verticais representam o erro padrão da média.



Em plântulas de sorgo, do genótipo CSF 18, mantidas sob estresse salino e avaliadas aos 4 DAS, verificou-se aumento nos teores de  $K^+$  na parte aérea em função da adição de Si no meio de cultivo, quando na presença de P, em comparação àquelas em ausência desse nutriente (Figura 16B). Em contrapartida, o P teve efeito negativo sobre os níveis de  $K^+$  em condição de estresse salino e sem a presença de Si, verificando-se um decréscimo de 29% nos teores de  $K^+$  na parte aérea das plântulas (Figura 16C). Por outro lado, em condições controle e na ausência de Si, o P contribuiu para aumentar os teores de  $K^+$  na parte aérea (Figura 16C).

#### 4.2.2 Aos 10 DAS

Aos 10 DAS, em virtude de pouco material vegetal, não foram avaliados os teores de  $Na^+$  e  $K^+$  nas raízes do genótipo CSF 20. No entanto, no genótipo CSF 18, se pode verificar através dos dados da análise de variância que, nas raízes, os teores desses íons foram significativamente influenciados apenas pela salinidade (Tabela 4).

O teor médio de  $Na^+$  nas raízes de plântulas controle do genótipo CSF 18 foi de  $435,8 \mu\text{mol g}^{-1} \text{MS}$  e, apresentou aumento de 181% em resposta ao estresse salino (resultado não apresentado). Devido a este fato, esperava-se que os teores de  $K^+$  nas raízes fossem reduzidos, entretanto, o teor médio desse íon que foi de  $55,8 \mu\text{mol g}^{-1} \text{MS}$ , aumentou, em média, 108% em função da presença de NaCl no meio de cultivo (resultados não apresentados). Portanto, da mesma forma que observado aos 4 DAS, aos 10 DAS, parece não ter ocorrido competição do  $Na^+$  pelos sítios de adsorção dos transportadores de  $K^+$  presentes na membrana plasmática das células das raízes. Tal competição, segundo diversos autores, se deve às semelhanças nas propriedades físicas dos íons  $Na^+$  e  $K^+$ , como a similaridade do raio iônico, o que proporciona dificuldade aos transportadores na discriminação desses íons (BLUMWALD; AHARON; APSE, 2000; CHINNUSAMY; JAGENDORF; ZHU, 2005; RODRIGUEZ-NAVARRO; RUBIO, 2006).

De acordo com a análise de variância (Tabela 4), os teores de  $Na^+$  na parte aérea das plântulas de sorgo de ambos os genótipos foram influenciados pela salinidade. Também se pode observar que, os teores de  $Na^+$  apresentaram interação significativa entre salinidade  $\times$  fósforo no genótipo CSF 18, e entre salinidade  $\times$  silício no genótipo CSF 20.

Como observado na figura 17, os teores de  $Na^+$  na parte aérea de ambos os genótipos aumentaram em resposta ao estresse salino, independentemente da presença de Si ou P no meio de cultivo. Considerando a média dos teores de  $Na^+$  nos genótipos CSF 18 e CSF 20 que foram, respectivamente de  $115,3$  e  $126,4 \mu\text{mol g}^{-1} \text{MS}$ , apresentaram acréscimos de 223 e

**Tabela 4** – Resumo da análise de variância dos valores médios dos teores de sódio (Na<sup>+</sup>) e potássio (K<sup>+</sup>) das raízes (R) e da parte aérea (PA) de plântulas de sorgo, genótipos CSF 18 e CSF 20, aos 10 dias após a semeadura, cultivadas sob condições de estresse salino (S) e em presença de silício (Si) e/ou fósforo (P).

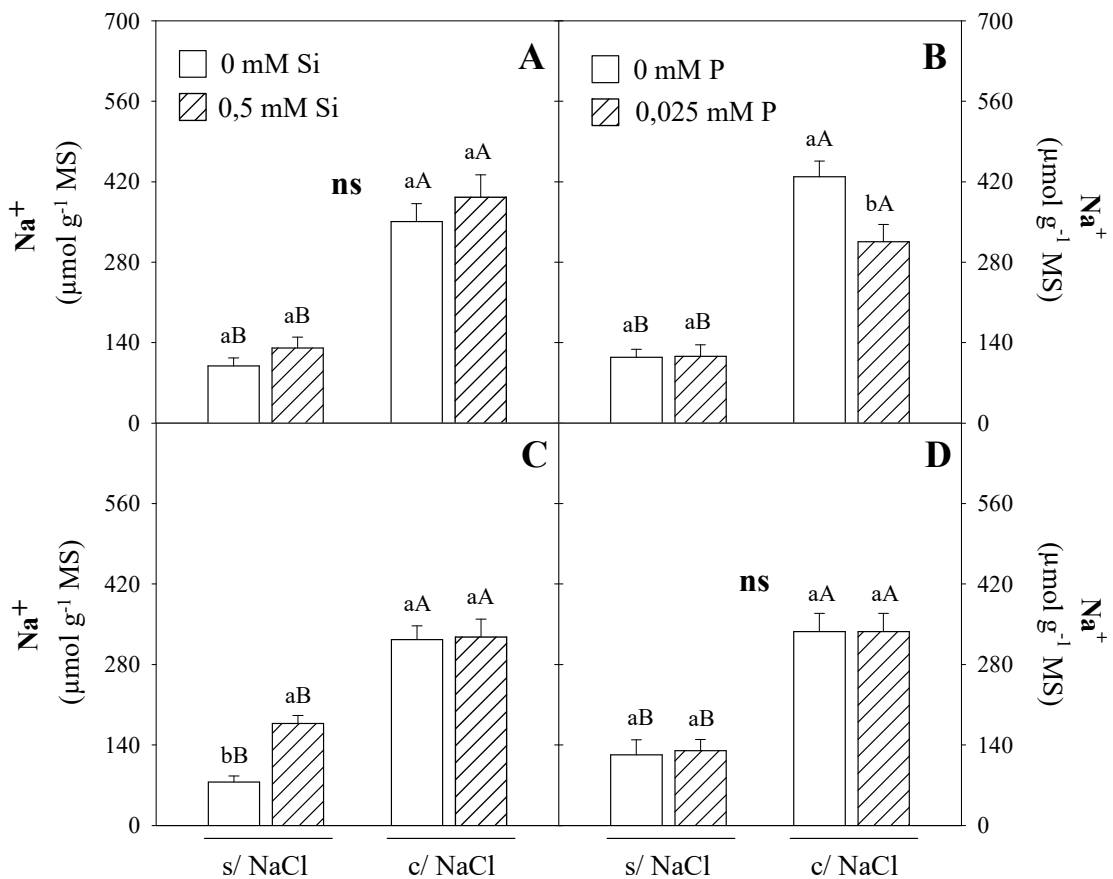
Fonte de variação	G.L.	Quadrado médio					
		CSF 18				CSF 20	
		Na <sup>+</sup> (R)	K <sup>+</sup> (R)	Na <sup>+</sup> (PA)	K <sup>+</sup> (PA)	Na <sup>+</sup> (PA)	K <sup>+</sup> (PA)
S	1	4976668,69 <sup>**</sup>	27570,00 <sup>**</sup>	527206,23 <sup>**</sup>	461,89 <sup>ns</sup>	317769,94 <sup>**</sup>	11612,77 <sup>*</sup>
Si	1	99056,97 <sup>ns</sup>	1638,34 <sup>ns</sup>	10796,96 <sup>ns</sup>	1424,23 <sup>ns</sup>	22651,26 <sup>*</sup>	16660,35 <sup>**</sup>
P	1	396668,24 <sup>ns</sup>	265,96 <sup>ns</sup>	24847,37 <sup>*</sup>	9220,78 <sup>*</sup>	1879,12 <sup>ns</sup>	1743,990 <sup>ns</sup>
S x Si	1	40715,12 <sup>ns</sup>	46,48 <sup>ns</sup>	235,64 <sup>ns</sup>	5651,33 <sup>ns</sup>	19020,86 <sup>*</sup>	7408,62 <sup>ns</sup>
S x P	1	20400,03 <sup>ns</sup>	539,78 <sup>ns</sup>	26360,24 <sup>*</sup>	186,61 <sup>ns</sup>	522,13 <sup>ns</sup>	33,99 <sup>ns</sup>
Si x P	1	2834,05 <sup>ns</sup>	18,80 <sup>ns</sup>	319,96 <sup>ns</sup>	242,68 <sup>ns</sup>	641,87 <sup>ns</sup>	135,18 <sup>ns</sup>
S x Si x P	1	324084,97 <sup>ns</sup>	172,94 <sup>ns</sup>	6452,45 <sup>ns</sup>	907,12 <sup>ns</sup>	4145,22 <sup>ns</sup>	4575,97 <sup>ns</sup>
Resíduo	24	110289,40	746,88	4640,56	1349,81	4037,35	2001,97
CV (%)		40,01	32,08	27,86	32,50	28,11	34,73

(\*\*) = significativo ( $p < 0,01$ ); (\*) = significativo ( $p < 0,05$ ); (ns) = não significativo pelo teste F; CV = coeficiente de variação.

158%, respectivamente (resultados não apresentados). Semelhante ao observado nesta pesquisa, plântulas de girassol (ASHRAF; ZAFAR; ASHRAF, 2003), de sorgo (OLIVEIRA, 2010), de cajueiro anão precoce (MARQUES *et al.*, 2013) e de mamona (LOPES, 2013) apresentaram notáveis incrementos nos teores de  $\text{Na}^+$  na parte aérea, quando submetidas ao estresse salino.

No genótipo CSF 18, a adição de Si no meio de cultivo não alterou os teores de  $\text{Na}^+$  na parte aérea, tanto em condições controle como de estresse salino (Figura 14A). Por outro lado, o tratamento com P, também não causou nenhum efeito aos teores de  $\text{Na}^+$  em condições controle, porém, sob condições de estresse salino, esse nutriente promoveu a redução de 26% em relação ao tratamento sem adição de P (Figura 13B). Essa redução nos teores de  $\text{Na}^+$  causado pelo P, pode ter sido responsável pelo aumento no CPA proporcionado por esse nutriente (Figura 11B).

**Figura 17.** Teores de sódio ( $\text{Na}^+$ ) na parte aérea de plântulas de sorgo, genótipos CSF 18 (A e B) e CSF 20 (C e D), aos 10 dias após a semeadura, cultivadas na ausência ou presença de NaCl e em ausência ou presença de Si (A e C) ou P (B e D). Colunas seguidas por letras minúsculas iguais, em um mesmo nível de NaCl, ou por letras maiúsculas iguais, em um mesmo nível de Si ou P, não diferem significativamente entre si ( $p > 0,05$ ). As barras verticais representam o erro padrão da média e ns representa desdobramentos não significativos.



De modo contrário, no genótipo CSF 20, os teores de  $\text{Na}^+$  na parte aérea não foram influenciados pela adição de P no meio de cultivo, tanto em ausência como em presença de NaCl a 100 mM (Figura 17D). Em contrapartida, foram influenciados pela adição de Si, onde se observou que em condições controle (ausência de NaCl), o teor médio de  $\text{Na}^+$  que foi de  $75,4 \mu\text{mol g}^{-1} \text{MS}$ , aumentou 135%, em função da presença desse nutriente, e não teve influência em condição de estresse (Figura 17A). Diferentemente do observado neste trabalho, Hashemi, Abdozadeh e Sadeghipour (2010) observaram efeito positivo do Si na redução da concentração de  $\text{Na}^+$  nos tecidos de canola sob estresse salino. De acordo com esses autores, o acúmulo de Si na endoderme e paredes celulares pode reduzir a acumulação de  $\text{Na}^+$ , tanto nas raízes como na parte aérea das plantas, por diminuir seu transporte via apoplasto.

Paralelamente ao aumento de  $\text{Na}^+$ , observou-se redução de 28% nos teores de  $\text{K}^+$  na parte aérea de plântulas de sorgo do genótipo CSFS 20, em resposta à salinidade (resultados não apresentados). No genótipo CSF 18, no entanto, os teores de  $\text{K}^+$  não foram influenciados pela adição de NaCl na solução de cultivo. Miranda *et al.* (2002), trabalhando com moringa (*Moringa oleifera*), também verificaram redução nos teores de  $\text{K}^+$  em função da aplicação de NaCl. Da mesma forma, Abreu (2012) também observaram reduções no acúmulo de  $\text{K}^+$  na cultura do feijão de corda (*Vigna unguiculata* L.).

Também se pode observar, que os teores de  $\text{K}^+$  na parte aérea foram influenciados pelo P, no genótipo CSF 18 e, pelo Si no genótipo CSF 20. Considerando a média dos teores de  $\text{K}^+$  nos dois níveis de Si e NaCl, que foi de  $130 \mu\text{mol g}^{-1} \text{MS}$ , o P reduziu esse valor em 26% (resultados não apresentados). Contrariamente, a adição de Si no meio de cultivo promoveu absorção de  $\text{K}^+$ , verificando aumento de 43% no teor desse íon, que foi de  $106,0 \mu\text{mol g}^{-1} \text{MS}$ .

### **4. 3 Solutos orgânicos e proteínas solúveis**

#### **4.3.1 Aos 4 DAS**

##### *4.3.1.1 Carboidratos solúveis*

Aos 4 DAS, verificou-se através da análise de variância, que os teores de carboidratos solúveis nas raízes das plântulas de sorgo, genótipo CSF 18, foram influenciados significativamente somente pelo fator salinidade (NaCl), embora tenha havido interação significativa entre os fatores Si e P (Tabela 5). Por outro lado, no genótipo CSF 20, apesar dos

teores desse soluto nas raízes não terem sido influenciados pela salinidade, se pode observar interação entre salinidade, Si e P.

**Tabela 5** – Resumo da análise de variância dos valores médios dos teores de carboidratos solúveis (CS) das raízes (R) e da parte aérea (PA) de plântulas de sorgo, dos genótipos CSF 18 e CSF 20, aos 4 dias após a semeadura, cultivadas sob condições de estresse salino (S) e em presença de silício (Si) e/ou fósforo (P).

Fonte de variação	G.L.	Quadrado médio			
		CSF 18		CSF 20	
		CS (R)	CS (PA)	CS (R)	CS (PA)
S	1	271675,32 <sup>**</sup>	307321,28 <sup>**</sup>	12102,26 <sup>ns</sup>	19951,54 <sup>ns</sup>
Si	1	4711,43 <sup>ns</sup>	29843,60 <sup>**</sup>	14115,46 <sup>ns</sup>	193860,55 <sup>**</sup>
P	1	8055,24 <sup>ns</sup>	33371,46 <sup>**</sup>	158783,85 <sup>**</sup>	40450,21 <sup>*</sup>
S x Si	1	6224,32 <sup>ns</sup>	45423,94 <sup>**</sup>	28465,58 <sup>**</sup>	12703,77 <sup>ns</sup>
S x P	1	2525,48 <sup>ns</sup>	27522,04 <sup>*</sup>	40287,44 <sup>**</sup>	19216,33 <sup>ns</sup>
Si x P	1	36453,56 <sup>**</sup>	208594,15 <sup>**</sup>	12291,81 <sup>ns</sup>	97500,76 <sup>**</sup>
S x Si x P	1	6475,79 <sup>ns</sup>	21229,23 <sup>*</sup>	61805,07 <sup>**</sup>	117371,00 <sup>**</sup>
Resíduo	24	2202,51	3569,35	3389,58	7069,29
CV (%)		7,30	4,21	9,15	5,70

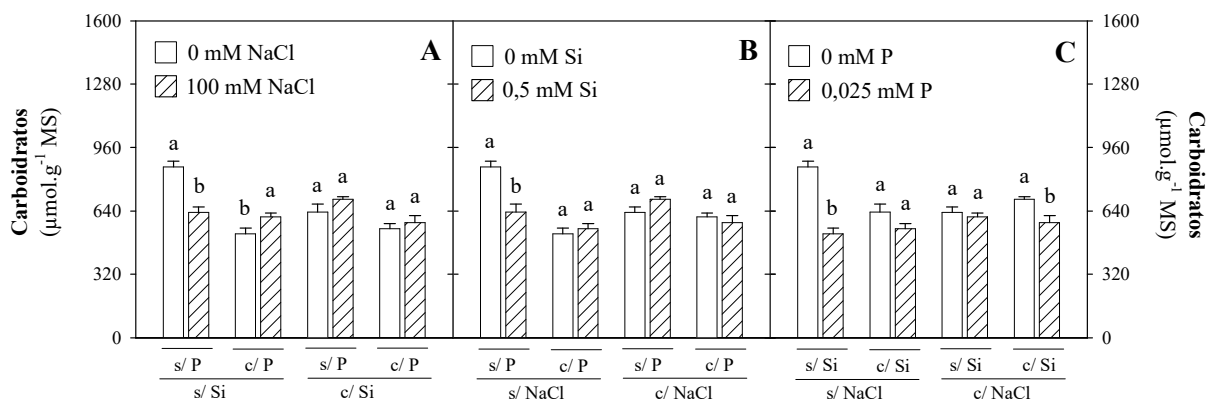
(\*\*) = significativo ( $p < 0,01$ ); (\*) = significativo ( $p < 0,05$ ); (ns) = não significativo pelo teste F; CV = coeficiente de variação.

Nas raízes das plântulas controle do genótipo CSF 18, o teor médio de carboidratos solúveis foi de 735,4  $\mu\text{mol g}^{-1}$  MS, sendo reduzido pela salinidade, observando-se decréscimo de 13% (resultado não apresentado). No genótipo CSF 20, como pode ser observado na figura 18A, o teor desse soluto orgânico foi reduzido em 28%, em resposta ao estresse salino, na ausência de Si e P, entretanto aumentaram na presença de P. Tais resultados divergem daqueles encontrados por Freitas (2010), que verificou que os teores de carboidratos aumentaram em resposta à salinidade, sendo eles os principais solutos orgânicos responsáveis pelo ajustamento osmótico nas folhas de plantas jovens de sorgo. Cunha *et al.* (2013) também observaram que a salinidade aumentou em 78% os teores de carboidratos em folhas de pinhão manso sob estresse salino, quando comparado ao controle. No entanto, Oliveira *et al.* (2012) verificaram que os níveis de salinidade da água de irrigação não influenciaram o acúmulo de carboidratos solúveis em mamona BRS Rubi.



Em condição controle, a adição isolada de Si (Figura 18B) ou de P (Figura 18C), reduziu os teores de carboidratos solúveis nas raízes das plântulas do genótipo CSF 20. Já em condição de estresse salino, a adição de P também promoveu redução nos teores desses solutos, contudo somente em presença de Si (Figura 18C).

**Figura 18.** Análise dos desdobramentos de NaCl, dentro de cada nível de Si e P (A); de Si dentro de cada nível de NaCl e P (B); e de P, dentro de cada nível de NaCl e Si (C), para os teores de carboidratos solúveis nas raízes de plântulas de sorgo, genótipo CSF 20, aos 4 dias após a semeadura, cultivadas na ausência ou presença de NaCl, Si ou P. Colunas seguidas por letras iguais não diferem significativamente entre si, dentro de cada tratamento ( $p > 0,05$ ). As barras verticais representam o erro padrão da média.

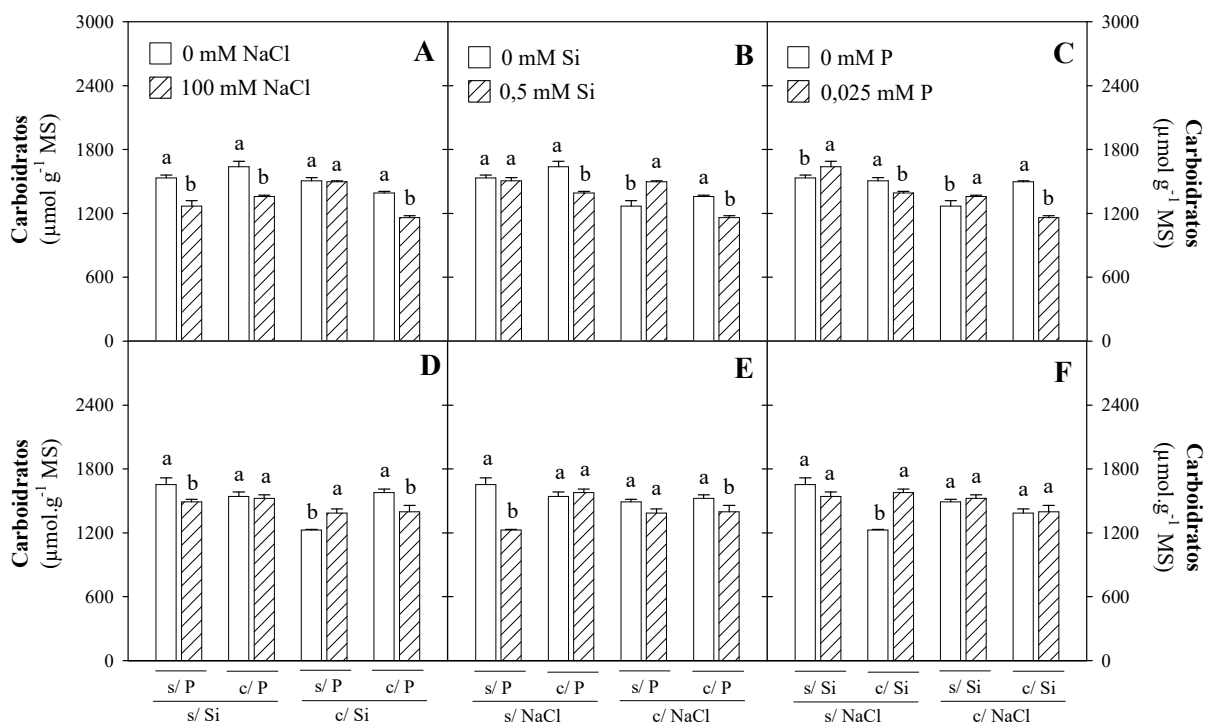


Na parte aérea de ambos os genótipos, os teores de carboidratos solúveis apresentaram interação significativa entre os fatores salinidade  $\times$  Si  $\times$  P (Tabela 5). Da mesma forma que observado nas raízes, os teores de carboidratos solúveis diminuíram na parte aérea de plântulas sob estresse salino (NaCl a 100 mM), quando em ausência de Si e de P, bem como na presença desses nutrientes (Figura 19A, D). Redução no teor desse soluto orgânico em função do estresse salino, também foi observado na presença de P, porém, fato esse que ocorreu apenas no genótipo CSF 18 (Figura 19A). A redução nos teores de carboidratos em sementes e plântulas submetidas à salinidade também pode ser constatada em várias espécies cultivadas, tais como feijão comum, feijão de corda (BUCKERIDGE *et al.*, 2004), trigo (SILVA *et al.*, 2008), e sorgo (VIDAL, 2012). Contudo, no genótipo CSF 20, verificou-se que a adição de NaCl na solução de cultivo em presença de Si e ausência de P, promoveu acréscimo de 13% nos teores de carboidratos solúveis na parte aérea (Figura 19A).

Analisando-se o efeito do Si na parte aérea das plântulas de sorgo, frente aos outros dois fatores, observou-se que, no genótipo CSF 18, independentemente da presença de NaCl no meio de cultivo, os teores de carboidratos solúveis foram reduzidos na presença de P (Figura

19B). De modo contrário, o Si promoveu acréscimo nos teores desse soluto orgânico sob condições de estresse salino e na ausência de P, e não teve efeito sob condição controle (Figura 19B). No genótipo CSF 20, em plântulas controle, a adição de Si no meio de cultivo reduziu os teores de carboidratos solúveis em ausência de P, já em plântulas estressadas, o Si também reduziu os teores, contudo apenas na presença de P (Figura 19E). Portanto, esses resultados mostram que o Si isoladamente aumenta os teores de carboidratos somente sob condições salinas. Resultado semelhante foi observado por Vidal (2012) que verificou que a aplicação de silício promoveu acréscimo significativo no teor de carboidratos solúveis em plântulas de sorgo dos genótipos BRS 304 e BRS 800, quando em condição de estresse salino.

**Figura 19.** Análise dos desdobramentos de NaCl, dentro de cada nível de Si e P (A e D); de Si, dentro de cada nível de NaCl e P (B e E); e de P, dentro de cada nível de NaCl e Si (C e F), para os teores de carboidratos solúveis na parte aérea de plântulas de sorgo, genótipos CSF 18 (A, B e C) e CSF 20 (D, E e F), aos 4 dias após a semeadura, cultivadas na ausência ou presença de NaCl, Si ou P. Colunas seguidas por letras iguais não diferem significativamente entre si, dentro de cada tratamento ( $p > 0,05$ ). As barras verticais representam o erro padrão da média.



Semelhantemente ao verificado com o Si, a adição de P no meio cultivo contendo Si, também reduziu os teores de carboidratos solúveis na parte aérea do genótipo CSF 18, tanto na presença como na ausência de NaCl (Figura 19C). Contudo, a adição isolada de P contribuiu para aumentar os teores desse soluto, porém isso independeu da presença de NaCl (Figura 19C). Já no genótipo CSF 20, plântulas controle tiveram os teores de carboidratos solúveis elevados

pelo P em presença de Si, porém sob estresse salino os teores na parte aérea permaneceram inalterados (Figura 19F).

#### 4.3.1.2 N-aminossolúveis

Os teores de N-aminossolúveis nas raízes, de acordo com os resultados da análise de variância, foram influenciados significativamente pelos três fatores estudados (salinidade, Si e P) no genótipo CSF 20, e apenas pelo Si no genótipo CSF 18 (Tabela 6). Também se pode observar que, em ambos os genótipos, foram significativas as interações entre os fatores salinidade  $\times$  Si, salinidade  $\times$  P e Si  $\times$  P, e apenas no genótipo CSF 18 houve interação tripla, entre salinidade  $\times$  Si  $\times$  P (Tabela 6).

**Tabela 6** – Resumo da análise de variância dos valores médios dos teores de N-aminossolúveis (N-A) das raízes (R) e da parte aérea (PA) de plântulas de sorgo, dos genótipos CSF 18 e CSF 20, aos 4 dias após a semeadura, cultivadas sob condições de estresse salino (S) e em presença de silício (Si) e/ou fósforo (P).

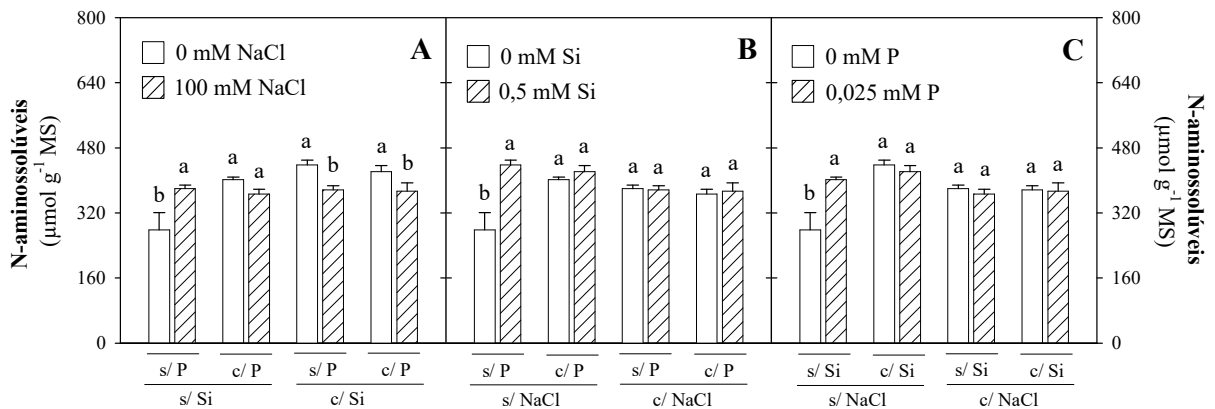
Fonte de variação	G.L.	Quadrado médio			
		CSF 18		CSF 20	
		N-A (R)	N-A (PA)	N-A (R)	N-A (PA)
S	1	931,56 <sup>ns</sup>	1751,04 <sup>**</sup>	23058,24 <sup>**</sup>	17477,72 <sup>**</sup>
Si	1	16562,64 <sup>**</sup>	7043,92 <sup>**</sup>	11228,43 <sup>**</sup>	390,28 <sup>ns</sup>
P	1	4081,64 <sup>ns</sup>	2741,68 <sup>**</sup>	19498,47 <sup>**</sup>	157,33 <sup>ns</sup>
S x Si	1	15496,91 <sup>**</sup>	21,96 <sup>ns</sup>	12059,10 <sup>**</sup>	567,87 <sup>ns</sup>
S x P	1	7561,30 <sup>*</sup>	1889,64 <sup>**</sup>	4955,54 <sup>**</sup>	2136,00 <sup>**</sup>
Si x P	1	8379,66 <sup>*</sup>	1078,66 <sup>*</sup>	6186,30 <sup>**</sup>	80,36 <sup>ns</sup>
S x Si x P	1	11383,37 <sup>**</sup>	6499,22 <sup>**</sup>	220,52 <sup>ns</sup>	2736,17 <sup>**</sup>
Resíduo	24	1449,16	150,98	346,75	178,46
CV (%)		10,03	5,20	6,04	8,50

(\*\*) = significativo ( $p < 0,01$ ); (\*) = significativo ( $p < 0,05$ ); (<sup>ns</sup>) = não significativo pelo teste F; CV = coeficiente de variação.

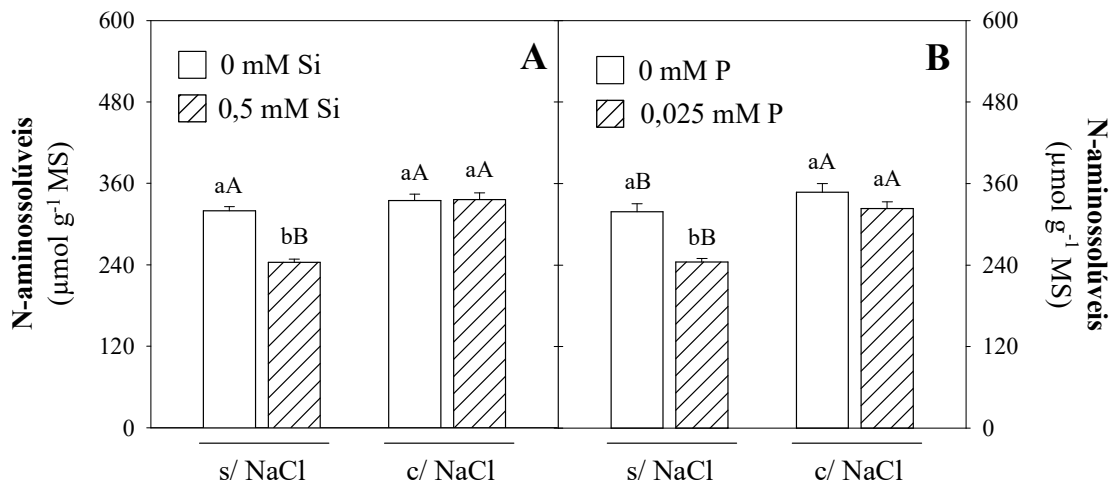
A salinidade, quando em ausência de Si e P, contribuiu para aumentar os teores de N-Aminossolúveis nas raízes do genótipo CSF 18, contudo, na presença de Si, independente da presença de P, os teores foram reduzidos (Figura 20A). Entretanto, no genótipo CSF 20, os teores de deste soluto aumentaram na presença de Si ou de P, em resposta a adição de NaCl no meio de cultivo (Figura 21).

Analisando a ação do Si e do P nos teores de N-aminossolúveis nas raízes de ambos os genótipos, verificou-se efeito significativo desses nutrientes apenas em condição controle (ausência de NaCl), no entanto, este efeito foi contraditório, pois enquanto que no genótipo CSF 18 os teores foram elevados em 57 e 44%, respectivamente, pela adição de Si e P no meio de cultivo (Figura 20B, C), no CSF 20 foram reduzidos em média 24% por cada um dos nutrientes (Figura 21A, B).

**Figura 20.** Análise dos desdobramentos de NaCl, dentro de cada nível de Si e P (A); de Si dentro de cada nível de NaCl e P (B); e de P, dentro de cada nível de NaCl e Si (C), para os teores de N-aminossolúveis nas raízes de plântulas de sorgo, genótipo CSF 18, aos 4 dias após a semeadura, cultivadas na ausência ou presença de NaCl, Si ou P. Colunas seguidas por letras iguais não diferem significativamente entre si, dentro de cada tratamento ( $p > 0,05$ ). As barras verticais representam o erro padrão da média.



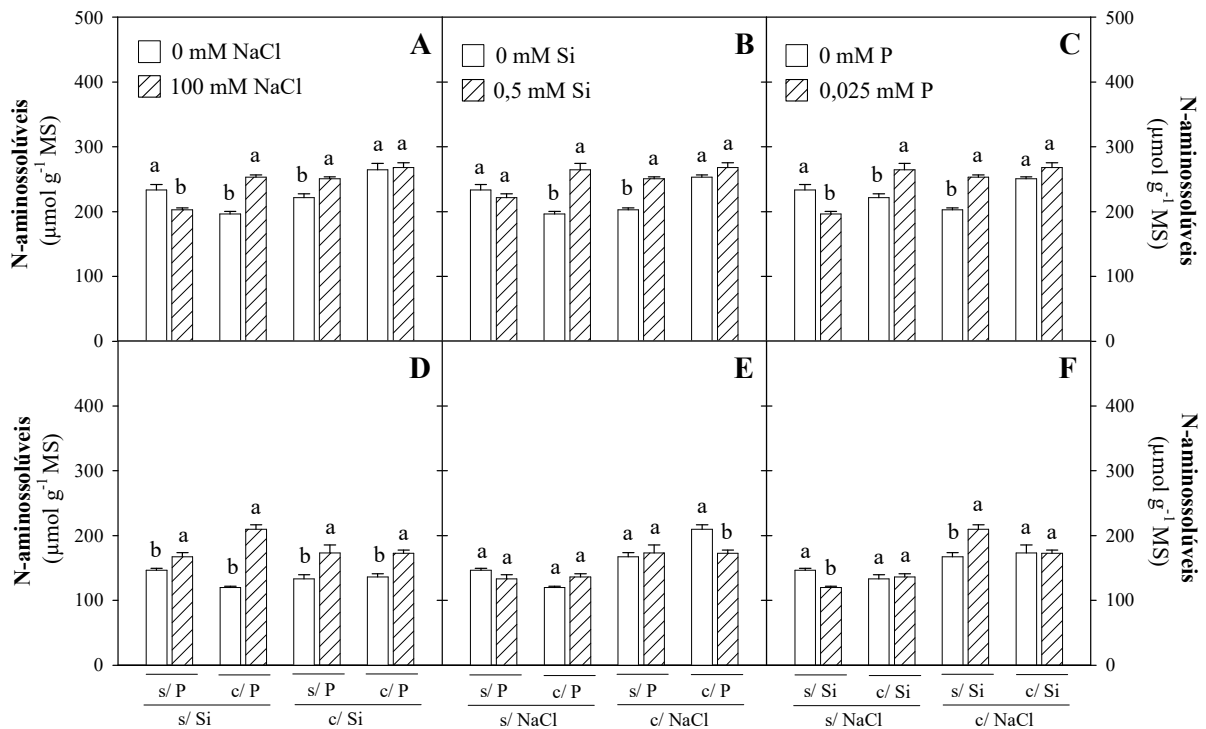
**Figura 21.** Teores de N-aminossolúveis nas raízes de plântulas de sorgo, genótipo CSF 20, aos 4 dias após a semeadura, cultivadas na ausência ou presença de NaCl e em ausência ou presença de Si (A) ou P (B). Colunas seguidas por letras minúsculas iguais, em um mesmo nível de NaCl, ou por letras maiúsculas iguais, em um mesmo nível de Si ou P, não diferem significativamente entre si ( $p > 0,05$ ). As barras verticais representam o erro padrão da média.



Os resultados na análise de variância mostraram que, os teores de N-aminossolúveis na parte aérea foram influenciados significativamente pela salinidade em ambos os genótipos, bem como foi significativa a interação entre os fatores salinidade  $\times$  Si  $\times$  P (Tabela 6).

Diferentemente do que foi observado nas raízes, o teor médio de N-aminossolúveis na parte aérea de plântulas controle do genótipo CSF 18, que foi de  $233,3 \mu\text{mol g}^{-1}$  MS, reduziu 13% em resposta ao estresse salino, quando na ausência de Si e de P, e de modo contrário, na presença de Si ou de P, os teores desse soluto foram elevados em 29 e 13%, respectivamente (Figura 22A). Por outro lado, no genótipo CSF 20, se pode verificar que a plântulas submetidas ao estresse salino apresentaram acréscimos nos teores de desse soluto orgânico, independentemente da presença de Si e/ou P (Figura 21D).

**Figura 22.** Análise dos desdobramentos de NaCl, dentro de cada nível de Si e P (A e D); de Si, dentro de cada nível de NaCl e P (B e E); e de P, dentro de cada nível de NaCl e Si (C e F), para os teores de N-aminossolúveis na parte aérea de plântulas de sorgo, genótipos CSF 18 (A, B e C) e CSF 20 (D, E e F), aos 4 dias após a semeadura, cultivadas na ausência ou presença de NaCl, Si ou P. Colunas seguidas por letras iguais não diferem significativamente entre si, dentro de cada tratamento ( $p > 0,05$ ). As barras verticais representam o erro padrão da média.



Aumentos nos teores de N-aminossolúveis têm sido observados por diversos autores em plantas expostas a estresse hídrico e/ou salino (KEMPA *et al.*, 2008; SANCHEZ *et al.*, 2008; USADEL *et al.*, 2008; LUGAN *et al.*, 2010). Embora o acúmulo de aminoácidos livres sob condições de estresse possa indicar dano celular, em algumas espécies (WIDODO *et*

*al.*, 2009), o aumento nos teores de alguns aminoácidos específicos pode ter um efeito benéfico durante o processo de aclimação ao estresse.

Ainda na parte aérea, em plântulas de sorgo do genótipo CSF 18, verificou-se que, o Si sob condições controle (ausência de NaCl), promoveu acréscimos nos teores de N-aminossolúveis, quando na ausência de P, entretanto, sob condições salinas, o Si também aumentou os teores deste soluto, porém apenas em ausência de P (Figura 22B). No genótipo CSF 20, diferentemente do observado no CSF 18, sob condições salinas, os teores de N-aminossolúveis foram reduzidos com a adição de Si no meio de cultivo contendo P, e não teve efeito sob condições controle (Figura 22E).

Analisando o efeito da adição do P no meio de cultivo, se pode observar que os teores de N-aminossolúveis, em ausência de Si, foram reduzidos em plântulas controle de ambos os genótipos, de modo contrário, em plântulas sob estresse salino, este nutriente elevou os teores desse soluto orgânico em ausência de Si (Figura 22C, F).

#### 4.3.1.3 Prolina livre

Os resultados da análise de variância mostraram que os teores de prolina livre nas raízes do genótipo CSF 18, foram influenciadas somente pelo fator salinidade, não havendo qualquer interação entre os fatores estudados (Tabela 7). Já no genótipo CSF 20, os teores de prolina foram afetados pelos três fatores estudados, e apresentou interações duplas (salinidade  $\times$  Si, salinidade  $\times$  P e Si  $\times$  P) e tripla (salinidade  $\times$  Si  $\times$  P) significativas.

Os teores médios de prolina livre nas raízes de plântulas controle do genótipo CSF 18 foi de 12,8  $\mu\text{mol g}^{-1}$  MS, e do CSF 20 foi de 11,3  $\mu\text{mol g}^{-1}$  MS (Figura 23A), e apresentaram acréscimos de 202 e 195% em resposta ao estresse salino, respectivamente (resultados não apresentados). Da mesma forma que observado neste estudo, Oliveira *et al.* (2006) avaliando diferentes genótipos de sorgo, detectaram incrementos nos teores de prolina em função da salinidade. O acúmulo de prolina em plantas sob estresse salino tem sido relatada também em outras culturas, como milho (HAJLAOUI *et al.*, 2010), morango (KEUTGEN; PAWELZIK, 2009), capim-marinho (LI; SHI; FUKUDA, 2010).

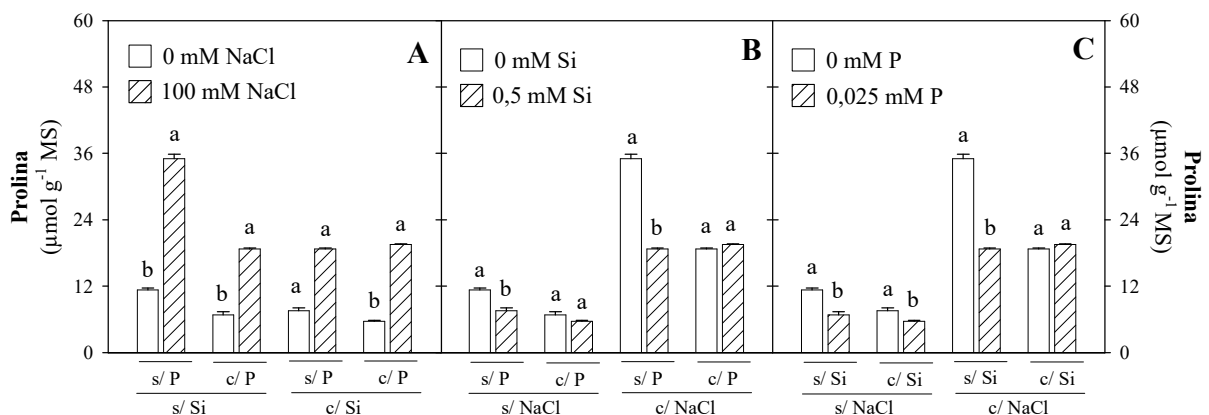
A adição isolada de Si ou P no meio de cultivo, promoveu reduções nos teores de prolina livre nas raízes de plântulas do genótipo CSF 20, independentemente da presença de NaCl, contudo, as maiores reduções foram observadas em condição de estresse salino, em média 46% (Figura 23B, C).

**Tabela 7** – Resumo da análise de variância dos valores médios dos teores de prolina livre (PL) das raízes (R) e da parte aérea (PA) de plântulas de sorgo, dos genótipos CSF 18 e CSF 20, aos 4 dias após a semeadura, cultivadas sob condições de estresse salino (S) e em presença de silício (Si) e/ou fósforo (P).

Fonte de variação	G.L.	Quadrado médio			
		CSF 18		CSF 20	
		PL (R)	PL (PA)	PL (R)	PL (PA)
S	1	5346,02**	2298,92**	1838,94**	561,66**
Si	1	0,23 <sup>ns</sup>	8,84 <sup>ns</sup>	210,44**	233,82**
P	1	10,89 <sup>ns</sup>	127,08**	240,91**	326,92**
S x Si	1	0,03 <sup>ns</sup>	8,35 <sup>ns</sup>	56,42**	81,23**
S x P	1	7,85 <sup>ns</sup>	73,54**	42,00**	7,472 <sup>ns</sup>
Si x P	1	0,01 <sup>ns</sup>	10,05 <sup>ns</sup>	194,10**	66,08**
S x Si x P	1	8,19 <sup>ns</sup>	12,92 <sup>ns</sup>	107,06**	26,19*
Resíduo	24	2,92	5,70	0,73	4,48
CV (%)		6,65	9,38	5,55	14,78

(\*\*) = significativo ( $p < 0,01$ ); (\*) = significativo ( $p < 0,05$ ); (<sup>ns</sup>) = não significativo pelo teste F; CV = coeficiente de variação.

**Figura 23.** Análise dos desdobramentos de NaCl, dentro de cada nível de Si e P (A); de Si dentro de cada nível de NaCl e P (B); e de P, dentro de cada nível de NaCl e Si (C), para os teores de prolina livre nas raízes de plântulas de sorgo, genótipo CSF 20, aos 4 dias após a semeadura, cultivadas na ausência ou presença de NaCl, Si ou P. Colunas seguidas por letras iguais não diferem significativamente entre si, dentro de cada tratamento ( $p > 0,05$ ). As barras verticais representam o erro padrão da média.



Na parte aérea, os teores de prolina livre foram influenciados pelos fatores salinidade e P em ambos os genótipos, e pelo fator Si apenas no CSF 20 (Tabela 7). Também

foram observadas interações significativas entre salinidade  $\times$  P no genótipo CSF 18 e, entre salinidade  $\times$  Si, Si  $\times$  P e salinidade  $\times$  Si  $\times$  P no genótipo CSF 20.

Semelhantemente ao observado nas raízes, os teores de prolina livre na parte aérea aumentaram em resposta a adição de NaCl no meio de cultivo, independentemente da presença de Si ou P (Figura 24A, B e 25A). A média dos teores de prolina nos dois níveis de Si e P que foram de  $17,0 \mu\text{mol g}^{-1}$  MS no genótipo CSF 18 e de  $10,1 \mu\text{mol g}^{-1}$  MS no CSF 20, aumentaram 100 e 83%, respectivamente, em resposta a salinidade. Convém salientar que, em ambos os genótipos, o maior acúmulo de prolina livre em resposta ao estresse salino foi observado nas raízes, órgão que teve seu crescimento promovido pela adição de NaCl no meio de cultivo (Figuras 1 a 3).

As plantas submetidas ao estresse salino acumulam prolina, entretanto, ainda não está claro até que ponto esse acúmulo contribui de fato para a tolerância ao estresse salino, ou se é um mero sintoma de distúrbio metabólico (WILLADINO; CAMARA, 2010). Muitas vezes, o acúmulo de prolina não é visto como uma resposta direta da planta ao estresse salino. O que se mostra é que, geralmente, o acúmulo ocorre após o surgimento dos sintomas de injúrias causados pelo estresse já ter sido estabelecido (ROCHA, 2003). Além disso, são relativamente baixas as concentrações de prolina, que não contribuem de forma significativa para a redução do potencial osmótico celular ou mesmo na proteção celular (SILVA *et al.*, 2009b). Em contrapartida, Szabados e Savouré (2010) afirmam que a prolina tem funcionado como uma chaperona molecular, capaz de proteger a integridade de proteínas e aumentar a atividade de enzimas responsáveis pela eliminação das espécies reativas de oxigênio.

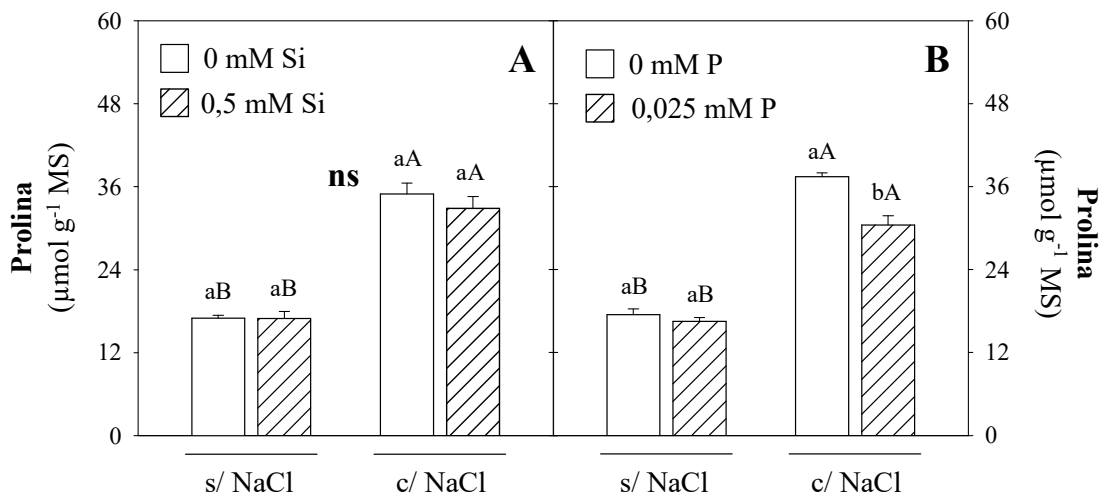
Analisando o efeito da adição do Si no meio de cultivo sobre o acúmulo de prolina livre na parte aérea, se pode observar que esse nutriente não teve qualquer efeito no genótipo CSF 18 (Figura 24A), no entanto, no genótipo CSF 20 reduziu o acúmulo, tanto em condição controle como de estresse salino, independentemente da presença de P (Figura 25B). Da mesma forma que observado nesse trabalho, Mauad (2006) observou que a adubação silicatada reduziu o teor de prolina no arroz, indicando que o silício provavelmente estaria reduzindo o nível de estresse, já que esse aminoácido tem sido considerado com um marcador bioquímico de estresse (HARE; CRESS, 1997).

Diversos são os autores que apontam o silício como agente anti estresses, quer seja na redução da transpiração cuticular (YOSHIDA; OHNISHI; KITAGISHI, 1959; Horiguchi, 1988; AGARIE *et al.*, 1998; MA; MIYAKE; TAKAHASHI, 2001) ou no aumento da eficiência do uso da água (GAO *et al.*, 2004). Assim, a nutrição silicatada pode ter diminuído a perda de água e, daí o teor de prolina ter se apresentado menor sob esta condição,

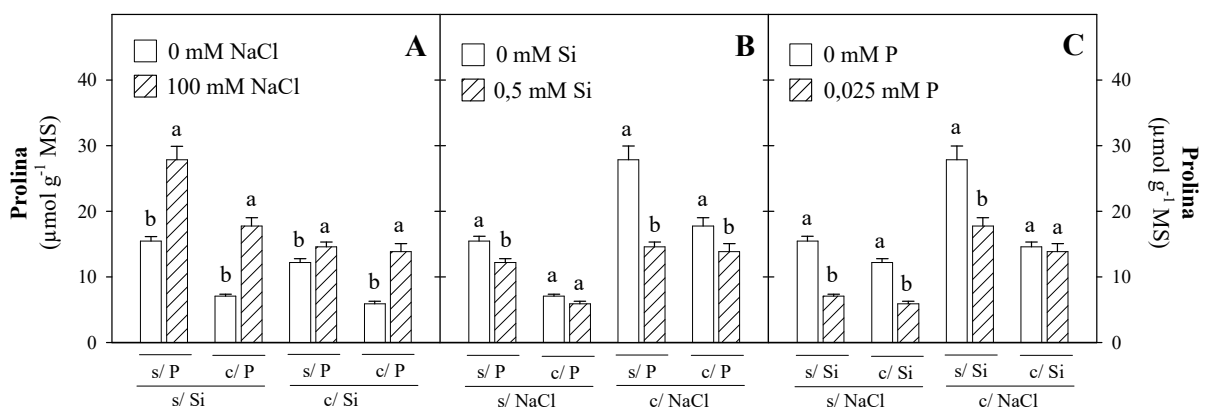


já que esse soluto é descrito como um regulador osmótico. Entretanto, de acordo com Pilon (2011), o silício favorece o aumento no teor de prolina, permitindo que as plantas sobrevivam a curtos períodos de estresse hídrico. Crusciol *et al.* (2009), verificaram aumento no teor de prolina em folhas de batata, com aplicação de Si via solo. Já Gunes *et al.* (2007b; 2008) verificaram que a aplicação de Si aumentou o teor de prolina nas folhas de plantas de grão de bico e de girassol submetidas a condições de deficiência hídrica.

**Figura 24.** Teores de prolina livre na parte aérea de plântulas de sorgo, genótipo CSF 18, aos 4 dias após a semeadura, cultivadas na ausência ou presença de NaCl e em ausência ou presença de Si (A) ou P (B). Colunas seguidas por letras minúsculas iguais, em um mesmo nível de NaCl, ou por letras maiúsculas iguais, em um mesmo nível de Si ou P, não diferem significativamente entre si ( $p > 0,05$ ). As barras verticais representam o erro padrão da média e ns representa desdobramentos não significativos.



**Figura 25.** Análise dos desdobramentos de NaCl, dentro de cada nível de Si e P (A); de Si dentro de cada nível de NaCl e P (B); e de P, dentro de cada nível de NaCl e Si (C), para os teores de prolina livre na parte aérea de plântulas de sorgo, genótipo CSF 20 (A, B e C), aos 4 dias após a semeadura, cultivadas na ausência ou presença de NaCl, Si ou P. Colunas seguidas por letras iguais não diferem significativamente entre si, dentro de cada tratamento ( $p > 0,05$ ). As barras verticais representam o erro padrão da média.



O P, assim como o Si, reduziu os teores de prolina livre na parte aérea de ambos os genótipos, porém no genótipo CSF 18, esse fato ocorreu apenas em condição de estresse salino (Figura 24B), e no genótipo CSF 20, independeu da presença de NaCl e Si no meio de cultivo (Figura 25C). Diferentemente do observado nesse trabalho, Al-Karaki, Clark e Sullivan (1996), observaram aumentos nos teores de prolina nas folhas de sorgo em função da suplementação das plantas com P em condições de estresse hídrico.

#### 4.3.1.4 Proteínas solúveis

Nas raízes, a análise de variância mostrou que os teores de proteínas solúveis foram afetados pelos três fatores estudados, com exceção do genótipo CSF 20, que não foi influenciado pelo fator salinidade (Tabela 8). Em ambos os genótipos, também se pode observar que ocorreu interação significativa entre salinidade  $\times$  Si  $\times$  P. Na parte aérea, diferentemente do observado nas raízes, os teores de proteína pouco foram influenciados pelos fatores estudados, verificando-se apenas influência do fator P no genótipo CSF 20, e da interação Si  $\times$  P no CSF 18.

**Tabela 8** – Resumo da análise de variância dos valores médios dos teores de proteínas solúveis (PS) das raízes (R) e da parte aérea (PA) de plântulas de sorgo, dos genótipos CSF 18 e CSF 20, aos 4 dias após a semeadura, cultivadas sob condições de estresse salino (S) e em presença de silício (Si) e/ou fósforo (P).

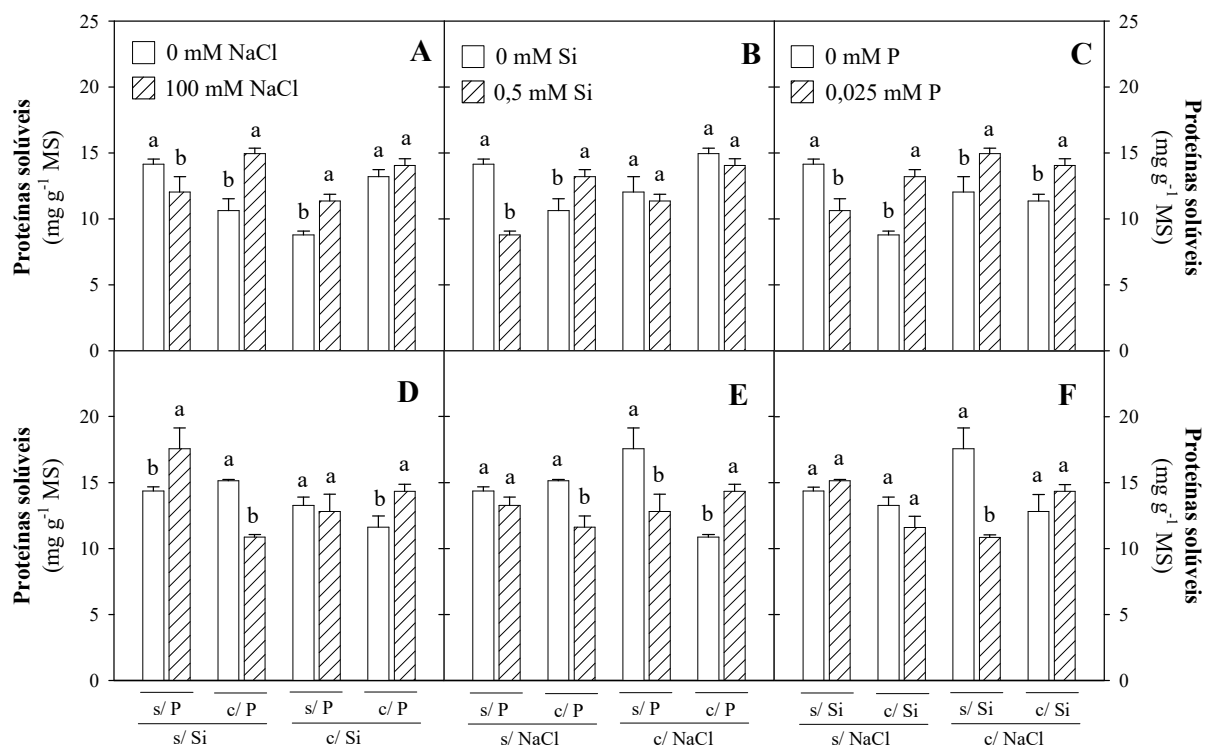
Fonte de variação	G.L.	Quadrado médio			
		CSF 18		CSF 20	
		PS (R)	PS (PA)	PS (R)	PS (PA)
S	1	15,82**	2,03 <sup>ns</sup>	0,71 <sup>ns</sup>	0,49 <sup>ns</sup>
Si	1	9,47*	0,35 <sup>ns</sup>	17,40*	1,68 <sup>ns</sup>
P	1	21,25**	0,28 <sup>ns</sup>	18,30*	5,19**
S x Si	1	0,78 <sup>ns</sup>	1,02 <sup>ns</sup>	5,54 <sup>ns</sup>	0,50 <sup>ns</sup>
S x P	1	11,11*	1,09 <sup>ns</sup>	9,19 <sup>ns</sup>	0,07 <sup>ns</sup>
Si x P	1	29,92**	3,81*	16,92*	3,5E-3 <sup>ns</sup>
S x Si x P	1	33,16**	0,05 <sup>ns</sup>	56,92**	0,10 <sup>ns</sup>
Resíduo	24	1,73	0,50	2,87	0,52
CV (%)		10,61	23,36	12,32	21,64

(\*\*) = significativo ( $p < 0,01$ ); (\*) = significativo ( $p < 0,05$ ); (<sup>ns</sup>) = não significativo pelo teste F; CV = coeficiente de variação.

Os genótipos avaliados nesse estudo, como observado nas figuras 26A e 26D, responderam de forma distinta a adição de NaCl no meio de cultivo. O teor de proteína solúvel na parte aérea das plântulas controle do genótipo CSF 18, que foi de  $14,0 \mu\text{mol g}^{-1}$  MS, reduziu 15% em resposta ao estresse salino, na ausência de Si e P, ao passo que, no genótipo CSF 20, o teor médio de proteína que foi de  $14,4 \mu\text{mol g}^{-1}$  MS, aumentou 22,5%. Já em presença de P ou Si, a adição de NaCl no meio de cultivo promoveu o acúmulo de proteínas solúveis na parte aérea do genótipo CSF 18 (Figura 26A), e na presença de ambos os nutrientes também foi observado acúmulo de proteínas, contudo apenas no genótipo CSF 20 (Figura 26D).

Embora seja frequente a diminuição no teor de proteínas solúveis em plantas submetidas à salinidade, em consequência da diminuição da síntese proteica e incremento da proteólise (PARIDA; DAS, 2005), deve-se salientar que pode ocorrer um aumento da síntese de uma ampla variedade de proteínas em resposta ao estresse salino. Essas proteínas podem atuar na estabilização das membranas celulares e na sinalização de respostas à salinidade (TESTER; DAVENPORT, 2003).

**Figura 26.** Análise dos desdobramentos de NaCl, dentro de cada nível de Si e P (A e D); de Si, dentro de cada nível de NaCl e P (B e E); e de P, dentro de cada nível de NaCl e Si (C e F), para os teores de proteínas solúveis nas raízes de plântulas de sorgo, genótipos CSF 18 (A, B e C) e CSF 20 (D, E e F), aos 4 dias após a semeadura, cultivadas na ausência ou presença de NaCl, Si ou P. Colunas seguidas por letras iguais não diferem significativamente entre si, dentro de cada tratamento ( $p > 0,05$ ). As barras verticais representam o erro padrão da média.



Quando se analisou a ação do Si frente aos fatores salinidade e P, os resultados mostraram que este nutriente não teve efeito sobre os teores de proteínas solúveis nas raízes das plântulas de sorgo do genótipo CSF 18, quando em condição de estresse salino, no entanto, em condições controle (ausência de NaCl), o Si reduziu em média 38% os teores de proteínas na ausência de P, e de modo contrário, aumentou em média 24% na presença de P (Figura 26B).

No genótipo CSF 20, contraditório ao observado no genótipo CSF 18, os teores de proteínas solúveis nas raízes de plântulas estressadas, foram influenciados pela adição de Si no meio de cultivo, sendo reduzidos em 27% na ausência de P, e aumentados em 32% na presença de P (Figura 26E). Em plântulas controle, o Si não teve efeito sobre os teores de proteína, quando na ausência de P, porém na presença de P, verificou-se redução de 23% nos teores.

Diferente do observado neste estudo, Ali *et al.* (2013) observaram que em plantas de girassol os teores de proteínas solúveis foram reduzidos pela salinidade, sendo significativamente aumentados na presença de silício. De acordo com Al-Aghabary, Zhu e Shi (2004), o Si atua como um indutor da síntese de proteínas, visto que a presença desse nutriente em plantas sob condições de estresse salino aumenta a síntese de mRNA e, conseqüentemente, há um maior incremento no teor de proteína. Para esses autores, o Si também reduz a degradação de proteínas, decorrentes da elevada concentração de NaCl.

Na análise do desdobramento do fator P, em relação às outras duas fontes de variação (salinidade e P), pode-se observar que no genótipo CSF 18, em condição controle (ausência de NaCl), P causou resposta similar ao Si; sua adição no meio de cultivo, portanto, promoveu decréscimo de 25% nos teores de proteínas solúveis na ausência de Si, e quando na presença de Si, promoveu aumento de 50% (Figura 26C). Já em condição de estresse salino, se pôde verificar aumentos nos teores de proteínas nas raízes em resposta a adição de P, independentemente da presença de Si. No genótipo CSF 20, como pode ser observado na figura 26D, os teores de proteínas solúveis nas raízes somente foram influenciados pela adição de P no meio de cultivo, quando em condição de estresse salino e na ausência de Si, promovendo redução de 37% nos teores.

### **4.3.2 Aos 10 DAS**

#### **4.3.2.1 Carboidratos solúveis**

De acordo com a análise de variância, os teores de carboidratos solúveis nas raízes das plântulas de sorgo de ambos os genótipos, foram influenciados tanto pela salinidade como

pelo silício, bem como houve interação significativa entre Si × P no genótipo CSF 18, e entre salinidade × P no genótipo CSF 20 (Tabela 9). Na parte aérea, da mesma forma que nas raízes, os teores desses solutos foram influenciados significativamente pelos fatores salinidade e Si em ambos os genótipos, e pelo fator P somente no genótipo CSF 20, porém não houve qualquer interação significativa entre os fatores estudados.

**Tabela 9** – Resumo da análise de variância dos valores médios dos teores de carboidratos solúveis (CS) nas raízes (R) e na parte aérea (PA) de plântulas de sorgo, dos genótipos CSF 18 e CSF 20, aos 10 dias após a semeadura, cultivadas sob condições de estresse salino (S) e em presença de silício (Si) e/ou fósforo (P).

Fonte de variação	G.L.	Quadrado médio			
		CSF 18		CSF 20	
		CS (R)	CS (PA)	CS (R)	CS (PA)
S	1	87973,68**	48817,52**	107096,73**	122077,35**
Si	1	5387,49**	27569,48**	17579,23**	35619,79**
P	1	1648,26 <sup>ns</sup>	40,54 <sup>ns</sup>	2,25 <sup>ns</sup>	20845,10*
S x Si	1	961,89 <sup>ns</sup>	3924,96 <sup>ns</sup>	628,43 <sup>ns</sup>	4310,30 <sup>ns</sup>
S x P	1	694,33 <sup>ns</sup>	6,54 <sup>ns</sup>	3129,92*	10655,84 <sup>ns</sup>
Si x P	1	10275,01**	1683,51 <sup>ns</sup>	1459,34 <sup>ns</sup>	6555,94 <sup>ns</sup>
S x Si x P	1	163,32 <sup>ns</sup>	2587,51 <sup>ns</sup>	1193,22 <sup>ns</sup>	4029,19 <sup>ns</sup>
Resíduo	24	416,81	2352,35	688,99	3420,51
CV (%)		7,62	8,76	9,64	9,39

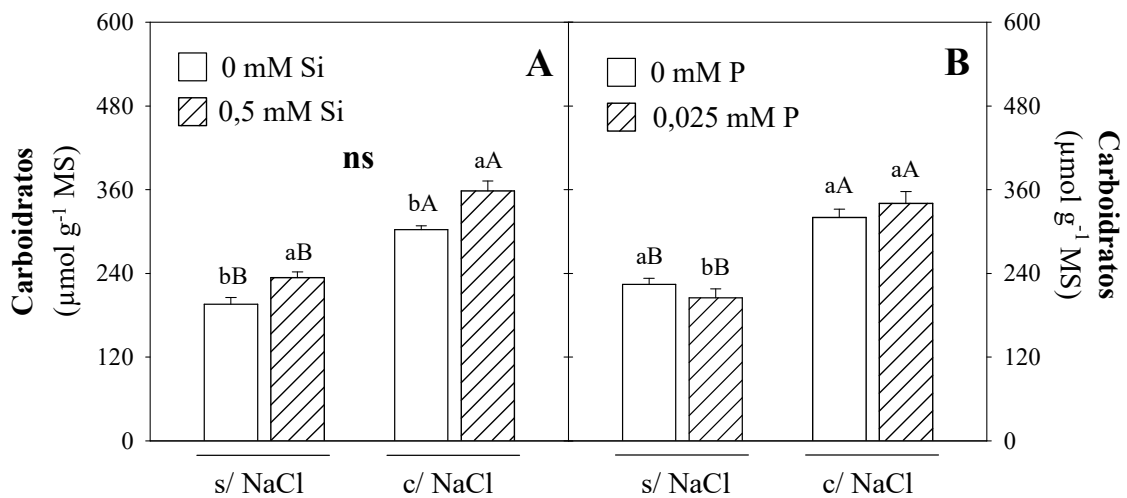
(\*\*) = significativo ( $p < 0,01$ ); (\*) = significativo ( $p < 0,05$ ); (<sup>ns</sup>) = não significativo pelo teste F; CV = coeficiente de variação.

Ao contrário do observado aos 4 DAS, acréscimos significativos nos teores de carboidratos solúveis foram reportados na parte aérea e raízes dos dois genótipos de sorgo, aos 10 DAS, em função da salinidade. O teor médio de carboidratos solúveis nas raízes de plântulas controle do genótipo CSF 18 que foi de 215,36  $\mu\text{mol g}^{-1}$  MS e do CSF 20 foi de 214,53  $\mu\text{mol g}^{-1}$  MS (Figura 27), apresentaram acréscimos de 49 e 54% em resposta ao estresse salino, respectivamente (resultados não apresentados). Convém salientar, conforme a figura 27, o aumento nos teores de carboidratos solúveis nas raízes de plântulas do genótipo CSF 20, ocorreu independentemente da presença de Si ou P no meio de cultivo.

Na parte aérea, considerando os teores de carboidratos solúveis nos dois níveis de Si e P, a salinidade elevou os teores desse soluto, que foram de 514,6  $\mu\text{mol g}^{-1}$  MS no genótipo

CSF 18 e de 561,0  $\mu\text{mol g}^{-1}$  MS no genótipo CSF 20, em 15 e 22%, respectivamente (resultados não apresentados).

**Figura 27.** Teores de carboidratos solúveis nas raízes de plântulas de sorgo, genótipo CSF 20, aos 10 dias após a semeadura, cultivadas na ausência ou presença de NaCl e em ausência ou presença de Si (A) ou P (B). Colunas seguidas por letras minúsculas iguais, em um mesmo nível de NaCl, ou por letras maiúsculas iguais, em um mesmo nível de Si ou P, não diferem significativamente entre si ( $p > 0,05$ ). As barras verticais representam o erro padrão da média e ns representa desdobramentos não significativos.



O maior acúmulo de carboidratos solúveis nas plantas tratadas com NaCl pode ter sido devido a uma menor utilização desses solutos no crescimento e no desenvolvimento, como sugerido por Lacerda *et al.* (2003). Em concordância com esses resultados, Oliveira *et al.* (2013) observaram aumentos nos teores de carboidratos solúveis em *Sorghum bicolor* submetido a níveis crescentes de salinidade. Albuquerque *et al.* (2013) também constataram aumento linear nos teores desses osmólitos nas folhas de feijão-de-corda, em resposta ao estresse salino.

Para Munns (2005), o maior acúmulo de solutos orgânicos nas plantas submetidas a estresses abióticos ocorre porque o suprimento de assimilados pelas folhas excede sua demanda pelos órgãos em crescimento. Em estudo com sorgo, Serraj e Sinclair (2002) relataram que, em condições salinas, o acúmulo de carboidratos solúveis foi devido à redução do uso desse composto durante o estresse. É possível que a afirmação de Munns (2005) aplique-se melhor aos resultados deste estudo, uma vez que não foram observadas correlações com os teores de carboidratos solúveis e a manutenção do crescimento de ambos os genótipos (Figuras 8 a 11).

Aumentos nos teores de carboidratos solúveis também foram observados em resposta a adição de Si no meio de cultivo. Em média, os teores desse soluto em plântulas

controle (ausência de Si) do genótipo CSF18, foram de 254,8  $\mu\text{mol g}^{-1}$  MS nas raízes e 524,1  $\mu\text{mol g}^{-1}$  MS na parte aérea, e aumentaram 10 e 11%, respectivamente (resultados não apresentados). Já genótipo CSF 20, os teores médios de carboidratos solúveis em plântulas controle, que foram de 248,9  $\mu\text{mol g}^{-1}$  MS nas raízes (Figura 27A) e 589,5  $\mu\text{mol g}^{-1}$  MS na parte aérea, aumentaram 11 e 18%, em resposta ao Si, respectivamente (resultados não apresentados).

Resultados semelhantes foram obtidos por Kafi *et al.* (2011), que, trabalhando com sorgo sob estresse salino, observaram que a aplicação de Si promoveu aumento nos teores de carboidratos solúveis na parte aérea das plantas. Sonobe *et al.* (2009) relataram que, em condições salinas, o Si induziu o acúmulo de carboidratos solúveis nas raízes de sorgo, reduzindo o potencial osmótico das células desse órgão e aumentando a absorção de água, por consequência.

Com relação ao efeito do P nos teores de carboidratos solúveis, este nutriente apenas teve efeito no genótipo CSF 20, promovendo decréscimo nos teores em condições controle (ausência de NaCl), e não teve qualquer efeito sob condições de estresse salino, como pode ser verificado na figura 27B.

#### 4.3.2.2 N-aminossolúveis

Aos 10 DAS, a salinidade teve efeito significativo nos teores de N-aminossolúveis, tanto nas raízes como na parte aérea das plântulas de sorgo de ambos os genótipos, com exceção na parte aérea do genótipo CSF 18, que não foi influenciado por esse fator (Tabela 10). Nas raízes, também se pode observar interação significativa entre os fatores salinidade x Si, bem como entre salinidade x Si x P no genótipo CSF 18, e entre salinidade x P no genótipo CSF 20. Na parte aérea, houve interação entre os fatores salinidade, Si e P no genótipo CSF 18, porém no genótipo CSF 20, não foi observado qualquer interação significativa entre os fatores estudados.

De modo geral, considerando a média dos teores de N-aminossolúveis nos dois níveis de Si e P, verificou-se que houve acréscimos significativos nos teores desse soluto nas raízes das plântulas controle dos dois genótipos de sorgo, em função da salinidade. No genótipo CSF 18, o teor médio que foi de 55,4  $\mu\text{mol g}^{-1}$  MS, aumentou 30,6%, no entanto, como pode ser observado na figura 28A, avaliando o efeito da salinidade em relação às outras duas fontes de variação, se pode verificar que estes aumentos não foram significativos quando em ausência de Si e P no meio de cultivo. Por outro lado, no genótipo CSF 20, o teor médio que foi de 42,9

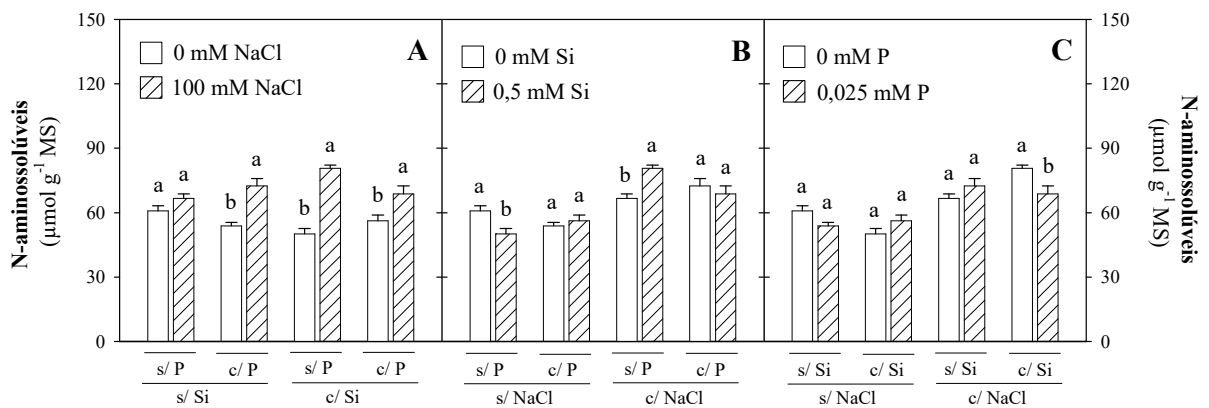
$\mu\text{mol g}^{-1}$  MS, apresentou acréscimo de 45%, em resposta a salinidade, independente da presença de Si ou P (Figura 29).

**Tabela 10** – Resumo da análise de variância dos valores médios dos teores de N-aminossolúveis (N-A) nas raízes (R) e na parte aérea (PA) de plântulas de sorgo, dos genótipos CSF 18 e CSF 20, aos 10 dias após a semeadura, cultivadas sob condições de estresse salino (S) e em presença de silício (Si) e/ou fósforo (P).

Fonte de variação	G.L.	Quadrado médio			
		CSF 18		CSF 20	
		N-A (R)	N-A (PA)	N-A (R)	N-A (PA)
S	1	2277,73 <sup>**</sup>	1018,65 <sup>ns</sup>	3084,59 <sup>**</sup>	2882,73 <sup>**</sup>
Si	1	1,90 <sup>ns</sup>	35,45 <sup>ns</sup>	59,18 <sup>ns</sup>	454,38 <sup>ns</sup>
P	1	23,78 <sup>ns</sup>	27,50 <sup>ns</sup>	155,52 <sup>*</sup>	208,07 <sup>ns</sup>
S x Si	1	173,31 <sup>*</sup>	649,20 <sup>ns</sup>	1,5E-3 <sup>ns</sup>	336,72 <sup>ns</sup>
S x P	1	12,22 <sup>ns</sup>	740,77 <sup>ns</sup>	410,83 <sup>**</sup>	300,47 <sup>ns</sup>
Si x P	1	10,89 <sup>ns</sup>	0,68 <sup>ns</sup>	22,74 <sup>ns</sup>	979,82 <sup>ns</sup>
S x Si x P	1	475,99 <sup>**</sup>	2529,01 <sup>*</sup>	0,70 <sup>ns</sup>	92,41 <sup>ns</sup>
Resíduo	24	25,83	345,26	34,94	261,87
CV (%)		7,98	9,44	11,21	13,86

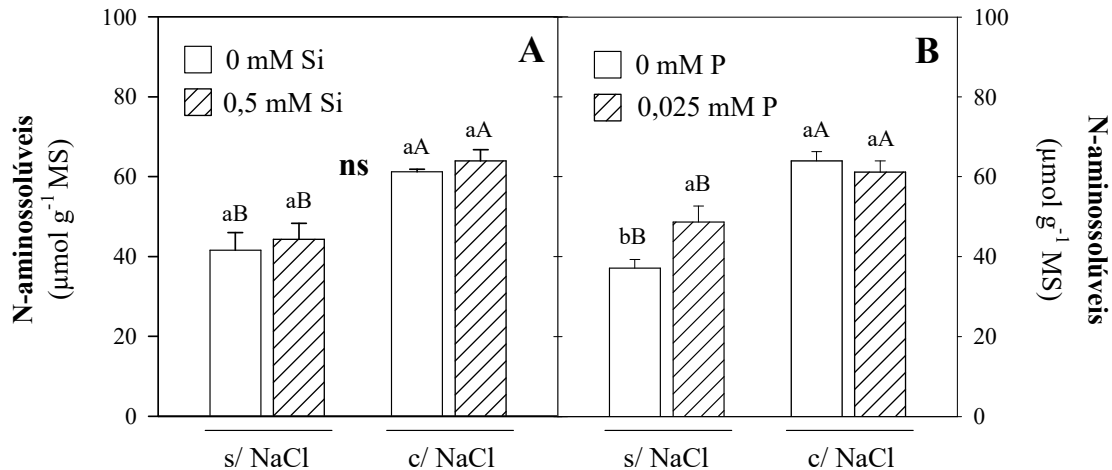
(\*\*) = significativo ( $p < 0,01$ ); (\*) = significativo ( $p < 0,05$ ); (<sup>ns</sup>) = não significativo pelo teste F; CV = coeficiente de variação.

**Figura 28.** Análise dos desdobramentos de NaCl, dentro de cada nível de Si e P (A); de Si dentro de cada nível de NaCl e P (B); e de P, dentro de cada nível de NaCl e Si (C), para os teores de N-aminossolúveis nas raízes de plântulas de sorgo, genótipo CSF 18 (A, B e C), aos 10 dias após a semeadura, cultivadas na ausência ou presença de NaCl, Si ou P. Colunas seguidas por letras iguais não diferem significativamente entre si, dentro de cada tratamento ( $p > 0,05$ ). As barras verticais representam o erro padrão da média.





**Figura 29.** Teores de N-aminossolúveis nas raízes de plântulas de sorgo, genótipo CSF 20, aos 10 dias após a semeadura, cultivadas na ausência ou presença de NaCl e em ausência ou presença de Si (A) ou P (B). Colunas seguidas por letras minúsculas iguais, em um mesmo nível de NaCl, ou por letras maiúsculas iguais, em um mesmo nível de Si ou P, não diferem significativamente entre si ( $p > 0,05$ ). As barras verticais representam o erro padrão da média e ns representa desdobramentos não significativos.



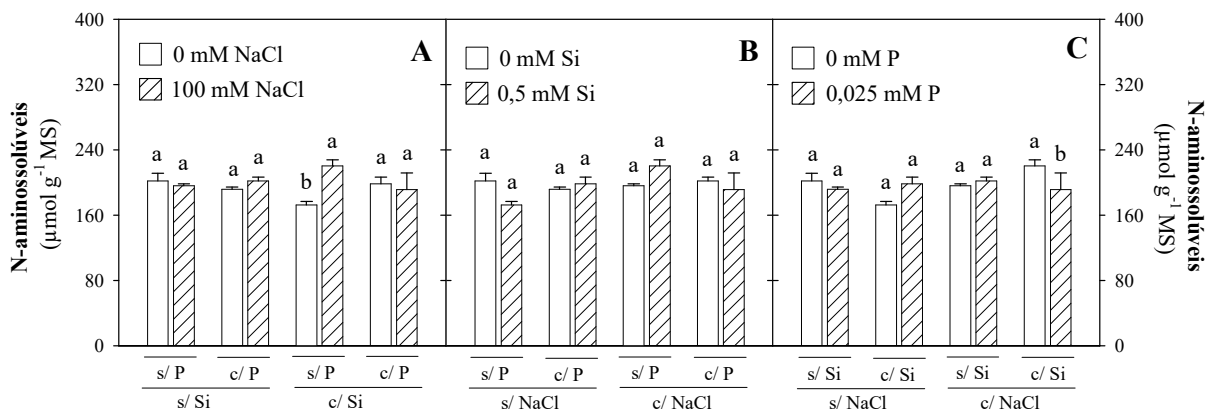
Feijão *et al.* (2011), em experimento realizado com sorgo sudão, observaram aumentos nos teores de N-aminossolúveis em ambos os órgãos estudados, em resposta ao estresse salino. O acúmulo de compostos contendo N-aminossolúveis é uma resposta frequente em plantas sob estresse salino (SINGH, 2006; SILVA *et al.*, 2009b), podendo funcionar como solutos compatíveis no ajustamento osmótico (LACERDA *et al.*, 2001; DLUZNIEWSKA *et al.*, 2007; PRISCO, GOMES-FILHO, 2010). Adicionalmente, outro papel dos N-aminossolúveis é funcionar como um dreno do excesso de nitrogênio acumulado pela redução no crescimento (KANT *et al.*, 2007).

Avaliando a ação do Si nos teores de N-aminossolúveis nas raízes, verificou-se que, no genótipo CSF 18, a adição isolada deste nutriente em condição controle (ausência de NaCl) promoveu redução de 18% nos teores desse soluto, e de modo contrário, em condição de estresse salino, aumentou os teores em 21%, porém com o P estando presente, o Si não alterou esses teores (Figura 28B). No genótipo CSF 20, independentemente da presença de NaCl no meio de cultivo, o Si não teve qualquer efeito sobre teores de N-aminossolúveis (Figura 29A).

Alterações nos teores de N-aminossolúveis nas raízes, em função da adição de P no meio de cultivo salino, foram observados apenas no genótipo CSF 18, e em presença de Si, sendo esses teores reduzidos em 15%, e não foram observados qualquer efeito desse nutriente em condição controle (Figura 28C). Por outro lado, no genótipo CSF 20, a presença de P na solução de cultivo, alterou os teores desse soluto apenas em plântulas controle, aumentando-os em 31% (Figura 29B).

Na parte aérea, assim como nas raízes, os teores de N-aminossolúveis elevaram-se nos dois genótipos, em resposta ao NaCl presente no meio de cultivo. No genótipo CSF 18, esse acréscimo nos teores desse soluto, foram observados apenas quando na presença de Si no meio de cultivo, não tendo o NaCl qualquer efeito sobre os demais tratamentos (Figura 30A). Já no genótipo CSF 20, considerando a média dos teores desse soluto nos dois níveis de Si e P, que foi de  $107,3 \mu\text{mol g}^{-1} \text{MS}$ , teve este valor aumentado em 18%, em resposta ao estresse salino (resultados não apresentados).

**Figura 30.** Análise dos desdobramentos de NaCl, dentro de cada nível de Si e P (A); de Si dentro de cada nível de NaCl e P (B); e de P, dentro de cada nível de NaCl e Si (C), para os teores de N-aminossolúveis na parte aérea de plântulas de sorgo, genótipo CSF 18 (A, B e C), aos 10 dias após a semeadura, cultivadas na ausência ou presença de NaCl, Si ou P. Colunas seguidas por letras iguais não diferem significativamente entre si, dentro de cada tratamento ( $p > 0,05$ ). As barras verticais representam o erro padrão da média.



Cabe salientar que o acúmulo de compostos contendo N-aminossolúveis pode funcionar como um dreno para o excesso de nitrogênio acumulado devido à redução no crescimento (KANT *et al.*, 2007), bem como pode funcionar como fonte de solutos compatíveis necessários para o ajustamento osmótico ou pode servir como fonte de carbono e nitrogênio (HANSON; HITS, 1982). Assim, de acordo com os resultados obtidos com as plântulas de sorgo de ambos os genótipos, aos 10 DAS, tais compostos tiveram provavelmente pouca importância no ajustamento osmótico das plântulas sob estresse salino, especialmente na parte aérea, visto que não foi observada qualquer concordância entre os teores de N-aminossolúveis e a manutenção do crescimento (Figuras 8 a 11).

No que diz respeito ao Si, conforme a figura 30B, nenhum efeito significativo desse nutriente foi observado nos teores de N-aminossolúveis na parte aérea do genótipo CSF 18. Convém salientar, que na parte aérea do genótipo CSF 20, como visto na tabela 10, esse nutriente também não teve efeito sobre os teores desse soluto. Com relação ao P, os teores de

N-aminossilúveis na parte aérea, somente foram alterados em plântulas do genótipo CSF 18, sendo observado redução de 11%, em condição de estresse salino e em presença de Si (Figura 30F).

#### 4.3.2.3 Prolina livre

A análise dos dados, mostrou que os teores de prolina livre nas raízes de plântulas de sorgo de ambos os genótipos, avaliadas aos 10 DAS, foram influenciados somente pelo fator salinidade (Tabela 11). Entretanto, foram observadas interações entre os fatores estudados; no genótipo CSF 18 ocorreu interação entre salinidade  $\times$  P, enquanto que no genótipo CSF 20, houve interações duplas (salinidade  $\times$  Si e Si  $\times$  P) e tripla (salinidade  $\times$  Si  $\times$  P) significativas.

**Tabela 11** – Resumo da análise de variância dos valores médios dos teores de prolina livre (PL) nas raízes (R) e na parte aérea (PA) de plântulas de sorgo, dos genótipos CSF 18 e CSF 20, aos 10 dias após a semeadura, cultivadas sob condições de estresse salino (S) e em presença de silício (Si) e/ou fósforo (P).

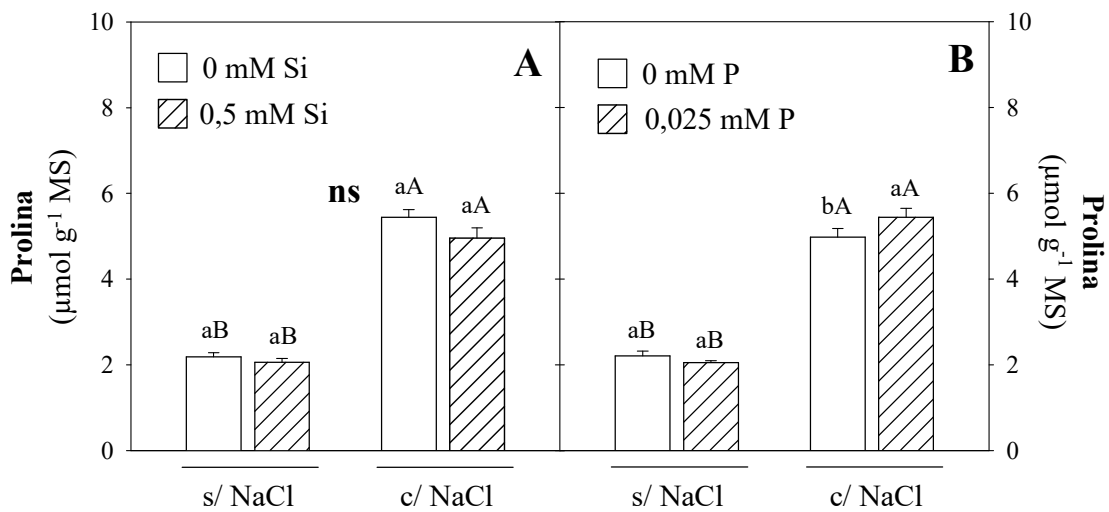
Fonte de variação	G.L.	Quadrado médio			
		CSF 18		CSF 20	
		PL (R)	PL (PA)	PL (R)	PL (PA)
S	1	75,73 <sup>**</sup>	328,22 <sup>**</sup>	12,45 <sup>**</sup>	89,66 <sup>**</sup>
Si	1	0,75 <sup>ns</sup>	108,48 <sup>**</sup>	0,03 <sup>ns</sup>	42,36 <sup>**</sup>
P	1	0,19 <sup>ns</sup>	0,23 <sup>ns</sup>	0,21 <sup>ns</sup>	37,91 <sup>**</sup>
S x Si	1	0,27 <sup>ns</sup>	52,21 <sup>**</sup>	5,04 <sup>**</sup>	16,45 <sup>**</sup>
S x P	1	0,78 <sup>*</sup>	1,87 <sup>ns</sup>	0,39 <sup>ns</sup>	46,23 <sup>**</sup>
Si x P	1	0,51 <sup>ns</sup>	0,30 <sup>ns</sup>	5,95 <sup>**</sup>	21,72 <sup>**</sup>
S x Si x P	1	0,05 <sup>ns</sup>	11,09 <sup>*</sup>	2,99 <sup>*</sup>	3,95 <sup>*</sup>
Resíduo	24	0,18	2,02	0,28	0,78
CV (%)		11,47	18,94	11,60	14,17

(\*\*) = significativo ( $p < 0,01$ ); (\*) = significativo ( $p < 0,05$ ); (ns) = não significativo pelo teste F; CV = coeficiente de variação.

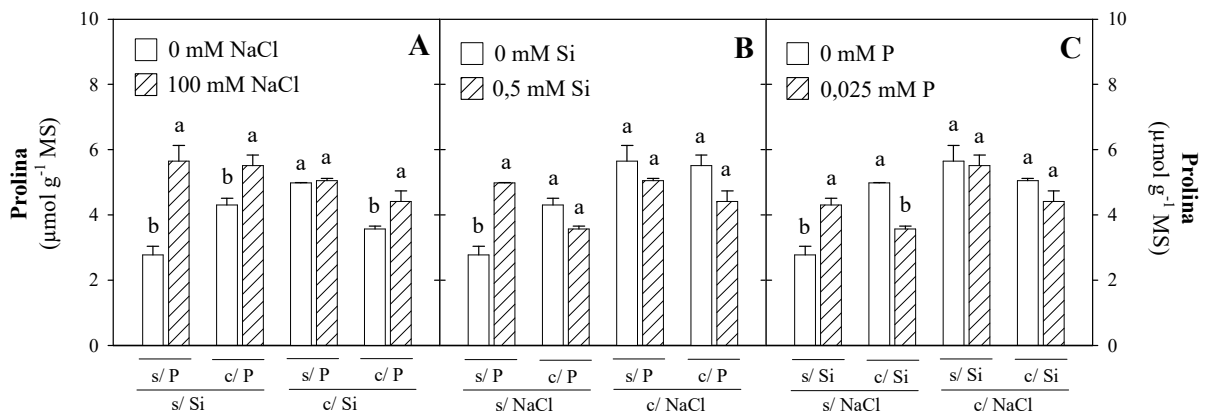
Em condição de estresse salino, verificou-se aumentos nos teores de prolina livre nas raízes de plântulas de ambos genótipos, independente da presença de Si e/ou P no meio de cultivo (Figura 31 e 32A). No entanto, como observado na figura 32A, esse aumento somente não foi significativo no genótipo CSF 20, quando na presença de Si. O teor médio de prolina

no genótipo CSF 18 foi de 2,13  $\mu\text{mol g}^{-1}$  MS e no genótipo CSF 20 foi de 3,90  $\mu\text{mol g}^{-1}$  MS, e apresentaram acréscimo de 144 e 32% em resposta a adição de NaCl no meio de cultivo (resultados não apresentados).

**Figura 31.** Teores de prolina livre nas raízes de plântulas de sorgo, genótipo CSF 18, aos 10 dias após a semeadura, cultivadas na ausência ou presença de NaCl e em ausência ou presença de Si (A) ou P (B). Colunas seguidas por letras minúsculas iguais, em um mesmo nível de NaCl, ou por letras maiúsculas iguais, em um mesmo nível de Si ou P, não diferem significativamente entre si ( $p > 0,05$ ). As barras verticais representam o erro padrão da média e ns representa desdobramentos não significativos.



**Figura 32.** Análise dos desdobramentos de NaCl, dentro de cada nível de Si e P (A); de Si dentro de cada nível de NaCl e P (B); e de P, dentro de cada nível de NaCl e Si (C), para os teores de prolina livre nas raízes de plântulas de sorgo, genótipo CSF 20 (A, B e C), aos 10 dias após a semeadura, cultivadas na ausência ou presença de NaCl, Si ou P. Colunas seguidas por letras iguais não diferem significativamente entre si, dentro de cada tratamento ( $p > 0,05$ ). As barras verticais representam o erro padrão da média.



Avaliando o efeito de Si no acúmulo de prolina livre, verificou-se que este nutriente não teve qualquer efeito nas raízes de plântulas do genótipo CSF18, no entanto, em sua

ausência, foram observados os maiores aumentos de prolina em resposta a adição de NaCl no meio de cultivo (Figura 31A). Já no genótipo CSF 20, o Si não promoveu qualquer alteração significativa nos teores de prolina nas raízes de plântulas sob condições de estresse salino, porém, em condição controle e em ausência de NaCl, verificou-se aumento de 80% nesses teores (Figura 32B).

Conforme a figura 31B, os teores de prolina livre nas raízes de plântulas de sorgo do genótipo CSF 18 apresentaram acréscimos, em resposta a adição de P no meio de cultivo contendo NaCl. De modo contrário, no genótipo CSF 20 os teores não foram afetados pelo P em condição de estresse salino, porém em condição controle, na ausência de Si os teores foram elevados, enquanto que na presença de Si, foram reduzidos (Figura 32C). Segundo Al-Karaki, Clark e Sullivan (1996), a suplementação com fósforo pode aumentar os teores de prolina livre nos tecidos, sendo um importante agente regulador do potencial osmótico celular.

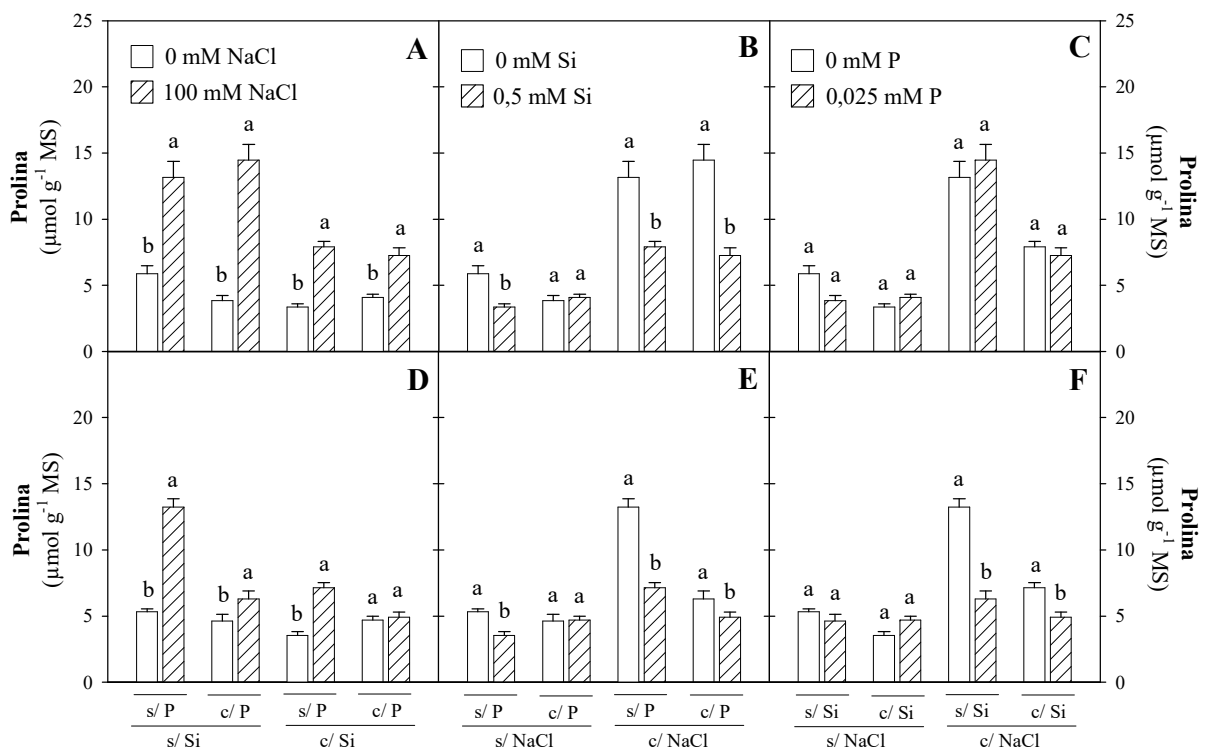
Em ambos os genótipos, conforme a análise de variância, os teores de prolina livre na parte aérea foram afetadas pela salinidade, como também foi significativa a interação tripla entre os fatores estudados (salinidade  $\times$  Si  $\times$  P) (Tabela 11).

Semelhantemente ao que foi observado nas raízes, a salinidade promoveu acúmulo de prolina livre na parte aérea de ambos genótipos, independente da presença de Si e/ou P no meio de cultivo, com exceção no genótipo CSF 20, na presença de Si e P a adição de NaCl no meio de cultivo não alterou significativamente os teores de prolina (Figura 33A, D). A média dos teores de prolina livre na parte aérea, que foram de  $4,29 \mu\text{mol g}^{-1}$  MS no genótipo CSF 18 e de  $5,16 \mu\text{mol g}^{-1}$  MS no genótipo CSF 20, elevaram-se 149 e 73,8% em função do estresse salino, respectivamente (resultados não apresentados). Portanto, com base nos resultados do efeito da salinidade nos teores de prolina livre, tanto nas raízes como na parte aérea, verificou-se que os maiores acréscimos nos teores ocorreram no genótipo CSF 18, justamente o genótipo que se apresentou menos tolerante ao estresse salino, aos 10 DAS.

De acordo com Azevedo Neto *et al.* (2004) e Lacerda *et al.* (2001), o acúmulo de prolina é uma resposta comum ao estresse salino. Variações nos níveis de prolina em diversas culturas, como banana (SILVA JÚNIOR *et al.*, 2012b), cunhã (MARTINS *et al.*, 2012) e algodão (MENESES *et al.*, 2006) têm sido correlacionadas com a habilidade para tolerar ou se adaptar às condições salinas e/ou deficiência hídrica. Todavia, o papel de promover a tolerância a esses estresses é discutível. Como comentado anteriormente, alguns pesquisadores consideram o acúmulo de prolina como uma mera consequência do estresse, muito mais do que uma resposta de tolerância (ASHRAF, 1989; ERRABII *et al.*, 2007). Outros, porém, não observaram qualquer aumento nos teores desse soluto em condições de estresse hídrico ou

salino (CHAVAN; KARADGE, 1986), fato que sugere que tal resposta depende da espécie e das condições ambientais empregadas. Assim sendo, pode-se considerar que neste trabalho, o maior acúmulo de prolina observado no genótipo CSF 18 não está relacionado com promoção de tolerância, mas sim, pode ser considerado apenas como uma consequência do estresse salino.

**Figura 33.** Análise dos desdobramentos de NaCl, dentro de cada nível de Si e P (A e D); de Si, dentro de cada nível de NaCl e P (B e E); e de P, dentro de cada nível de NaCl e Si (C e F), para os teores de prolina livre na parte aérea de plântulas de sorgo, genótipos CSF 18 (A, B e C) e CSF 20 (D, E e F), aos 10 dias após a semeadura, cultivadas na ausência ou presença de NaCl, Si ou P. Colunas seguidas por letras iguais não diferem significativamente entre si, dentro de cada tratamento ( $p > 0,05$ ). As barras verticais representam o erro padrão da média.



A adição de Si no meio de cultivo, reduziu significativamente os teores de prolina livre em plântulas de sorgo dos dois genótipos cultivados sob condições de estresse salino, independente da presença de P, porém em condição controle (ausência de NaCl), esse nutriente também reduziu os teores desse osmólito, mas apenas na ausência de P (Figura 33B, E). Do mesmo modo, Yin *et al.* (2013), em estudo com sorgo forrageiro, observaram acúmulo de prolina livre em plantas cultivadas sob condições de estresse salino e que a suplementação com silício reduziu significativamente seus teores. Mauad (2006) também observou que a adubação silicatada reduziu o teor de prolina em arroz submetido ao estresse hídrico, sugerindo que o silício provavelmente estaria atenuando o nível do estresse, já que, segundo Hare e Cress (1997), esse aminoácido tem sido considerado como marcador bioquímico de estresse. Gunes

*et al.* (2007a), por sua vez, verificaram que o fornecimento de Si proporcionou maior produção de matéria seca e teor de prolina em plantas de cevada expostas a excesso de sódio e boro no solo.

Por outro lado, analisando-se o efeito da adição do P no meio de cultivo no acúmulo de prolina livre, observou que, no genótipo CSF 18, esse nutriente não teve qualquer efeito sobre os teores deste osmólito, independentemente da presença de NaCl e Si (Figura 33C). Já no genótipo CSF 20, verificou-se que o P reduziu os teores de prolina na parte aérea de plântulas cultivadas em meio salino, sendo as maiores reduções observadas na ausência de Si (Figura 33F). Portanto, baseado nesse resultado, o P poderia estar atenuando os danos causados pelo estresse no genótipo CSF 20, visto que, conforme observado na figura 11D, a adição de P no meio de cultivo minimizou o efeito negativo do NaCl sobre o CPA.

#### 4.3.2.4 Proteínas solúveis

Os resultados da análise de variância mostraram que os teores de proteína solúveis, tanto nas raízes como na parte aérea dos dois genótipos, foram afetados significativamente pela salinidade, com exceção da parte aérea do genótipo CSF 20 (Tabela 8). Também se pode verificar que foram significativas as interações duplas (salinidade  $\times$  P e Si  $\times$  P) no genótipo CSF 18, e tripla (salinidade  $\times$  Si  $\times$  P) no genótipo CSF 20, contudo as interações somente ocorreram na parte aérea.

Nas raízes, embora não tenha ocorrido qualquer interação significativa entre os fatores estudados, os teores de proteínas solúveis foram aumentados pela salinidade, pois em condição controle (ausência de NaCl) os teores médios foram de 8,8 mg g<sup>-1</sup> MS no genótipo CSF 18 e de 8,6 mg g<sup>-1</sup> MS no genótipo CSF 20, em condições salinas eles foram 15 e 16% maiores, respectivamente (resultados não apresentados).

Diferentemente do observado nas raízes, considerando a média do teor de proteína solúveis na parte aérea, que foi de 6,6 mg g<sup>-1</sup> MS no genótipo CSF 18, reduziu 15%, em resposta a salinidade (resultados não apresentados). Entretanto, avaliando o efeito da salinidade em relação às outras duas fontes de variação, se pode verificar que esta redução somente foi significativa quando em presença de Si e na ausência de P (Figura 34A, B). No genótipo CSF 20, como mencionado anteriormente, e de acordo com a figura 35A, os teores de proteína na parte aérea não apresentaram qualquer alteração em função da adição de NaCl no meio de cultivo.

**Tabela 12** – Resumo da análise de variância dos valores médios dos teores de proteínas solúveis (PS) nas raízes (R) e na parte aérea (PA) de plântulas de sorgo, dos genótipos CSF 18 e CSF 20, aos 10 dias após a semeadura, cultivadas sob condições de estresse salino (S) e em presença de silício (Si) e/ou fósforo (P).

Fonte de variação	G.L.	Quadrado médio			
		CSF 18		CSF 20	
		PS (R)	PS (PA)	PS (R)	PS (PA)
S	1	13,08 <sup>**</sup>	7,33 <sup>**</sup>	15,11 <sup>**</sup>	1,58 <sup>ns</sup>
Si	1	1,26 <sup>ns</sup>	3,10 <sup>ns</sup>	0,23 <sup>ns</sup>	0,21 <sup>ns</sup>
P	1	0,40 <sup>ns</sup>	0,31 <sup>ns</sup>	18,61 <sup>**</sup>	14,82 <sup>**</sup>
S x Si	1	3,25 <sup>ns</sup>	1,86 <sup>ns</sup>	1,84 <sup>ns</sup>	3,37 <sup>ns</sup>
S x P	1	2,13 <sup>ns</sup>	8,66 <sup>**</sup>	2,17 <sup>ns</sup>	2,70 <sup>ns</sup>
Si x P	1	0,83 <sup>ns</sup>	9,47 <sup>**</sup>	2,10 <sup>ns</sup>	1,65 <sup>ns</sup>
S x Si x P	1	0,38 <sup>ns</sup>	0,12 <sup>ns</sup>	0,19 <sup>ns</sup>	7,45 <sup>*</sup>
Resíduo	24	0,81	0,92	0,83	1,60
CV (%)		9,54	15,80	9,84	17,65

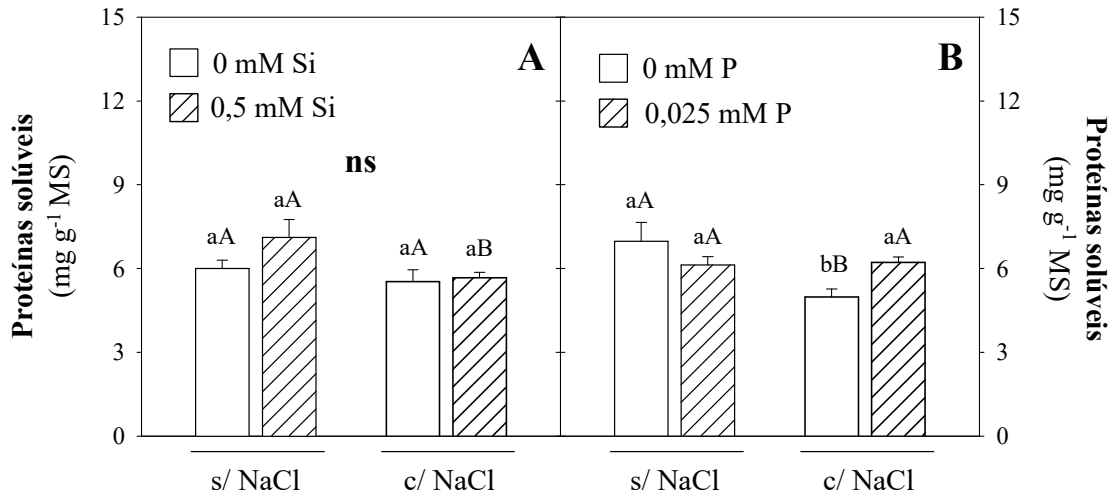
(\*\*) = significativo ( $p < 0,01$ ); (\*) = significativo ( $p < 0,05$ ); (ns) = não significativo pelo teste F; CV = coeficiente de variação.

O decréscimo nos teores de proteínas observado pode ser devido ao retardamento na síntese proteica ou na aceleração de sua degradação, levando ao aumento na quantidade de aminoácidos livres ou à inibição da incorporação desses aminoácidos nas proteínas (FREITAS, 2010). Em raízes de plantas de feijão-de-corda, Praxedes (2008) observou que a salinidade pouco afetou os teores de proteínas solúveis, inclusive no cultivar mais sensível à salinidade. Contudo, deve-se ressaltar que existem estudos mostrando que os teores de proteínas solúveis aumentam com a salinidade. Por exemplo, Bezerra *et al.* (2010) observaram que a presença de NaCl induziu um aumento nos teores de proteínas solúveis em plantas de girassol. Da mesma forma, Mendes *et al.* (2011) constataram uma maior concentração de proteínas em plantas de abacaxi submetidas à salinidade.

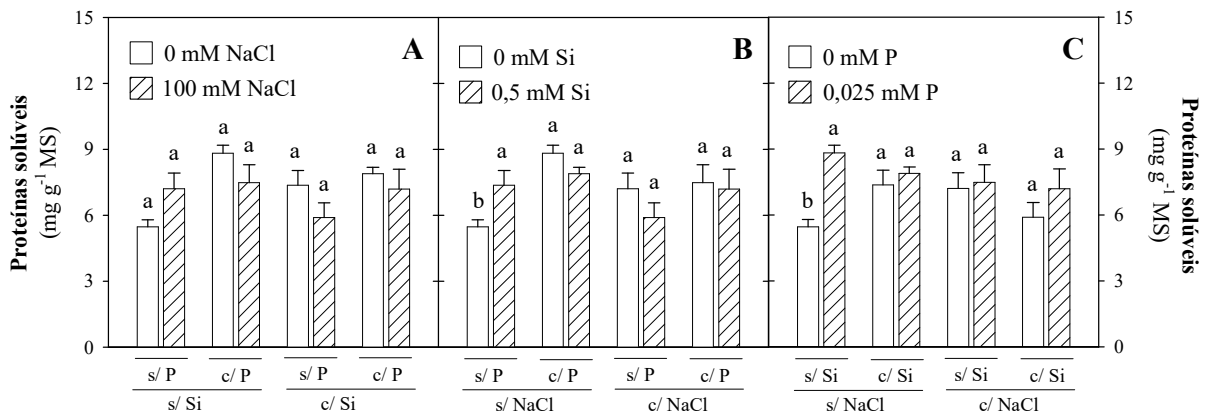
Convém salientar que de modo geral, em plantas submetidas a estresse salino, geralmente se verifica uma redução na quantidade total de proteínas (PARIDA; DAS; MITTRA, 2004), embora algumas proteínas possam ser induzidas (ALI, SRIVASTAVA; IQBAL, 1999; MANSOUR, 2000), como observado neste trabalho. Conforme Ashraf e Harris (2004), as proteínas que são induzidas pela salinidade têm sido identificadas em plantas, sendo classificadas em dois grupos distintos: proteínas específicas do estresse salino, que se



**Figura 34.** Teores de proteínas solúveis na parte aérea de plântulas de sorgo, genótipo CSF 18, aos 10 dias após a semeadura, cultivadas na ausência ou presença de NaCl e em ausência ou presença de Si (A) ou P (B). Colunas seguidas por letras minúsculas iguais, em um mesmo nível de NaCl, ou por letras maiúsculas iguais, em um mesmo nível de Si ou P, não diferem significativamente entre si ( $p > 0,05$ ). As barras verticais representam o erro padrão da média e ns representa desdobramentos não significativos.



**Figura 35.** Análise dos desdobramentos de NaCl, dentro de cada nível de Si e P (A); de Si, dentro de cada nível de NaCl e P (B) e; de P, dentro de cada nível de NaCl e Si (C), para os teores de proteínas solúveis na parte aérea (A, B e C) de plântulas de sorgo, genótipo CSF 20, aos 10 dias após a semeadura, cultivadas na ausência ou presença de NaCl, Si ou P. Colunas seguidas por letras iguais não diferem significativamente entre si ( $p > 0,05$ ), dentro de cada tratamento. As barras verticais representam o erro padrão da média.



acumulam apenas na presença de salinidade, e proteínas associadas a estresses, que são aquelas que se acumulam não apenas sob salinidade, mas também a outros tipos de estresse, tais como os de calor, frio, seca e elevadas ou baixas concentrações de nutrientes. De acordo com Singh (2006), algumas proteínas que se acumulam em plantas crescendo sob condições salinas podem funcionar como uma reserva de nitrogênio para ser utilizada quando o estresse chegar ao fim.

Analisando-se o efeito do Si nos teores de proteína solúveis na parte aérea, pode-se observar que este nutriente não promoveu qualquer alteração significativa nos teores em condição de estresse salino, em ambos os genótipos (Figura 34A, 35B). Entretanto, sob condições controle (ausência de NaCl), verificou-se que no genótipo CSF 20, o Si promoveu acréscimo de 35% nos teores de proteína, porém apenas na ausência de P (Figura 35B), e não teve efeito no genótipo CSF 18. Esses resultados diferem dos observados por Al-Aghabary, Zhu e Shi (2004) e Moussa (2006), que verificaram que, em condições de estresse salino, a aplicação de Si promoveu aumento no acúmulo de proteínas solúveis na parte aérea de plantas de cevada, tomate e milho. Da mesma forma, Sharaf (2010) e Ali *et al.* (2013), também observaram acréscimos no conteúdo de proteínas solúveis, em plantas de girassol e trigo, respectivamente, proporcionados pela suplementação com silício em condições de estresse salino.

Com relação ao efeito de P nos teores de proteínas solúveis, pode-se observar que os resultados foram contraditórios entre os dois genótipos estudados. Enquanto que, no genótipo CSF 18 os teores foram elevados em 25% em condição de estresse salino pela adição de P no meio de cultivo, no genótipo CSF 20 os teores também foram elevados (62%), contudo somente em condição controle e na ausência de P (Figura 34B, 35C). O fósforo é um elemento constituinte dos ácidos desoxirribonucleicos (DNA) e ribonucleicos (RNA), que contêm o código genético das plantas para a produção de proteínas e outros compostos essenciais para a estruturação das plantas, produção de sementes e transferência genética (RICHARDS; JOHNSTON, 2003), talvez isso justifique o aumento observado nos teores de proteínas observados.

#### **4.4 Atividade das enzimas antioxidantes**

##### **4.4.1 Aos 4 DAS**

###### *4.4.1.1 Dismutase do superóxido (SOD)*

A SOD, conforme os resultados da análise de variância, teve sua atividade influenciada pela salinidade apenas nas raízes do genótipo CSF 18 (Tabela 13). Nesse mesmo órgão se pode verificar que foi significativa a interação entre salinidade  $\times$  Si  $\times$  P, em ambos os genótipos. Na parte aérea, a atividade dessa enzima pouco foi afetada pelos fatores em estudo,

verificando-se que houve apenas efeito da interação entre salinidade  $\times$  Si no genótipo CSF 18, e do fator Si no genótipo CSF 20.

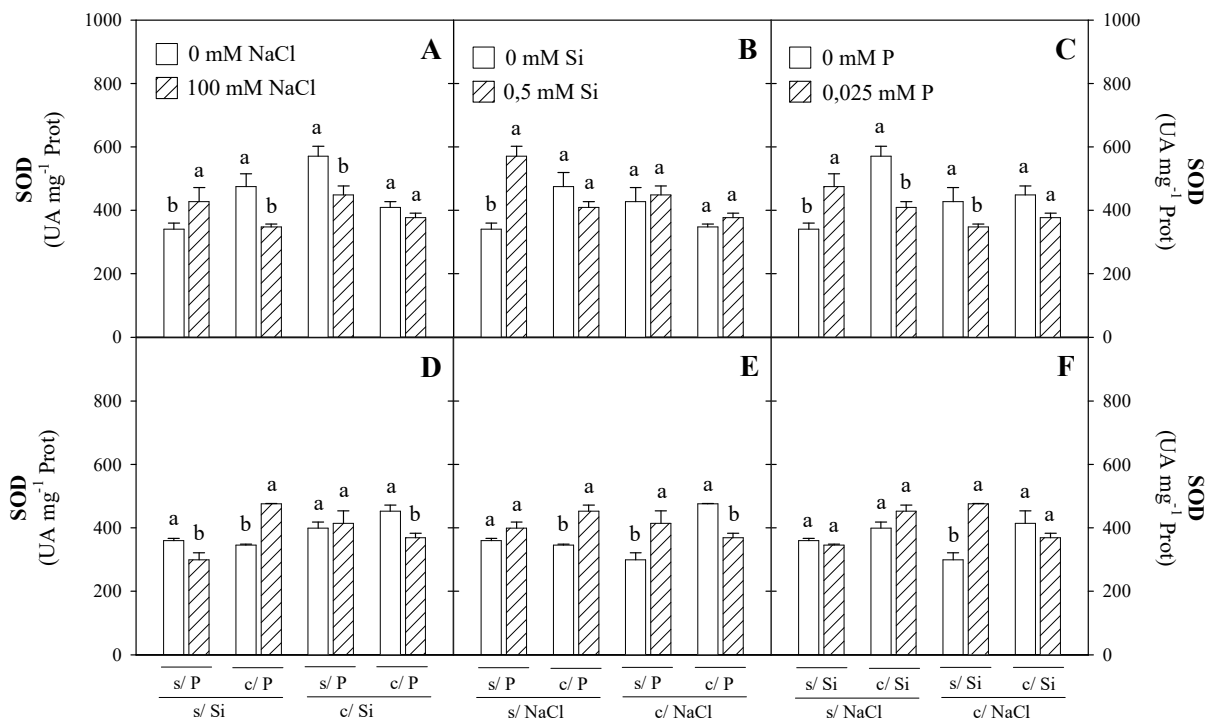
**Tabela 13** – Resumo da análise de variância dos valores médios da atividade da dismutase do superóxido (SOD) nas raízes (R) e na parte aérea (PA) de plântulas de sorgo, dos genótipos CSF 18 e CSF 20, aos 4 dias após a semeadura, cultivadas sob condições de estresse salino (S) e em presença de silício (Si) e/ou fósforo (P).

Fonte de variação	G.L.	Quadrado médio			
		CSF 18		CSF 20	
		SOD (R)	SOD (PA)	SOD (R)	SOD (PA)
S	1	19279,82*	232504,00 <sup>ns</sup>	0,75 <sup>ns</sup>	275159,67 <sup>ns</sup>
Si	1	23106,38**	31789,74 <sup>ns</sup>	11802,86*	653201,89*
P	1	16016,32*	19450,29 <sup>ns</sup>	14367,26**	197724,35 <sup>ns</sup>
S x Si	1	6562,62 <sup>ns</sup>	578261,27**	9508,34*	30815,32 <sup>ns</sup>
S x P	1	7658,27 <sup>ns</sup>	20061,91 <sup>ns</sup>	4262,58 <sup>ns</sup>	18378,23 <sup>ns</sup>
Si x P	1	41162,86**	336460,96 <sup>ns</sup>	11511,83*	122859,13 <sup>ns</sup>
S x Si x P	1	46154,01**	2694,79 <sup>ns</sup>	41780,99**	59616,38 <sup>ns</sup>
Resíduo	24	2880,49	114408,04	1526,60	109941,98
CV (%)		12,65	22,88	10,04	23,94

(\*\*) = significativo ( $p < 0,01$ ); (\*) = significativo ( $p < 0,05$ ); (<sup>ns</sup>) = não significativo pelo teste F; CV = coeficiente de variação.

Considerando a média da atividade da SOD nos dois níveis de Si e P, a salinidade de modo geral reduziu a atividade dessa enzima em 10% nas raízes do genótipo CSF 18, e não teve qualquer efeito no genótipo CSF 20. Entretanto, avaliando o efeito do NaCl em relação às outras duas fontes de variação, verificou-se que no genótipo CSF 18, na ausência de Si e P, houve incrementos na atividade da SOD em resposta a adição de NaCl no meio de cultivo; contrariamente, na presença de Si ou P, verificou-se redução da atividade dessa enzima (Figura 36A). Já no genótipo CSF 20, plântulas estressadas com NaCl apresentaram redução na atividade da SOD nas raízes, tanto na ausência como na presença associada de Si e P no meio de cultivo (Figura 36D). Em contraste, quando o NaCl foi adicionado no meio de cultivo contendo P, houve intensificação na atividade dessa enzima.

**Figura 36.** Análise dos desdobramentos de NaCl, dentro de cada nível de Si e P (A e D); de Si, dentro de cada nível de NaCl e P (B e E); e de P, dentro de cada nível de NaCl e Si (C e F), para a atividade da dismutase do superóxido (SOD) nas raízes de plântulas de sorgo, genótipos CSF 18 (A, B e C) e CSF 20 (D, E e F), aos 4 dias após a semeadura, cultivadas na ausência ou presença de NaCl, Si ou P. Colunas seguidas por letras iguais não diferem significativamente entre si, dentro de cada tratamento ( $p > 0,05$ ). As barras verticais representam o erro padrão da média.



Incrementos na atividade da SOD pela salinidade têm sido reportado para diversas espécies de plantas, tais como em sorgo (KAFI *et al.*, 2011), milho (AZEVEDO-NETO *et al.*, 2006), cevada (LIANG *et al.*, 2003) e algodão (MELONI *et al.*, 2002). Esse incremento na atividade SOD ocorre porque, nas células, essa enzima tem sido considerada a primeira linha de defesa na eliminação de espécies reativas de oxigênio (EROs), convertendo o radical livre superóxido a H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, que, por sua vez, é eliminado pela ação das enzimas peroxidases e catalase (ALSCHER; DONAHUE; CRAMER, 2002; LIANG *et al.*, 2003; PARIDA; DAS, 2005; BROU *et al.*, 2010; GILL; TUTEJA, 2010).

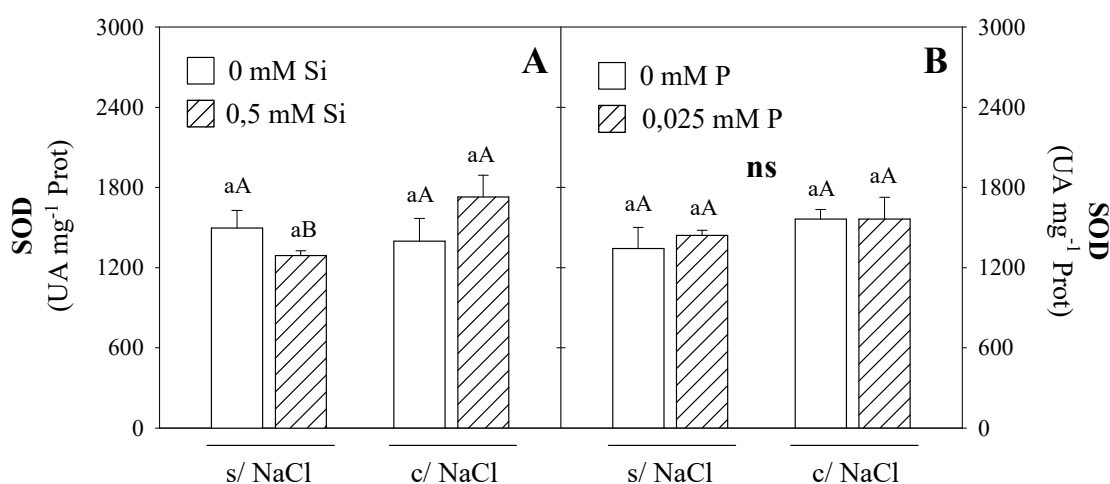
Avaliando o efeito de Si, verificou-se que esse nutriente não teve qualquer efeito sobre a atividade da SOD nas raízes de plântulas estressadas do genótipo CSF 18, porém, na ausência de NaCl, a adição isolada de Si promoveu incrementos na atividade da SOD (Figura 36B). Tais resultados discordam daqueles encontrados em pepino (ZHU *et al.*, 2004) e milho (MOUSSA, 2006), em que a aplicação de Si aumentou marcadamente a atividade da SOD sob condições de salinidade. Entretanto, aumento na atividade da SOD em resposta ao Si em

condições de estresse salino, foi observado nas raízes de plântulas de sorgo do genótipo CSF20 cultivadas na ausência de P, porém na presença de P, verificou-se que a atividade dessa enzima foi reduzida em 22%.

De modo similar ao reportado para Si, o P intensificou a atividade da SOD nas raízes das plântulas controle do genótipo CSF 18 na ausência de Si (Figura 36C). Entretanto, em plântulas estressadas, a adição de P ao meio de cultivo promoveu decréscimos significativos na atividade dessa enzima também na ausência de Si no genótipo CSF 18 (Figura 36C), e de modo contrário, no genótipo CSF 20 promoveu acréscimo (Figura 36F).

Na parte aérea, o fornecimento isolado de Si ou P no meio de crescimento não promoveu alterações na atividade da SOD do genótipo CSF 18 (Figura 37A, B). No entanto, plântulas sob estresse salino apresentaram incrementos de 34% na atividade dessa enzima em relação ao controle, quando na presença de Si (Figura 37A). Já no genótipo CSF 20, como mencionado anteriormente, o Si influenciou a atividade da SOD na parte aérea, verificando-se redução de 18,6% na atividade dessa enzima.

**Figura 37.** Atividade da dismutase do superóxido (SOD) na parte aérea de plântulas de sorgo, genótipo CSF 18, aos 4 dias após a semeadura, cultivadas na ausência ou presença de NaCl e em ausência ou presença de Si (A) ou P (B). Colunas seguidas por letras minúsculas iguais, em um mesmo nível de NaCl, ou por letras maiúsculas iguais, em um mesmo nível de Si ou P, não diferem significativamente entre si ( $p > 0,05$ ). As barras verticais representam o erro padrão da média e ns representa desdobramentos não significativos.



#### 4.4.1.2 Catalase (CAT)

Os resultados da análise de variância evidenciaram que a atividade da CAT nos diferentes órgãos das plântulas, foi influenciada significativamente pela salinidade e pelo P em ambos os genótipos, sendo também significativo o efeito do Si na atividade dessa enzima,

porém somente no genótipo CSF 20 (Tabela 14). Além disso, verificou-se que houve interação significativa entre salinidade  $\times$  Si  $\times$  P, tanto nas raízes como na parte aérea dos dois genótipos, com exceção da atividade da CAT na parte aérea do genótipo CSF 18, que somente apresentou interação entre os fatores Si  $\times$  P.

**Tabela 14** – Resumo da análise de variância dos valores médios da atividade da catalase (CAT) nas raízes (R) e na parte aérea (PA) de plântulas de sorgo, dos genótipos CSF 18 e CSF 20, aos 4 dias após a semeadura, cultivadas sob condições de estresse salino (S) e em presença de silício (Si) e/ou fósforo (P).

Fonte de variação	G.L.	Quadrado médio			
		CSF 18		CSF 20	
		CAT (R)	CAT (PA)	CAT (R)	CAT (PA)
S	1	28767,93**	131835,19**	29583,00**	133890,27**
Si	1	34,15 <sup>ns</sup>	6520,64 <sup>ns</sup>	1566,08**	61526,09**
P	1	492,37*	41055,23**	534,33*	19372,20**
S x Si	1	2047,91**	3042,80 <sup>ns</sup>	1516,80**	59677,51**
S x P	1	248,30 <sup>ns</sup>	1398,74 <sup>ns</sup>	918,72*	5848,91 <sup>ns</sup>
Si x P	1	83,06 <sup>ns</sup>	71357,42**	417,56 <sup>ns</sup>	1283,42 <sup>ns</sup>
S x Si x P	1	1351,78**	915,62 <sup>ns</sup>	676,40*	12305,31*
Resíduo	24	105,48	3236,81	118,50	2076,92
CV (%)		15,94	24,31	20,35	28,65

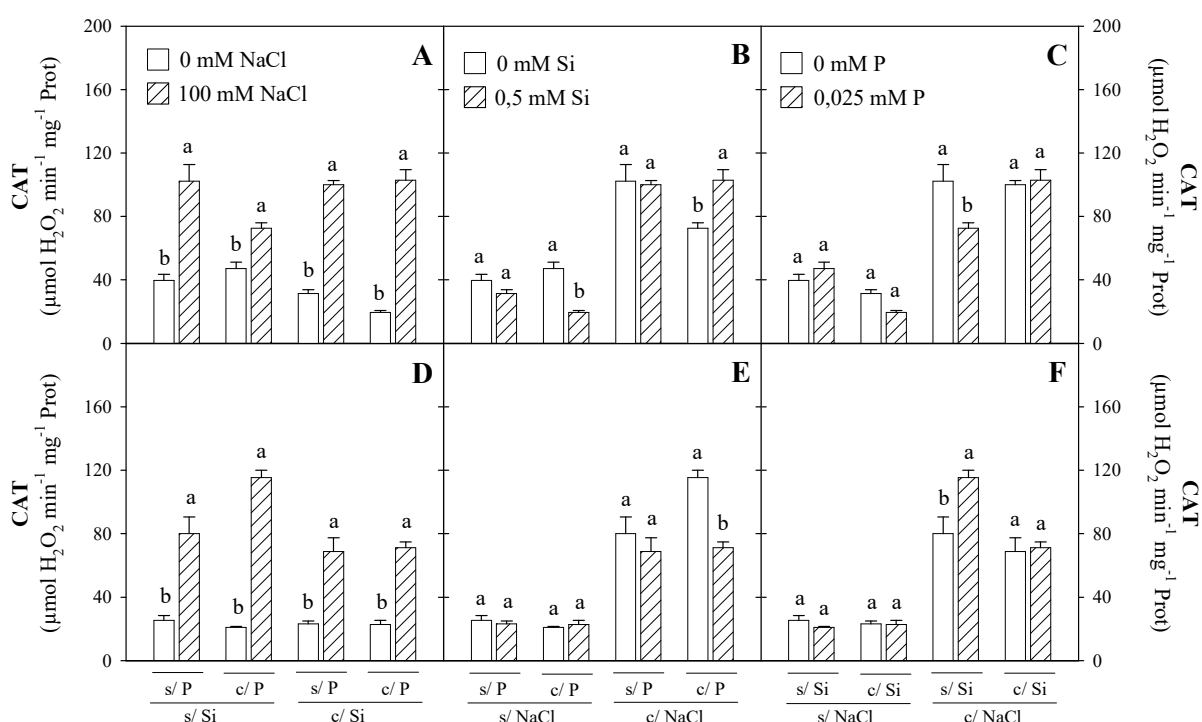
(\*\*) = significativo ( $p < 0,01$ ); (\*) = significativo ( $p < 0,05$ ); (<sup>ns</sup>) = não significativo pelo teste F; CV = coeficiente de variação.

A CAT apresentou incrementos significativos com a salinidade, independentemente da presença de Si ou P (Figura 38A, D), sendo que os valores médios de atividade nas raízes de plântulas controle, que foram de 34,5  $\mu\text{mol H}_2\text{O}_2 \text{ min}^{-1} \text{ mg}^{-1} \text{ Prot}$  no genótipo CSF 18 e de 23,1  $\mu\text{mol H}_2\text{O}_2 \text{ min}^{-1} \text{ mg}^{-1} \text{ Prot}$  no genótipo CSF 20, aumentaram 174 e 263% em resposta ao estresse salino, respectivamente (resultados não apresentados).

Analisando a ação de Si e P na atividade da CAT nas raízes do genótipo CSF 18, se pode observar a adição de P no meio de cultivo reduziu a atividade dessa enzima em 42% em condição de estresse salino, quando em ausência de Si (Figura 38C). Porém, adicionando-se Si no meio de cultivo contendo NaCl e P, esse nutriente inibiu o efeito do P sobre a atividade da CAT nas raízes de plântulas cultivadas em condição de salinidade (Figura 38B).

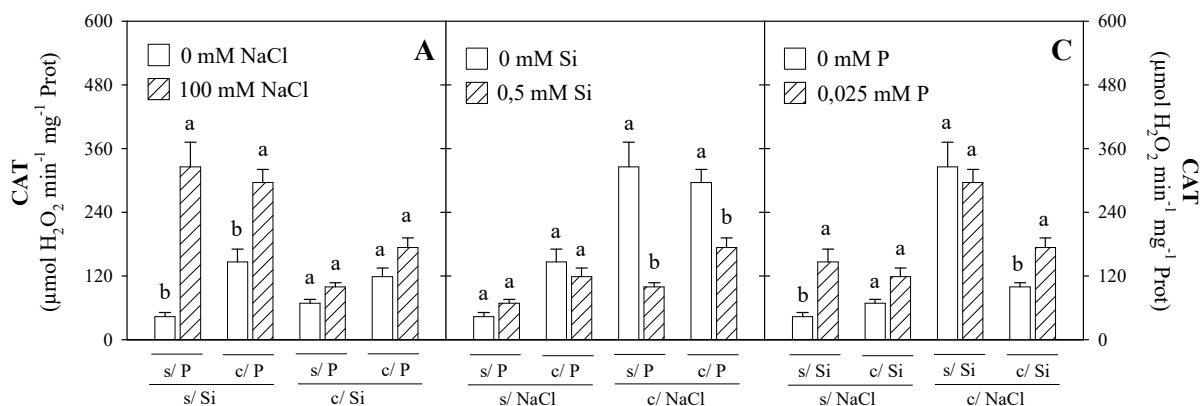
De modo contrário, no genótipo CSF 20, o fornecimento de P para plântulas estressadas na ausência de Si intensificou o aumento na atividade da CAT nas raízes (Figura 38F). Contudo, a adição de Si no meio de cultivo contendo P reduziu a atividade dessa enzima em 38 % nas raízes de plântulas estressas (Figura 38E).

**Figura 38.** Análise dos desdobramentos de NaCl, dentro de cada nível de Si e P (A e D); de Si, dentro de cada nível de NaCl e P (B e E); e de P, dentro de cada nível de NaCl e Si (C e F), para a atividade da catalase (CAT) nas raízes de plântulas de sorgo, genótipos CSF 18 (A, B e C) e CSF 20 (D, E e F), aos 4 dias após a semeadura, cultivadas na ausência ou presença de NaCl, Si ou P. Colunas seguidas por letras iguais não diferem significativamente entre si, dentro de cada tratamento ( $p > 0,05$ ). As barras verticais representam o erro padrão da média.



Na parte aérea, da mesma forma que observado nas raízes, a salinidade promoveu acréscimos significativos na atividade da CAT em ambos os genótipos. Considerando a média da atividade da CAT nos dois níveis de Si e P, que foram de  $170 \mu\text{mol H}_2\text{O}_2 \text{ min}^{-1} \text{ mg}^{-1} \text{ Prot}$  no genótipo CSF 18 e de  $94,4 \mu\text{mol H}_2\text{O}_2 \text{ min}^{-1} \text{ mg}^{-1} \text{ Prot}$  no genótipo CSF 20, aumentaram 75 e 137% em resposta ao estresse salino, respectivamente (resultados não apresentados). Entretanto, avaliando o desdobramento de NaCl dentro dos níveis de Si e P, verificou-se que no genótipo CSF 20, a CAT apresentou incrementos significativos na atividade em resposta ao estresse salino apenas na ausência de Si, independentemente da presença de P (Figura 39A).

**Figura 39.** Análise dos desdobramentos de NaCl, dentro de cada nível de Si e P (A); de Si, dentro de cada nível de NaCl e P (B) e; de P, dentro de cada nível de NaCl e Si (C), para a atividade da catalase (CAT) na parte aérea (A, B e C) de plântulas de sorgo, genótipo CSF 20, aos 4 dias após a semeadura, cultivadas na ausência ou presença de NaCl, Si ou P. Colunas seguidas por letras iguais não diferem significativamente entre si ( $p > 0,05$ ), dentro de cada tratamento. As barras verticais representam o erro padrão da média.



De acordo com Eyidogan e Oz (2007), o aumento na atividade da CAT é importante para reduzir o acúmulo excessivo de  $\text{H}_2\text{O}_2$  e, conseqüentemente, a peroxidação de lipídios e os danos às membranas. Nesse contexto, os dados obtidos nesse estudo sugerem que a CAT pode ter contribuído para minimizar os efeitos deletérios da salinidade no crescimento radicular das plântulas. Evidências disso é que, aos 4 DAS, as raízes das plântulas de sorgo de ambos os genótipos não foram afetadas negativamente pelo estresse salino (Figura 1, 4 e 5). No entanto, esse mesmo fato parece não ter ocorrido na parte aérea, pois o aumento na atividade da CAT nesse órgão não foi suficiente para minimizar os efeitos deletérios do estresse salino no crescimento. Em conjunto, esses dados fornecem indícios de que os danos oxidativos são mais severos nos tecidos aéreos que nos radiculares e/ou que a CAT exerce efeito antioxidante mais eficaz nos tecidos das raízes.

Embora o Si não tenha influenciado significativamente a atividade da CAT na ausência de estresse, a adição desse nutriente em meio salino promoveu decréscimos de 69 e 41% na atividade dessa enzima na parte aérea das plântulas do genótipo CSF 20, na ausência e presença de P, respectivamente (Figura 39B). Em experimento com pepino, Zhujun *et al.* (2004) obtiveram resultados semelhantes, onde com a adição de silício verificaram redução na atividade da catalase comparado aos tratamentos sem adição de Si.

Adicionalmente, enquanto o fornecimento de Si reduziu a atividade da CAT na presença de P sob salinidade, a adição de P promoveu incremento na atividade dessa enzima em plântulas estressadas com NaCl, na presença de Si (Figura 39C).



#### 4.4.1.3 Peroxidase do ascorbato (APX)

A análise estatística dos dados revelou que a atividade da APX nas raízes dos dois genótipos de sorgo em estudo, foi influenciada pela salinidade, sendo também significativa as interações entre salinidade  $\times$  P no genótipo CSF 18, e entre salinidade  $\times$  Si  $\times$  P, no genótipo CSF 20 (Tabela 15).

**Tabela 15** – Resumo da análise de variância dos valores médios da atividade da peroxidase do ascorbato (APX) nas raízes (R) e na parte aérea (PA) de plântulas de sorgo, genótipos CSF 18 e CSF 20, aos 4 dias após a semeadura, cultivadas sob condições de estresse salino (S) e em presença de silício (Si) e/ou fósforo (P).

Fonte de variação	G.L.	Quadrado médio			
		CSF 18		CSF 20	
		APX (R)	APX (PA)	APX (R)	APX (PA)
S	1	6,41**	99,42**	5,63**	0,92 <sup>ns</sup>
Si	1	5,39E-3 <sup>ns</sup>	39,04**	2,42**	31,84**
P	1	8,75E-2*	139,19**	4,32E-3 <sup>ns</sup>	2,07 <sup>ns</sup>
S x Si	1	5,40E-2 <sup>ns</sup>	25,09**	2,59**	1,03 <sup>ns</sup>
S x P	1	0,27**	51,32**	2,70**	3,40*
Si x P	1	9,06E-3 <sup>ns</sup>	93,52**	0,10 <sup>ns</sup>	8,26**
S x Si x P	1	1,40E-2 <sup>ns</sup>	19,28**	0,69**	7,99**
Resíduo	24	0,41	1,33	6,96E-2	0,76
CV (%)		16,77	16,99	24,48	29,05

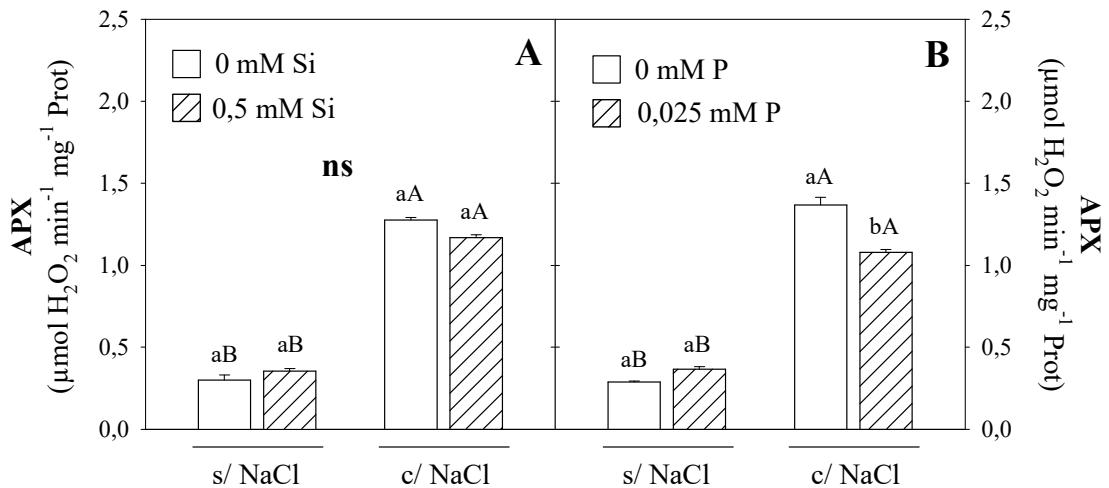
(\*\*) = significativo ( $p < 0,01$ ); (\*) = significativo ( $p < 0,05$ ); (<sup>ns</sup>) = não significativo pelo teste F; CV = coeficiente de variação.

Incrementos na atividade da APX foram verificados nas raízes das plântulas de sorgo de ambos os genótipos, em resposta a adição de NaCl no meio de cultivo, independentemente da presença de Si e P, exceto do genótipo CSF 20, em que na presença de Si a atividade dessa enzima foi reduzida (Figura 40, 41A).

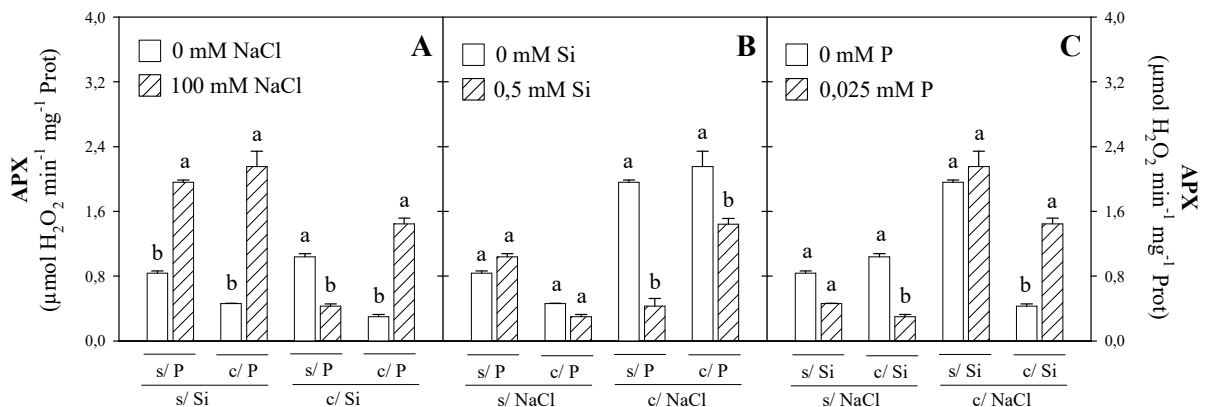
A APX, assim como a CAT, é uma enzima fundamental na tolerância contra danos oxidativos em plantas submetidas a estresses ambientais, atuando no ajuste fino durante a eliminação de EROs e nos processos de sinalização (MITTLER, 2002). Já a CAT opera na remoção do excesso de EROs quando os vegetais são submetidos a uma condição estressante. Portanto, o aumento concomitante da atividade das enzimas APX e CAT nas raízes estressadas

pode ter contribuído para mitigar os efeitos danosos do estresse salino nas plântulas de sorgo (Figura 1, 4 e 5).

**Figura 40.** Atividade da peroxidase do ascorbato (APX) nas raízes de plântulas de sorgo, genótipo CSF 18, aos 4 dias após a semeadura, cultivadas na ausência ou presença de NaCl e em ausência ou presença de Si (A) ou P (B). Colunas seguidas por letras minúsculas iguais, em um mesmo nível de NaCl, ou por letras maiúsculas iguais, em um mesmo nível de Si ou P, não diferem significativamente entre si ( $p > 0,05$ ). As barras verticais representam o erro padrão da média e ns representa desdobramentos não significativos.



**Figura 41.** Análise dos desdobramentos de NaCl, dentro de cada nível de Si e P (A); de Si, dentro de cada nível de NaCl e P (B) e; de P, dentro de cada nível de NaCl e Si (C), para a atividade da peroxidase do ascorbato (APX) nas raízes (A, B e C) de plântulas de sorgo, genótipo CSF 20, aos 4 dias após a semeadura, cultivadas na ausência ou presença de NaCl, Si ou P. Colunas seguidas por letras iguais não diferem significativamente entre si ( $p > 0,05$ ), dentro de cada tratamento. As barras verticais representam o erro padrão da média.



O Si, conforme a figura 40A, não teve qualquer efeito sobre a atividade da APX nas raízes do genótipo CSF 18. Já no genótipo CSF20, verificou-se reduções de 78 e 33% na atividade dessa enzima em plântulas estressadas, em resposta a adição de Si no meio de cultivo,

na ausência e presença de P, respectivamente (Figura 41B). De modo oposto ao observado neste estudo, Wang *et al.* (2009) reportaram que o fornecimento de Si resultou em aumentos na expressão e na atividade da APX de plantas estressadas com NaCl, evidenciando o papel desse nutriente na modulação da APX.

O fornecimento de P em condição de estresse salino reduziu a atividade da APX nas raízes do genótipo CSF 18, e não teve qualquer efeito em condição controle (figura 40B). Por outro lado, plântulas do genótipo CSF 20 quando cultivadas em meio contendo Si, apresentaram incremento na atividade da APX nas raízes em presença de NaCl, e de modo contrário, em ausência de NaCl apresentam decréscimos na atividade (Figura 41C).

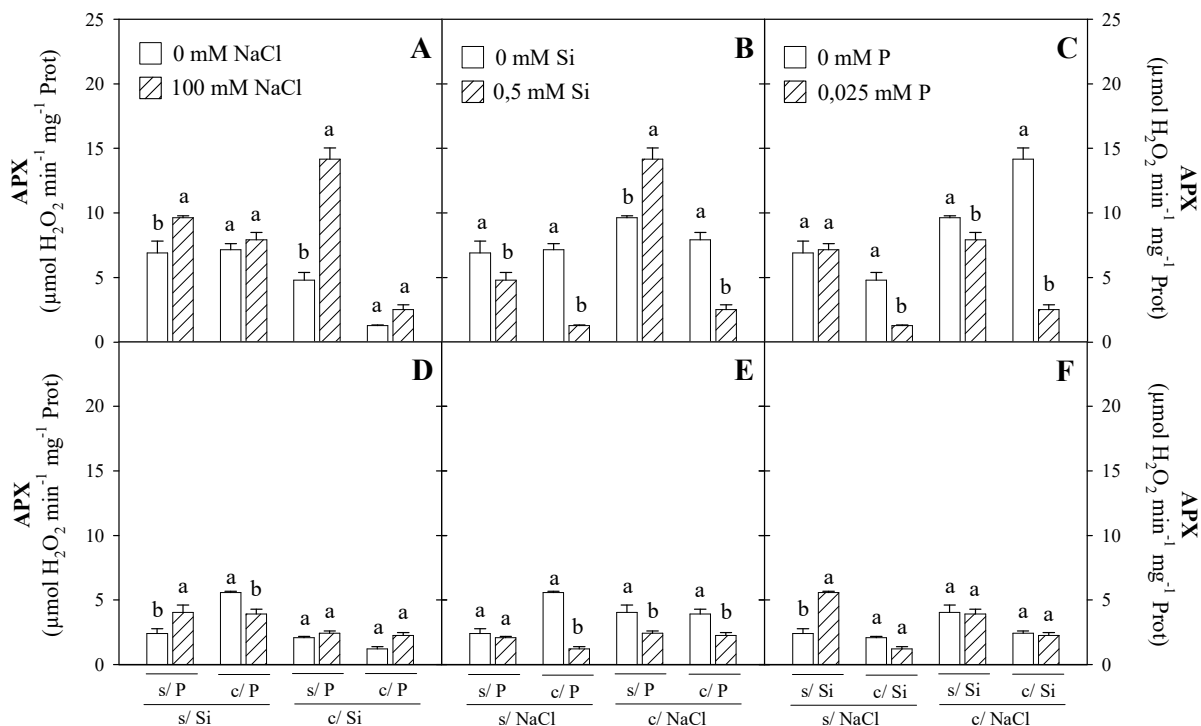
Na parte aérea, o resultado da análise de variância mostrou que a salinidade teve efeito sobre a atividade da APX apenas no genótipo CSF 18 (Tabela 15). Além disso, foi observada interação significativa entre salinidade  $\times$  Si  $\times$  P, em ambos os genótipos.

Avaliando o desdobramento de NaCl dentro dos níveis de Si e P, verificou-se que no genótipo CSF 18, assim como registrado para as raízes, a atividade da APX na parte aérea aumentou em resposta ao estresse salino nas plântulas em ausência de P, independentemente da presença de Si (Figura 42A). Porém, no genótipo CSF 20, mesmo a salinidade de modo geral não ter influenciado significativamente a atividade da APX, verificou-se que, em ausência de Si e P, a adição de NaCl no meio de cultivo promoveu incrementos de 69% na atividade dessa enzima, enquanto que, em ausência de Si e o P estando presente, foi observado redução de 30% (Figura 42D).

Diversos estudos destacam a APX como uma das principais enzimas eliminadoras de  $H_2O_2$ , exercendo papel fundamental como antioxidante nos processos de aclimação à salinidade, em diferentes espécies de plantas, tais como arroz, pepino, sorgo, alfafa, milho e canola (VAIDYANATHAN *et al.*, 2003; ZHU *et al.*, 2004; AZEVEDO-NETO *et al.*, 2006; WANG *et al.*, 2009; KAFI *et al.*, 2011; FARSHIDI; ABDOLZADEH; SADEGHIPOUR, 2012). Contudo, há estudos que relatam decréscimos na atividade dessa enzima quando as plantas são expostas ao estresse salino. Evidências disso foram encontradas em *Vigna radiata*, em que se observaram reduções na atividade da APX nas raízes de plantas estressadas com NaCl, quando comparadas ao controle (PANDA; KHAN, 2009).

Sob condições de estresse salino, ambos os genótipos apresentaram redução na atividade da APX na parte aérea, em resposta a adição de Si no meio de cultivo, com exceção do genótipo CSF 18, que na presença de P, este nutriente intensificou o efeito do NaCl no aumento na atividade dessa enzima (Figura 42B, E).

**Figura 42.** Análise dos desdobramentos de NaCl, dentro de cada nível de Si e P (A e D); de Si, dentro de cada nível de NaCl e P (B e E); e de P, dentro de cada nível de NaCl e Si (C e F), para a atividade da peroxidase do ascorbato (APX) na parte aérea de plântulas de sorgo, genótipos CSF 18 (A, B e C) e CSF 20 (D, E e F), aos 4 dias após a semeadura, cultivadas na ausência ou presença de NaCl, Si ou P. Colunas seguidas por letras iguais não diferem significativamente entre si, dentro de cada tratamento ( $p > 0,05$ ). As barras verticais representam o erro padrão da média.



De modo similar, o P reduziu a atividade da APX na parte aérea de plântulas estressadas do genótipo CSF 18, sendo que a maior redução, de 65%, foi observada quando na presença de Si (Figura 42 C). Redução na atividade dessa enzima, também pode ser observada em condição controle, porém apenas na presença de Si. No genótipo CSF 20, não se verificou qualquer efeito do P na atividade da APX em condições de estresse salino, no entanto, em condição controle, e na ausência de Si, este nutriente promoveu incremento na atividade de 131% (Figura 42F).

#### 4.4.1.4 Peroxidase do guaiacol (G-POD)

Neste estudo, a análise dos dados mostrou que de modo geral a atividade da G-POD nas raízes, foi influenciada somente pelos fatores P no genótipo CSF 18, e salinidade no genótipo CSF20 (Tabela 16). Além disso, foi registrada interação tripla entre os fatores salinidade × Si × P, em ambos os genótipos. Na parte aérea, a atividade desta enzima foi afetada

significativamente pelo fator Si, em ambos os genótipos, e pelo fator P, no genótipo CSF 18. Também foram significativas as interações entre salinidade  $\times$  Si, salinidade  $\times$  P no genótipo CSF 18, e entre Si  $\times$  P, nos dois genótipos.

**Tabela 16** – Resumo da análise de variância dos valores médios da atividade da peroxidase do guaiacol (G-POD) nas raízes (R) e na parte aérea (PA) de plântulas de sorgo, genótipos CSF 18 e CSF 20, aos 4 dias após a semeadura, cultivadas sob condições de estresse salino (S) e em presença de silício (Si) e/ou fósforo (P).

Fonte de variação	G.L.	Quadrado médio			
		CSF 18		CSF 20	
		G-POD (R)	G-POD (PA)	G-POD (R)	G-POD (PA)
S	1	15,95 <sup>ns</sup>	13,53 <sup>ns</sup>	41,14 <sup>**</sup>	185,32 <sup>ns</sup>
Si	1	19,23 <sup>ns</sup>	735,80 <sup>**</sup>	3,42 <sup>ns</sup>	1788,98 <sup>**</sup>
P	1	40,92 <sup>*</sup>	760,28 <sup>**</sup>	1,57 <sup>ns</sup>	6,46 <sup>ns</sup>
S x Si	1	2,86 <sup>ns</sup>	390,28 <sup>**</sup>	18,04 <sup>**</sup>	14,15 <sup>ns</sup>
S x P	1	7,23 <sup>ns</sup>	537,49 <sup>**</sup>	3,27 <sup>ns</sup>	5,64 <sup>ns</sup>
Si x P	1	28,33 <sup>*</sup>	4584,15 <sup>**</sup>	38,29 <sup>**</sup>	1475,43 <sup>**</sup>
S x Si x P	1	43,29 <sup>*</sup>	3,96 <sup>ns</sup>	19,36 <sup>**</sup>	25,36 <sup>ns</sup>
Resíduo	24	5,66	46,59	1,94	33,86
CV (%)		16,39	23,14	12,83	30,58

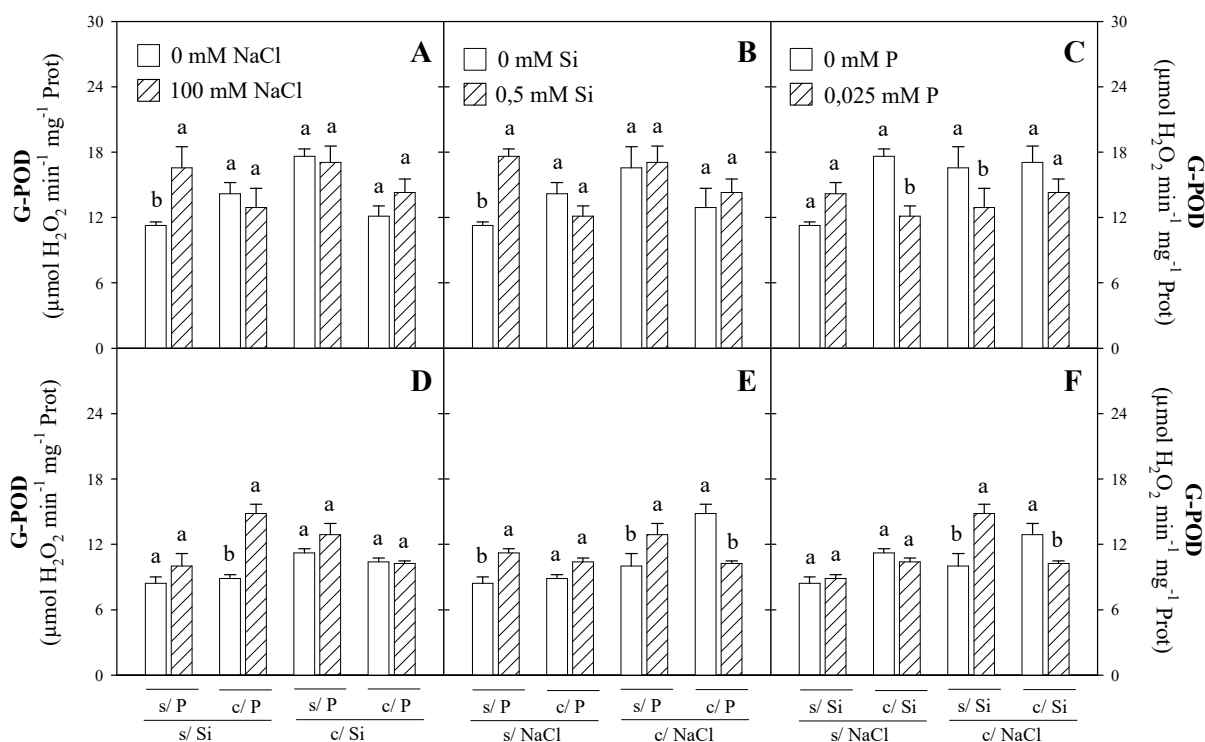
(\*\*) = significativo ( $p < 0,01$ ); (\*) = significativo ( $p < 0,05$ ); (ns) = não significativo pelo teste F; CV = coeficiente de variação.

Na raízes, verificou-se que plântulas de sorgo do genótipo CSF 18 estressadas com NaCl a 100 mM, apresentaram valores de atividade da G-POD maiores que aqueles do tratamento controle, sem, contudo, haver nenhum efeito interativo em função da adição de Si e/ou P (Figura 43A). No entanto, plântulas de sorgo do genótipo CSF 20 também apresentaram acréscimos na atividade dessa enzima, em resposta ao NaCl, porém, apenas quando em presença de P no meio de cultivo (Figura 43B).

De modo interessante, em ambos os genótipos o fornecimento de Si na solução de cultivo promoveu aumentos na atividade da G-POD nas raízes das plântulas crescendo na ausência de P e de NaCl (Figura 43B, E). Tal resposta pode ser resultado da presença de Na<sup>+</sup> na fonte de Si utilizada neste estudo, o Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>. Esse argumento é corroborado pelos estudos de Guo *et al.* (2007) com plantas de melão, em que os autores observaram valores de atividade da G-POD nas plantas nutridas com Si (aplicando Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>) 100% maiores que àqueles das

plantas controle. Em condição de estresse salino, o Si não teve qualquer efeito no genótipo CSF 18, porém no genótipo CSF 20, as respostas foram contraditórias, quando esse nutriente foi adicionado no meio de cultivo na ausência de P promoveu incrementos na atividade dessa enzima, ao passo que, na presença de P, promoveu redução (Figura 43B, E).

**Figura 43.** Análise dos desdobramentos de NaCl, dentro de cada nível de Si e P (A e D); de Si, dentro de cada nível de NaCl e P (B e E); e de P, dentro de cada nível de NaCl e Si (C e F), para a atividade da peroxidase do guaiacol (G-POD) nas raízes de plântulas de sorgo, genótipos CSF 18 (A, B e C) e CSF 20 (D, E e F), aos 4 dias após a semeadura, cultivadas na ausência ou presença de NaCl, Si ou P. Colunas seguidas por letras iguais não diferem significativamente entre si, dentro de cada tratamento ( $p > 0,05$ ). As barras verticais representam o erro padrão da média.

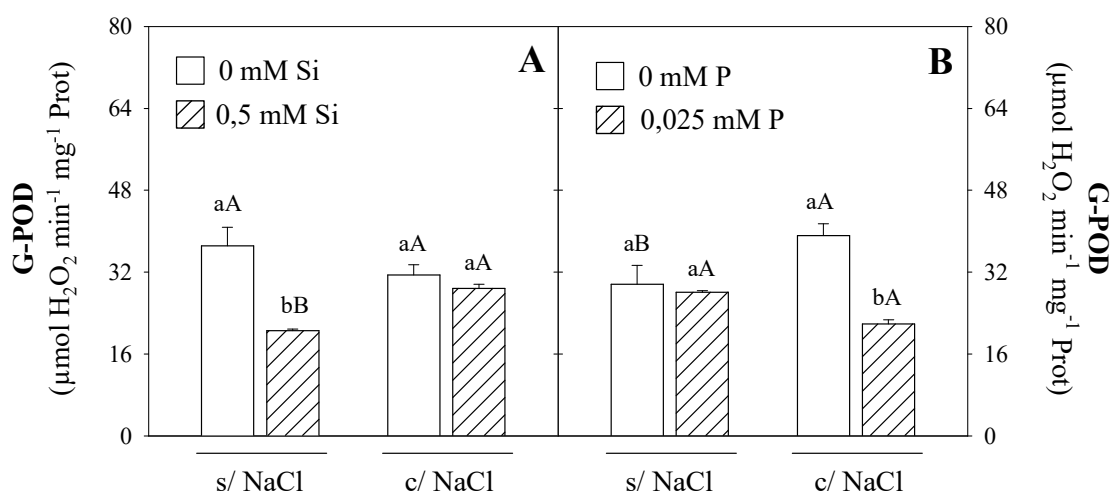


Avaliando o efeito do P sobre a atividade da G-POD, verificou-se que no genótipo CSF 18 esse nutriente reduziu a atividade dessa enzima nas plântulas não estressadas e nutridas com Si, bem como naquelas estressadas na ausência de Si (Figura 43C). No genótipo CSF 20, em condição de estresse salino, o P apresentou resposta similar ao Si, verificando que sua adição isolada promoveu incrementos na atividade da G-POD, contudo, a aplicação conjunta dos nutrientes afetou negativamente a atividade dessa enzima (Figura 43F).

Como descrito anteriormente, o fator salinidade não afetou significativamente a atividade da G-POD na parte aérea de ambos os genótipos, entretanto se pode verificar que, no

genótipo CSF 18, tanto na presença de Si e na ausência de P, houve incrementos na atividade dessa enzima em resposta a adição de NaCl no meio de cultivo (Figura 44).

**Figura 44.** Atividade da peroxidase do guaiacol (G-POD) na parte aérea de plântulas de sorgo, genótipo CSF 18, aos 4 dias após a semeadura, cultivadas na ausência ou presença de NaCl e em ausência ou presença de Si (A) ou P (B). Colunas seguidas por letras minúsculas iguais, em um mesmo nível de NaCl, ou por letras maiúsculas iguais, em um mesmo nível de Si ou P, não diferem significativamente entre si ( $p > 0,05$ ). As barras verticais representam o erro padrão da média.



Baseado nos resultados observados, pode-se sugerir que a G-POD contribui, em paralelo com as enzimas CAT e APX, para a remoção de EROs nos tecidos das plântulas de sorgo, principalmente nas raízes. Esse dados estão em concordância com aqueles encontrados em milho, cevada e pepino, em que a G-POD apresentou papel significativo na defesa contra o estresse oxidativo em plantas submetidas ao estresse salino (AZEVEDO-NETO *et al.*, 2006; LIANG *et al.*, 2003; ZHU *et al.*, 2004).

Vale ressaltar que a adição de Si e P ao meio de cultivo não interfere positivamente na modulação dessa enzima, ao contrário, pode gerar consequências negativas em resposta ao estresse salino. Como observado na figura 44, a adição de Si e P reduziu a atividade dessa enzima, na ausência e na presença de NaCl, respectivamente.

#### 4.4.2 Aos 10 DAS

##### 4.4.2.1 Dismutase do superóxido (SOD)

De acordo com os resultados da análise de variância, nas raízes a atividade da SOD no genótipo CSF 18 não foi influenciada significativamente por quaisquer um dos fatores estudados, enquanto que no genótipo CSF 20, a atividade dessa enzima somente foi influenciada pelo fator salinidade. Na parte aérea, houve interação significativa entre os fatores salinidade  $\times$  P e Si  $\times$  P em ambos os genótipos, e entre salinidade  $\times$  Si, apenas no genótipo CSF 18 (Tabela 17).

**Tabela 17** – Resumo da análise de variância dos valores médios da atividade específica da enzima superóxido dismutase (SOD) nas raízes (R) e na parte aérea (PA) de plântulas de sorgo, genótipos CSF 18 e CSF 20, aos 10 dias após a semeadura, cultivadas sob condições de estresse salino (S) e em presença de silício (Si) e/ou fósforo (P).

Fonte de variação	G.L.	Quadrado médio			
		CSF 18		CSF 20	
		SOD (R)	SOD (PA)	SOD (R)	SOD (PA)
S	1	5774,42 <sup>ns</sup>	177084,42 <sup>*</sup>	29479,00 <sup>**</sup>	19369,65 <sup>ns</sup>
Si	1	3389,70 <sup>ns</sup>	67849,31 <sup>ns</sup>	3729,83 <sup>ns</sup>	26184,24 <sup>ns</sup>
P	1	8,31 <sup>ns</sup>	76579,06 <sup>ns</sup>	16,34 <sup>ns</sup>	169212,89 <sup>**</sup>
S x Si	1	4161,22 <sup>ns</sup>	125831,21 <sup>*</sup>	796,74 <sup>ns</sup>	3435,85 <sup>ns</sup>
S x P	1	60,90 <sup>ns</sup>	399038,74 <sup>**</sup>	1699,12 <sup>ns</sup>	138645,30 <sup>**</sup>
Si x P	1	7570,95 <sup>ns</sup>	125402,14 <sup>*</sup>	9732,43 <sup>ns</sup>	84128,31 <sup>**</sup>
S x Si x P	1	1222,05 <sup>ns</sup>	14108,94 <sup>ns</sup>	18038,81 <sup>ns</sup>	15592,08 <sup>ns</sup>
Resíduo	24	4293,64	24848,88	4536,06	18888,46
CV (%)		12,90	17,13	14,88	19,88

(\*\*) = significativo ( $p < 0,01$ ); (\*) = significativo ( $p < 0,05$ ); (ns) = não significativo pelo teste F; CV = coeficiente de variação.

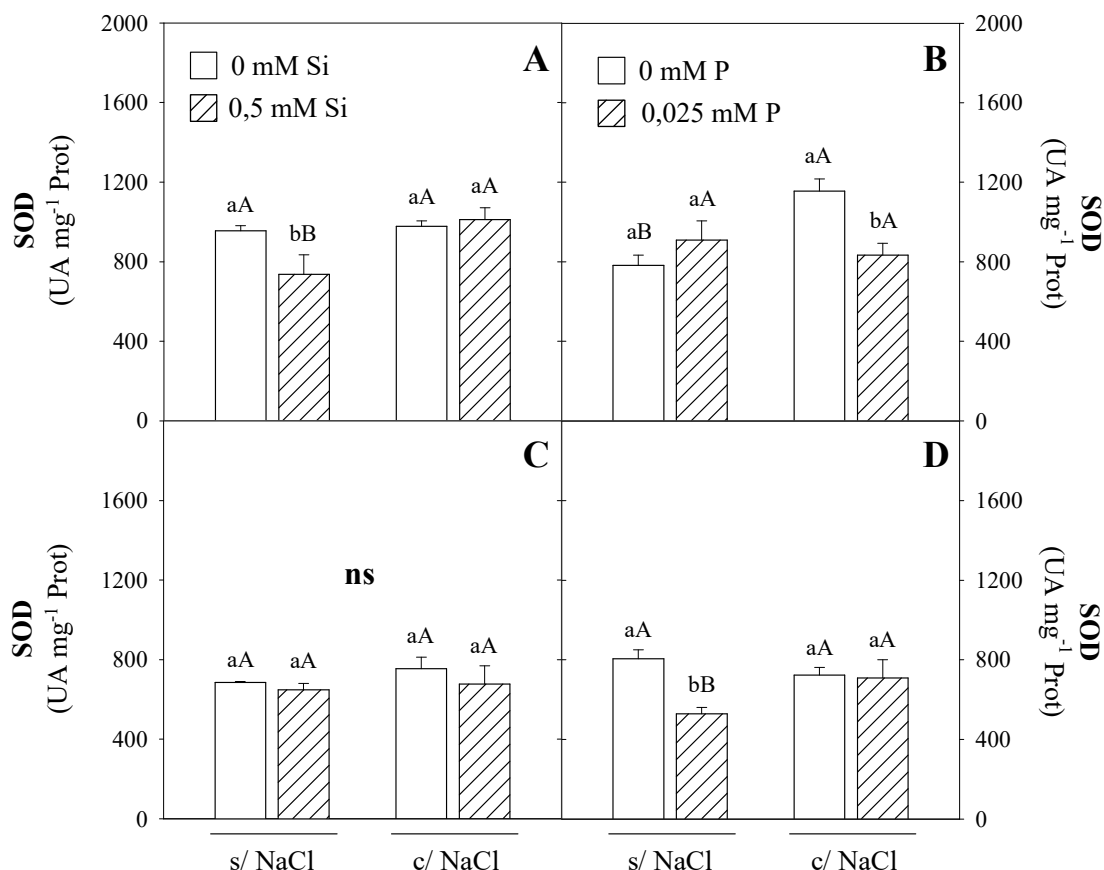
Nas raízes do genótipo CSF 20, a atividade da SOD que foi em média 482,9 UA mg<sup>-1</sup> Prot, reduziu 14,4% em resposta a adição de NaCl no meio de cultivo (resultados não apresentados). Panda e Khan (2009) em *Vigna radiata* sob estresse salino, também observaram decréscimos na atividade da SOD em raízes, caule e folhas sob concentrações de 100 e 150 mM de NaCl. A SOD é a primeira enzima a atuar no sistema antioxidante, sendo que a sua



diminuição pode estar relacionada com a fase em que a planta recebe o estresse submetido, afetando o seu metabolismo e suas funções bioquímicas.

Aumento na atividade da SOD em função da salinidade foi observada na parte aérea, entretanto, no genótipo CSF 18 esse aumento foi observado apenas na presença de Si (Figura 45A) e na ausência de P (Figura 45B) no meio de cultivo, enquanto que no genótipo CSF 20, ocorreu apenas na presença de P (Figura 45D).

**Figura 45.** Atividade da dismutase do superóxido (SOD) na parte aérea de plântulas de sorgo, genótipos CSF 18 (A e B) e CSF 20 (C e D), aos 10 dias após a semeadura, cultivadas na ausência ou presença de NaCl e em ausência ou presença de Si (A e C) ou P (B e D). Colunas seguidas por letras minúsculas iguais, em um mesmo nível de NaCl, ou por letras maiúsculas iguais, em um mesmo nível de Si ou P, não diferem significativamente entre si ( $p > 0,05$ ). As barras verticais representam o erro padrão da média e ns representa desdobramentos não significativos.



Em condição de estresse salino, o Si não teve qualquer efeito sobre a atividade da SOD na parte aérea, entretanto, verificou-se que em plântulas controle do genótipo CSF 18, esse nutriente reduziu a atividade desta enzima (Figura 45A, B). Reduções na atividade da SOD também foram verificadas em resposta a adição de P no meio de cultivo, porém no genótipo

CSF 18 essa redução ocorreu em condição de estresse salino, ao passo que no genótipo CSF 20, ocorreu em condição controle (ausência de NaCl) (Figura 45B, D).

#### 4.4.2.2 Catalase (CAT)

No presente estudo, a análise estatística demonstrou que a atividade da CAT nas raízes das plântulas dos dois genótipos de sorgo, apresentaram interação significativa tripla (salinidade  $\times$  Si  $\times$  P) (Tabela 18). Vale ressaltar que, nesse período de tempo avaliado, a não foi detectada atividade da CAT na parte aérea.

**Tabela 18** – Resumo da análise de variância dos valores médios da atividade da catalase (CAT) nas raízes (R) e na parte aérea (PA) de plântulas de sorgo, genótipos CSF 18 e CSF 20, aos 10 dias após a semeadura, cultivadas sob condições de estresse salino (S) e em presença de silício (Si) e/ou fósforo (P).

Fonte de variação	G.L.	Quadrado médio			
		CSF 18		CSF 20	
		CAT (R)	CAT (PA) <sup>1</sup>	CAT (R)	CAT (PA) <sup>1</sup>
S	1	583,96**	-	175,11**	-
Si	1	83,04 <sup>ns</sup>	-	177,78**	-
P	1	1100,72**	-	945,16**	-
S x Si	1	458,52**	-	76,38**	-
S x P	1	9,56 <sup>ns</sup>	-	731,38**	-
Si x P	1	492,80**	-	58,07**	-
S x Si x P	1	647,57**	-	225,21**	-
Resíduo	24	19,52	-	4,59	-
CV (%)		19,00	-	12,69	-

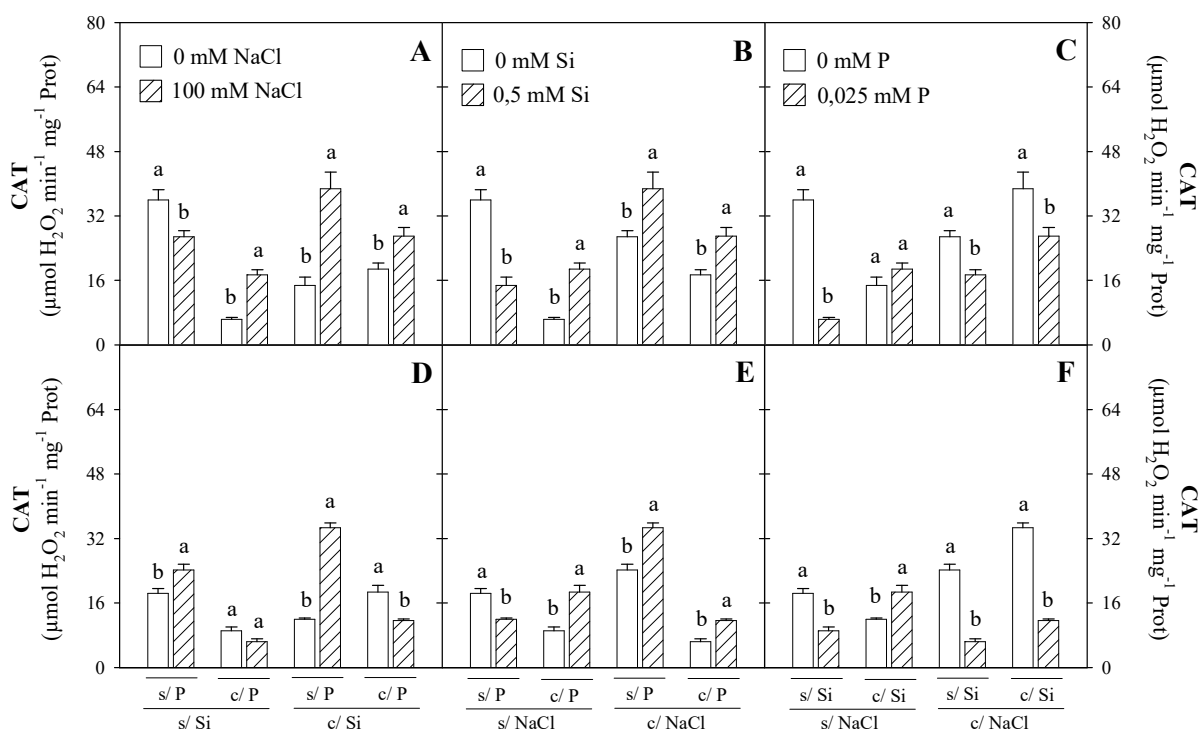
(\*\*) = significativo ( $p < 0,01$ ); (\*) = significativo ( $p < 0,05$ ); (<sup>ns</sup>) = não significativo pelo teste F; CV = coeficiente de variação; <sup>1</sup> = atividade não detecta.

Analisando o desdobramento de NaCl dentro de cada nível de Si e P, verificou-se que a atividade da CAT nas raízes do genótipo CSF 18 apresentou decréscimo em função da salinidade, quando em ausência de Si e P; contrariamente, quando na presença de Si e/ou P, a atividade apresentou acréscimos (Figura 46A). No genótipo CSF 20, a adição de NaCl no meio de cultivo promoveu acréscimos na atividade da SOD nas raízes, em ausência de P,

independentemente da presença de Si, contudo, quando na presença de Si e P, os teores foram reduzidos (Figura 46D).

Embora o aumento na atividade da CAT seja um fator determinante para reduzir os danos oxidativos (VAIDYANATHAN *et al.*, 2003; EYIDOGAN; OZ, 2007) e, conseqüentemente, aliviar os efeitos deletérios da salinidade no crescimento das plântulas, esse mesmo processo parece não ter ocorrido nas plântulas de sorgo de ambos os genótipos. Evidências disso é que o aumento da atividade da CAT nas raízes das plântulas estressadas, crescendo na presença de Si e/ou P, não resultou em um melhor crescimento radicular das plântulas desses mesmos genótipos.

**Figura 46.** Análise dos desdobramentos de NaCl, dentro de cada nível de Si e P (A e D); de Si, dentro de cada nível de NaCl e P (B e E); e de P, dentro de cada nível de NaCl e Si (C e F), para a atividade da catalase (CAT) nas raízes de plântulas de sorgo, genótipos CSF 18 (A, B e C) e CSF 20 (D, E e F), aos 10 dias após a semeadura, cultivadas na ausência ou presença de NaCl, Si ou P. Colunas seguidas por letras iguais não diferem significativamente entre si, dentro de cada tratamento ( $p > 0,05$ ). As barras verticais representam o erro padrão da média.



A adição de Si aumentou significativamente a atividade da CAT nas raízes das plântulas de sorgo de ambos os genótipos, independentemente do estresse salino e do fornecimento de P, exceto para plantas não estressadas crescendo na ausência de P, onde se observou reduções significativas de 59 e 34,7% na atividade desta enzima, no genótipo CSF 18 e CSF 20, respectivamente (Figura 46B, C). Resultados similares foram observados por Al-

Aghabary, Zhu e Shi (2004) em plantas de tomate, em que os autores verificaram decréscimos na atividade dessa enzima pela salinidade, sendo esse efeito revertido pela adição de Si.

Por outro lado, nos dois genótipos de sorgo o fornecimento de P reduziu severamente a atividade da CAT, tanto na ausência como presença de NaCl, independentemente da adição de Si, com exceção das plântulas controle nutridas com Si, em que se verificou acréscimo na atividade dessa enzima (Figura 46C, F).

#### 4.4.2.3 Peroxidase do ascorbato (APX)

A análise estatística dos dados mostrou que a atividade da APX nas raízes variou com os fatores estudados, exceto no genótipo CSF 18, em que o fator Si não teve efeito significativo sobre a atividade dessa enzima (Tabela 18). Também se pode observar que foram significativas as interações tripla (salinidade  $\times$  Si  $\times$  P) no genótipo CSF18, e duplas (salinidade  $\times$  Si; salinidade  $\times$  P; Si  $\times$  P) no genótipo CSF20. Na parte aérea, como descrito para a CAT aos 10 DAS, a atividade da APX não foi detectada.

**Tabela 19** – Resumo da análise de variância dos valores médios da atividade da peroxidase do ascorbato (APX) nas raízes (R) e na parte aérea (PA) de plântulas de sorgo, genótipos CSF 18 e CSF 20, aos 10 dias após a semeadura, cultivadas sob condições de estresse salino (S) e em presença de silício (Si) e/ou fósforo (P).

Fonte de variação	G.L.	Quadrado médio			
		CSF 18		CSF 20	
		APX (R)	APX (PA) <sup>1</sup>	APX (R)	APX (PA) <sup>1</sup>
S	1	0,32**	-	0,19**	-
Si	1	0,20**	-	3,54E-3 <sup>ns</sup>	-
P	1	0,41**	-	0,11**	-
S x Si	1	6,97E-3 <sup>ns</sup>	-	8,22E-2**	-
S x P	1	3,31E-2 <sup>ns</sup>	-	2,13E-2**	-
Si x P	1	3,10E-2 <sup>ns</sup>	-	0,24**	-
S x Si x P	1	0,30**	-	1,63E-3 <sup>ns</sup>	-
Resíduo	24	1,66E-2	-	4,03E-3	-
CV (%)		17,23	-	14,47	-

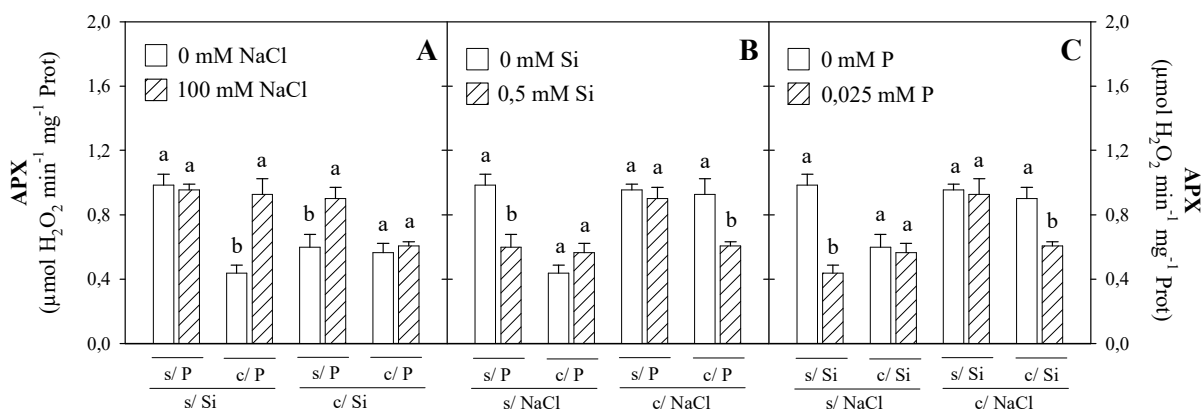
(\*\*) = significativo ( $p < 0,01$ ); (\*) = significativo ( $p < 0,05$ ); (<sup>ns</sup>) = não significativo pelo teste F; CV = coeficiente de variação; <sup>1</sup> = atividade não detectada.

A adição de NaCl no meio de cultivo, quando em ausência de Si e P, não afetou significativamente a atividade da APX nas raízes das plântulas de sorgo do genótipo CSF 18 (Figura 47A), o que difere dos resultados obtidos em tomate (SHALATA *et al.*, 2001), ervilha (*Pisum sativum*) (HERNANDEZ *et al.*, 2000), berinjela (*Solanum melongena*) (YASSAR, 2003) e beterraba (*Beta vulgaris*) (BOR *et al.*, 2003), em que foram encontrados incrementos na atividade dessa enzima quando as plantas foram expostas à salinidade.

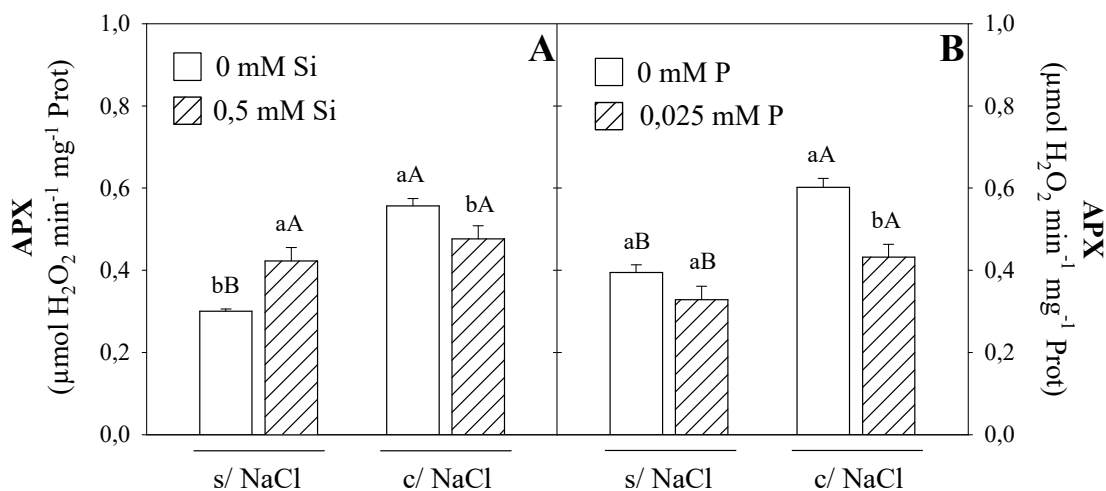
Convém salientar que, o fornecimento isolado ou associado de Si e P no meio de cultivo reduz a atividade da APX nas raízes de plântulas controle do genótipo CSF 18 (Figura 47B, C), no entanto, esse efeito foi revertido quando as plântulas foram estressadas com NaCl (Figura 47A).

No genótipo CSF 20, verificou-se que de modo geral, o estresse salino promoveu incrementos na atividade da APX nas raízes, porém esse efeito foi parcialmente inibido pelo fornecimento isolado de Si e P (Figura 48). Esses resultados sugerem que o Si ou o P podem ativar outros mecanismos de tolerância à salinidade, além do sistema antioxidante enzimático, os quais atuam na redução dos danos oxidativos nos tecidos das plântulas de sorgo. Tais mecanismos provavelmente envolvem antioxidantes não enzimáticos e/ou aumento na integridade da membrana e estrutural, que reduzem a produção de EROs.

**Figura 47.** Análise dos desdobramentos de NaCl, dentro de cada nível de Si e P (A); de Si, dentro de cada nível de NaCl e P (B) e; de P, dentro de cada nível de NaCl e Si (C), para a atividade da peroxidase do ascorbato (APX) nas raízes de plântulas de sorgo, genótipo CSF 18, aos 10 dias após a semeadura, cultivadas na ausência ou presença de NaCl, Si ou P. Colunas seguidas por letras iguais não diferem significativamente entre si ( $p > 0,05$ ), dentro de cada tratamento. As barras verticais representam o erro padrão da média.



**Figura 48.** Atividade da peroxidase do ascorbato (APX) nas raízes de plântulas de sorgo, genótipo CSF 20, aos 10 dias após a semeadura, cultivadas na ausência ou presença de NaCl e em ausência ou presença de Si (A) ou P (B). Colunas seguidas por letras minúsculas iguais, em um mesmo nível de NaCl, ou por letras maiúsculas iguais, em um mesmo nível de Si ou P, não diferem significativamente entre si ( $p > 0,05$ ). As barras verticais representam o erro padrão da média.



#### 4.4.2.4 Peroxidase do guaiacol (G-POD)

A análise estatística revelou que a atividade da G-POD das plântulas de sorgo, aos 10 DAS, não foi influenciada significativamente pela salinidade, mas verificou-se influência significativa do Si e do P, em ambos os órgãos das plântulas, exceto nas raízes do genótipo CSF 18 que não teve efeito do P (Tabela 20). A atividade desta enzima nas raízes como na parte aérea do genótipo CSF 18, também foi influenciada significativamente pela interação dupla entre Si  $\times$  P.

A G-POD também tem sido citada como uma importante peroxidase envolvida na eliminação de EROs e proteção contra os danos oxidativos (LIN; KAO, 2002), atuando efetivamente nas respostas ao estresse salino (AZEVEDO NETO *et al.*, 2006; CAVALCANTI, *et al.*, 2007; ABOGADALLAH, *et al.*, 2010; GONDIM *et al.*, 2013). No entanto, como observado neste estudo, aos 10 DAS, a G-POD não teve sua atividade alterada em resposta ao estresse salino, ou seja, esta enzima não contribuiu para reduzir os danos oxidativos em plântulas de sorgo.

Avaliando o efeito do Si e do P na atividade da G-POD, verificou-se que a resposta ao fornecimento desses nutrientes foi inversa entre os dois genótipos e os órgãos estudados. No genótipo CSF 18, verificou-se que nas raízes a atividade da G-POD foi reduzida em 32 e 41%, em resposta ao Si e P, respectivamente, enquanto que na parte aérea, o P promoveu a atividade

dessa enzima, observando aumento de 41%. Por outro lado, no genótipo CSF 20, esta enzima teve sua atividade aumentada em 39 e 23% nas raízes, em função da adição de Si e P no meio de cultivo, respectivamente; e de modo contrário, na parte aérea o Si e o P reduziram a atividade da G-POD em 38 e 58%, respectivamente (dados não apresentados).

**Tabela 20** – Resumo da análise de variância dos valores médios da atividade da peroxidase do guaiacol (G-POD) nas raízes (R) e na parte aérea (PA) de plântulas de sorgo, genótipos CSF 18 e CSF 20, aos 10 dias após a semeadura, cultivadas sob condições de estresse salino (S) e em presença de silício (Si) e/ou fósforo (P).

Fonte de variação	G.L.	Quadrado médio			
		CSF 18		CSF 20	
		G-POD (R)	G-POD (PA)	G-POD (R)	G-POD (PA)
S	1	18,75 <sup>ns</sup>	302,58 <sup>ns</sup>	7,07 <sup>ns</sup>	52,64 <sup>ns</sup>
Si	1	319,69 <sup>**</sup>	467,86 <sup>**</sup>	329,39 <sup>**</sup>	371,77 <sup>**</sup>
P	1	0,41 <sup>ns</sup>	866,05 <sup>**</sup>	145,10 <sup>**</sup>	1137,46 <sup>**</sup>
S x Si	1	0,21 <sup>ns</sup>	67,29 <sup>ns</sup>	31,26 <sup>ns</sup>	69,79 <sup>ns</sup>
S x P	1	33,99 <sup>ns</sup>	30,54 <sup>ns</sup>	32,62 <sup>ns</sup>	14,60 <sup>ns</sup>
Si x P	1	86,53 <sup>*</sup>	522,56 <sup>**</sup>	26,43 <sup>ns</sup>	22,48 <sup>ns</sup>
S x Si x P	1	105,22 <sup>ns</sup>	35,27 <sup>ns</sup>	39,36 <sup>ns</sup>	32,34 <sup>ns</sup>
Resíduo	24	17,40	14,21	8,56	18,42
CV (%)		14,09	18,78	14,72	29,50

(\*\*) = significativo ( $p < 0,01$ ); (\*) = significativo ( $p < 0,05$ ); (<sup>ns</sup>) = não significativo pelo teste F; CV = coeficiente de variação

## 5 CONCLUSÕES

- A salinidade inibiu o crescimento das plântulas de sorgo de ambos os genótipos, exceto aos 4 DAS quando o crescimento das raízes foi favorecido pela adição de NaCl no meio de crescimento;

- A presença de Si e/ou P no meio de cultivo não minimizou os danos causados pelo estresse salino nas variáveis de crescimento estudadas, no entanto, em plântulas não estressadas esses nutrientes proporcionaram maior crescimento em ambos os genótipos estudados.

- O Si no meio de crescimento não contribuiu para reduzir a absorção de  $\text{Na}^+$  em plântulas de sorgo submetidas ao estresse salino; ao contrário, sua adição na solução favoreceu a absorção de  $\text{Na}^+$ .

- Para ambos os genótipos em estudo, os solutos orgânicos tiveram seus teores aumentados, porém pouco contribuíram para minorar os efeitos da salinidade.

- A salinidade aumentou a atividade das enzimas antioxidantes estudadas, no entanto, este aumento não conferiu maior tolerância dos genótipos de sorgo CSF 18 e CSF 20 aos danos causados pelo estresse salino no crescimento.



## REFERÊNCIAS

- ABDALLA, M. M. Beneficial effects of diatomite on growth, the biochemical contents and polymorphic DNA in *Lupinus albus* plants grown under water stress. **Agriculture and Biology Journal of North America**, v. 2, n. 2, p. 207-220, 2011.
- ABOGADALLAH, G. H.; SERAG, M. M.; QUICK, P. W.; Fine and coarse regulation of reactive oxygen species in the salt tolerant mutants of barnayr grass and their wild-type parentes under salt stress. **Physiologia Plantarum**, v. 138, n. 01, p. 60-73, 2010.
- ABREU, C. E. B. **Análise fisiológica, bioquímica e proteômica de respostas ao estresse salino em plantas de feijão de corda (*Vigna unguiculata* (L.) Walp.)**. 2012. 153 f. Tese (Doutorado em Bioquímica) – Centro de Ciências, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2012.
- ABU-ROMMAN, A.; SUWWAN, M.; AL-RAMAMNEH, E. A. D. Alleviation of salt stress by phosphorus in cucumber microshoots grown on rooting medium. **World Applied Sciences Journal**, v. 22, n. 2, p. 186-191, 2013.
- AGARIE, S.; HANAOKA, N.; UENO, O. MIYAZAKI, A.; KUBOT, F.; AGATA, W. KAUFMAN, P. B. Effects of silicon on tolerance to water deficit and heat stress in rice plants (*Oryza sativa* L.), monitored by electrolyte leakage. **Plant Production Science**, v. 1, n. 2, p. 96-103, 1998.
- AHMAD, R.; ZAHEER, S.; ISMAIL, S. Role of silicon in salt tolerance of wheat (*Triticum aestivum* L.). **Plant Science**, v. 85, n. 01, p. 43–50, 1992.
- AL-AGHABARY, K.; ZHU, Z.; SHI, Q. Influence of silicone supply on chlorophyll content, chlorophyll fluorescence, and antioxidative enzyme activities in tomato plants under salt stress. **Journal of Plant Nutrition**, v. 27, n. 12, p. 2101-2015, 2004.
- AL-KARAKI, G. N.; CLARK, R. B.; SULLIVAN, C. Y. Phosphorus nutrition and water stress effects on proline accumulation in sorghum and bean. **Journal Plant Physiology**, v. 148, p. 745-751, 1996.
- ALBUQUERQUE, E. R.G.; COELHO, J. B. M.; BEZERRA NETO. E.; SOUZA, L. M. Solutos compatíveis em feijão vigna cultivado hidroponicamente sob estresse salino. **II Congresso Nacional de Feijão Caupi**. Recife- PE. Anais. 2013.
- ALI, G.; SRIVASTAVA, P. S.; IQBAL, M. Proline accumulation, protein pattern and photosynthesis in regenerants grow under NaCl stress. **Biologia Plantarum**, v. 42, n.1, p. 89-95, 1999.
- ALI, M. A. M.; RAMEZANI, A.; FAR, S. M.; SADAT, K. Application of silicon ameliorates salinity stress in sunflower (*Helianthus annus* L.) plants. **International Journal of Agriculture and Crop Sciences**, v. 6, n. 20, p. 1367-1372, 2013.

ALMODARES, A.; HADI, M. R.; KHOLDEBARIN, B.; SAMEDANI, B.; AKHAVAN KHARAZIAN, Z. The response of sweet sorghum cultivars to salt stress and accumulation of  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Cl}^-$  e  $\text{K}^+$  ions in relation to salinity. **Journal of Environmental Biology**, v. 35, p. 733-739, 2014.

ALSCHER, R. G.; DONAHUE, J. L. CRAMER, C. L. Reactive oxygen species and antioxidants: Relationship in green cells. **Plant Physiology**, v. 100, p. 224-233, 2002.

ALVAREZ-PIZARRO, J. C.; GOMES-FILHO, E.; LACERDA, C. F.; ALENCAR, N. L. M.; PRISCO, J. T. Salt-induced changes on  $\text{H}^+$ -ATPase activity, sterol and phospholipid content and lipid peroxidation of root plasma membrane from dwarf-cashew (*Anacardium occidentale* L.) seedlings. **Plant Growth Regulation**, v. 59, p. 125-135, 2009.

ALVES, F. A. L.; FERREIRA-SILVA, S. L.; SILVEIRA, J. A. G.; PEREIRA, V. L. A. Efeito do  $\text{Ca}^{2+}$  externo no conteúdo de  $\text{Na}^+$  e  $\text{K}^+$  em cajueiros expostos a salinidade. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v. 6, n. 4, p. 602-608, 2011.

AMARAL, S. R.; LIRA, M. A.; TABOSA, J. N.; SANTOS, M. V. F. S; MELLO, A. C. L.; SANTOS, V. F. Comportamento de linhagens de sorgo forrageiro submetidas a déficit hídrico sob condições controlada. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 38, p. 973-979, 2003.

AMORIN, A. V.; GOMES-FILHO, E.; BEZERRA, M. A.; PRISCO, J. T.; LACERDA, C. F. Respostas fisiológicas de plantas adultas de cajueiro anão precoce à salinidade. **Revista Ciência Agronômica**, v. 42, p. 113-121, 2010.

ANDRADE, S. M. G. **Efeito do Ca na germinação, composição mineral e crescimento de arroz (*Oryza sativa* L.) cultivado em solução de NaCl**. 1989. 94 f. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas) - Centro de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 1989.

APEL, K.; HIRT, H. Reactive oxygen species: metabolism, oxidative stress, and signal transduction. **Annual Review of Plant Biology**, v. 55, p. 373-399, 2004.

AQUINO, A. J. S.; LACERDA, C. F.; GOMES-FILHO, E. Crescimento, partição de matéria seca e retenção de  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$  e  $\text{Cl}^-$  em dois genótipos de sorgo irrigados com águas salinas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 31, n. 5, p. 961-971, 2007.

ARAÚJO, G. S. **Estudos fisiológicos e bioquímicos em dois cultivares de feijão-de-corda com tolerância diferencial à salinidade, submetidos a doses crescentes de NaCl**. 2011. 59 p. Monografia (Graduação em Agronomia) – Centro de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2012.

ARAÚJO, E. B. G.; SÁ, F. V. S.; OLIVEIRA, F. A.; SOUTO, L. S.; PAIVA, E. P.; SILVA, M. K. N.; MESQUITA, E. F.; BRITO, M. E. B. Crescimento inicial e tolerância de cultivares de meloeiro à salinidade da água. **Revista Ambiente & Água**, v. 11, n. 2, p. 462-471, 2016.

ASHRAF, M. The effects of NaCl on water relations, chlrophyll, and protein and prolina contents of two cultivars of blackgram (*Vigna mungo* L.). **Plant Soil**, v. 119, p. 205-210, 1989.

ASHRAF, M. Organic substances responsible for salt tolerance in *Eruca sativa*. **Biologia Plantarum**, v. 36, p. 255-259, 1994.

ASHRAF, M.; ZAFAR, R.; ASHRAF, M. Y. Time-course changes in the inorganic and organic components of germinating sunflower achenes under salt (NaCl) stress. **Flora**, v. 198, p. 26-36, 2003.

ASHRAF, M.; HARRIS, P. J. C. Potential biochemical indicators of salinity tolerance in plants. **Plant Science**, v. 166, p. 3-16, 2004.

ASHRAF, M.; FOOLAND, M. R. Roles of glycine betaine and proline in improving plant abiotic stress resistance. **Environmental and Experimental Botany**, v. 59, n. 2, p. 206-216, 2007.

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 Soil**, v. 326, n. 1, p. 381-391, 2010.

ASHRAF, M.; HARRIS, P. J. C. Photosynthesis under stressful environments. **Photosynthetica**, v. 51, p. 601-639, 2013.

AWAD, A. S.; EDWARDS, D. G.; CAMPBELL, L. C. Phosphorus enhancement of salt tolerance of tomato. **Crop Science**, v. 30, p. 23-128, 1990.

AYRES, R. S.; WESTCOT, D. W. **A qualidade da água na agricultura**. Tradução de GHEYI, H. R.; MEDEIROS, J. F.; DAMASCENO, F. A. V. Campina Grande: UFPB, 1999. 153p.

AZEVEDO NETO, A. D.; PRISCO, J. T.; ENÉAS-FILHO, J.; ABREU, C. E. B.; GOMES-FILHO, E. Effect of salt stress on plant growth, stomatal response and solute accumulation of different maize genotypes. **Brazilian Journal of Plant Physiology**, v. 16, n.1, p. 31-38, 2004.

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

AZEVEDO NETO, A. D.; GOMES-FILHO, E.; PRISCO, J. T. Salinity and oxidative stress. *In*: KHAN, N.A.; SINGH, S. (Org). **Abiotic Stress and Plant Responses**. Aligarh: IK International Group, 2008. p. 58-82.

BANZATTO, D. A.; KRONKA, S. N. **Experimentação agrícola**. 4. ed. Jaboticabal: FUNEP, 2006. 237 p.

BARBER, S. A. **Soil nutrient bioavailability: A mechanistic approach**. 2. ed. New York: John Wiley & Sons, 1995, 414p.

BARBOSA FILHO, M. P.; SNYDER, G. H.; FAGERA, N. K.; DANNOFF, L. E.; SILVA, O. F. Silicato de cálcio como fonte de silício para o arroz de sequeiro. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 25, p. 325-330, 2001.

BARROSO, C. M.; FRANKE, L. B.; BARROSO, I. B. Substrato e luz na germinação das sementes de rainha-do-abismo. **Horticultura Brasileira**, v. 28, n. 2, p. 236-240, 2010.

BARROW, N. J. The description of phosphate adsorption curves. **European Journal of Soil Science**, v. 29, n. 4, p. 447-462, 1978.

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

BAYAT, H.; ALIREZAIE, M.; NEAMATI, H.; SAADABAD, A. A. Effect of silicon on growth and ornamental traits of salt-stressed calendula (*Calendula officinalis* L.). **Journal of Ornamental Plants**, v. 3, n. 4, p. 207-214, 2013.

BEERS, Jr R. F.; SIZER, W. A spectrophotometric method for measuring the breakdown of hydrogen peroxide by catalase. **Journal of Biological Chemistry**, v. 195, n. 1, p. 133-140, 1952.

BEZERRA, A. K.; LACERDA, C. F.; HERNADEZ, F. F. F.; SILVA, F. B.; GHEYI, H. R. Rotação cultural feijão caupi/milho utilizando-se águas de salinidades diferentes. **Revista Ciência Rural**, v. 40, n. 5, p. 1075-1082, 2010.

BINZEL, M. L.; HESEGAWA, P. M.; HANDA, A. K.; BRESSAN, R. A. Adaptation of tobacco cells to NaCl. **Plant Physiology**, v. 79, p. 118-125, 1985.

BLUMWALD, E.; AHARON, G. S.; APSE, M. P. Sodium transport in plant cells. **Biochimica et Biophysica Acta – Biomembranes**, v. 1465, n. 1-2, p. 140-151, 2000.

BONFIM-SILVA, E. M.; KROTH, B. E.; SILVA, T. J. A.; FREITAS, D. C. Disponibilidade hídricas no desenvolvimento inicial de sorgo e pH do solo. **Enciclopédia Biosfera**, Centro Científico Conhecer, v. 8, n. 14, p. 397-407, 2012.

BOR, M.; ÖZDEMİR, F.; TÜRKAN, I. The effect of salt stress on lipid peroxidation and antioxidants in leaves of sugar beet *Beta vulgaris* L. and wild beet *Beta maritima* L. **Plant Science**, v. 164, p. 74-77, 2003.

BOSCO, M. R. O.; OLIVEIRA, A. B.; HERNANDEZ, F. F. F.; LACERDA, C. F.; Efeito do NaCl sobre o crescimento, fotossíntese e relações hídricas de plantas de berinjela. **Revista Ceres**, v. 56, n. 3, p. 296-302, 2009.

BRADFORD, M. M. A rapid sensitive method for the quantification of microgram quantities of protein utilizing the principle of dye binding. **Analytical Biochemistry**, v. 72, p. 248-254, 1976.

BRASIL, Ministério da Agricultura e da Reforma Agrária. **Regras para análise de sementes**. Brasília: SNDA/DNDV/CLAV, 2009. 365p.

BRAY, E. A.; BAILEY-SERRES, J.; WERETILNYK, E. Responses to abiotic stress. In: BUCHANAN, B.; GRUISSSEN, W.; JONES, E. (Ed.). **Biochemistry and Molecular Biology of Plants**. Rockville: American Society of Plant Physiologists, 2000. p. 1158-1203.

BROU, Y. C.; ZÉZÉ, A.; DIOUF, O.; EYLETTERS, M. Water stress induces overexpression of superoxide dismutase that contribute to the protection of cowpea plants against oxidative stress. **African Journal of Biotechnology**, v. 6, n. 17, p. 1982-1986, 2010.

BUCKERIDGE, M. S.; AIDAR, M. P. M.; SANTOS, H. P.; TINÉ, M. A. S. Mobilização de reservas. In: FERREIRA, A. G.; BORGHETTI, F. (Org.). **Germinação: do básico ao aplicado**. Porto Alegre: Artmed, 2004. p. 163-188.

CAMARGO, M. S.; KORNDORFER, G. H.; CORRÊA, G. F. Características físicas e disponibilidade de silício em solos sob vegetação de cerrado. In: REUNIÃO BRASILEIRA DE FERTILIDADE DO SOLO E NUTRIÇÃO DE PLANTAS, 25; REUNIÃO BRASILEIRA SOBRE MICORRIZAS, 9; SIMPÓSIO BRASILEIRO DE MICROBIOLOGIA DO SOLO, 7; REUNIÃO BRASILEIRA DE BIOLOGIA DO SOLO, 4., 2002, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: SBCS, 2002. 1 CD-ROM.

CARDOSO, I. M.; KUYPER, T. W. Mycorrhizae and tropical soil fertility. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v. 116, p. 72-84, 2006.

CAVALCANTI, F. R.; LIMA, J. P. M.; FERREIRA-SILVA, S. L.; VIÉGAS, R. A.; SILVEIRA, J. A. G. Roots and leaves display contrasting oxidative response during salt stress and recovery in cowpea. **Journal of Plant Physiology**, v. 164, p. 591-600, 2007.

CENTENO, C. R. M.; SANTOS, J. B.; XAVIER, D. A.; AZEVEDO, C. A. V.; GHEYI. Componentes de produção do girassol Embrapa 122-V2000 sob salinidade da água e adubação nitrogenada. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 18 (Suplemento), p. 539-545, p. 2014.

CERDA, A.; BINGHAM, F. T.; HOFFMANN, G. J. Interactive Effect of Salinity and Phosphorus on Sesame. **Soil Science Society of America Journal**, v. 41, p. 915-918, 1977.

CHAGAS, R. C. S. **Avaliação de fontes de silício para as culturas do arroz e milho**. 2004. 280 f. Tese (Doutorado em Agronomia) - Centro de Energia Nuclear na Agricultura, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2004.

CHANG, B.; YANG, L.; CONG, W.; ZU, Y.; TANG, Z. The improved resistance to high salinity induced by thehalose is associated with ionic regulation and osmotic adjustment in *Catharanthus roseus*. **Plant Physiology and Biochemistry**, v. 77, p. 140-148, 2014.

CHAVAN, P. D.; KARADGE, B. A. Growth, mineral nutrition, organic constituents and rate of photosynthesis in *Sesbania grandiflora* L. growth under saline conditions. **Plant and Soil**, v. 93, p. 395-404, 1986.

CHEN, Z.; NEWMAN, I.; ZHOU, M.; MENDHAM, N.; ZHANG, G.; SHABALA, S. Screening plants for salt tolerance by measuring K<sup>+</sup> flux: a case study for barley. **Plant, Cell & Environment**, v. 28, n. 10, p. 1230-1246. 2005.

CHIBA, Y.; MITANI, N.; YAMAJI, N.; MA, J. F. Hvls1 is a silicon influx transporter in barley. **Plant Journal**, v. 57, p. 810-818. 2009.

CHINNUSAMY, V.; JAGENDORF, A.; ZHU, J-K. Understanding and improving salt tolerance in plants. **Crop Science**, v. 45, p. 437-448, 2005.

CHIRAZ, C. H.; AFEF, H. N.; CARRAYOL, H. A.; HABIB, G. M.; HOUDA, G. Long-term salt stress responsive growth, carbohydrate metabolism and proline and anti-stress enzymes in *Nicotina tabaccum*. **African Journal of Biotechnology**, v. 11, n. 32, p. 8117-8126, 2012.

CICEK, N.; CAKIRLAR, H. Changes in some antioxidant enzyme activities in six soybean cultivars in response to long-term salinity at two different temperatures. **General and Applied Plant Physiology**, v. 34, p. 267-280, 2008.

COELHO, D. S. **Influência da salinidade nos aspectos nutricionais e morfofisiológicos de genótipos de sorgo forrageiro**. 2013. 85 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, Universidade Federal do Vale do São Francisco, Juazeiro, 2013.

CONAB - COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Perspectivas para a Agropecuária safra 2015/2016**. Brasília: CONAB, v. 3, p. 119-128, 2016a. Disponível em: <[http://www.conab.gov.br/OlalaCMS/uploads/arquivos/15\\_09\\_24\\_11\\_44\\_50\\_perspectivas\\_agropecuaria\\_2015-16\\_-\\_produtos\\_verao.pdf](http://www.conab.gov.br/OlalaCMS/uploads/arquivos/15_09_24_11_44_50_perspectivas_agropecuaria_2015-16_-_produtos_verao.pdf)>. Acesso em: 04 fev. 2016.

CONAB - COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Acompanhamento da safra de grãos safra 2015/2016 quinto levantamento**. Brasília: CONAB, v. 3, n. 2, p. 148-149, 2016b. Disponível em: <[http://www.conab.gov.br/OlalaCMS/uploads/arquivos/16\\_02\\_04\\_11\\_21\\_34\\_boletim\\_graos\\_fevereiro\\_2016\\_ok.pdf](http://www.conab.gov.br/OlalaCMS/uploads/arquivos/16_02_04_11_21_34_boletim_graos_fevereiro_2016_ok.pdf)>. Acesso em: 04 fev. 2016.

CONCEIÇÃO, S. S. **Aclimação de planta de girassol à salinidade induzida por silício**. 2015. 78 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia), Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2015.

CORRÊA, N. S. **Qualidade fisiológica e bioquímica de cultivares de cebola submetida a concentrações de cloreto de sódio**. 2012. 46 p. Dissertação (Mestrado Fisiologia Vegetal) – Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 2012.

COSTA, P. H. A.; SILVA, J. V.; BEZERRA, M. A.; ENÉAS-FILHO, J. PRISCO, J. T.; GOMES-FILHO, E. Crescimento e níveis de solutos orgânicos e inorgânicos em cultivares de *Vigna unguiculata* submetidos à salinidade. **Revista Brasileira de Bôtanica**, v. 26, n. 3, p. 289-297, 2003.

COSTA, P. H. A.; NETO, A.; BEZERRA, M.; PRISCO, J. T.; GOMES-FILHO, E. Antioxidant-enzymatic system of two sorghum genotypes differen in salt tolerance. **Brazilian Journal Plant Physiology**, v. 17, p. 353-361, 2005.

CRUSCIOL, C. A. C.; PULZ, A. L.; LEMOS, L. B.; SORATTO, R. P.; LIMA, G. P. P. Effects of silicon and drought stress on tuber yield and leaf biochemical characteristics in potato. **Crop Science**, v. 49, n. 3, p. 949-954, 2009.

CRUZ, J. L.; PELACANI, C. R.; SOARES FILHO, W. S.; CASTRO NETO, M. T.; COELHO, E. F.; DIAS, A. T.; PAES, R. A. Produção e partição de matéria e abertura estomática do limoeiro cravo submetido a estresse salino. **Revista Brasileira de Fruticultura**, v. 25, n. 3, p. 528–531, 2003.

CUNHA, P. C.; MENDES, B. S. S.; OLIVEIRA, FILHO, R. A.; CAMARA, T. R.; WILLADINO, L. G. Crescimento, síntese de solutos orgânicos e equilíbrio iônico de plântulas de pinhão manso sob estresse salino. **Revista Caatinga**, v. 26, n. 3, p. 46-52, 2013.

CURRIE, H. A.; PERRY, C. C. Silica in plants: biological, biochemical and chemical studies. **Annals of Botany**, v. 100, p. 1383-1389. 2007.

DAYANANDAM, P.; KAUFFMAN, P. B.; FRANKIN, C. I. Detection of silica in plant. **American Journal of Botany**, v. 70, p. 1079-1084, 1983.

DECHEN, A. R.; NACHTIGAL, G. R. Elementos requeridos à nutrição de plantas In: NOVAIS, R. F.; ALVAREZ, V. V. H.; BARROS, N. F.; FONTES, R. L. F.; CANTARUTTI, R. B.; NEVES, J. C. L. (Eds). **Fertilidade do Solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo - UFV, 2007. cap. 03, p. 91-132.

DEINLEIN, U.; STEPHAN, A.B.; HORIE, T.; LUO, W.; XU, G.; SCHROEDER, J. I. Plant salt-tolerance mechanisms. **Trends in Plant Science**, v. 6, p. 371-9, 2014.

DEMIRAL, T.; TURKAN, I. Comparative lipid peroxidation, antioxidant defense systems and proline content in roots of two rice cultivars differing in salt tolerance. **Environmental and Experimental Botany**, v. 53, n. 3, p. 247-257, 2005.

DELL'ÁQUILLA, A. Water uptake and protein synthesis in germinating wheat embryos under osmotic stress of polyethylene glycol. **Annals of Botany**, v. 69, n. 2, p. 167-171, 1992.

DIAS, N. S.; BLANCO, F. F. Efeitos dos sais no solo e na planta. In: GHEYI, H. R.; DIAS, N. S.; LACERDA, C. F. (Org.). **Manejo da salinidade na agricultura: estudos básicos e aplicados**. Fortaleza: INCTSal, 2010. p. 127-141.

DINAKAR, C.; DJILIANOV, D.; BARTELS, D. Photosynthesis in desiccation tolerant plants: energy metabolism and antioxidative stress defense. **Plant Science**, v. 182, p. 29-41, 2012.

DONATELLI, M.; HAMMER, G. L.; VANDERLIP, R. L.; Genotype and water timitation effects on phenology, growth and transpiration efficiency in grain sorghum. **Crop Science**, v. 32, p. 781-786, 1992.

DLUZNIEWSKA, P.; GESSLER, A.; DIETRICH, H.; SCHNITZLER, J. P.; TEUBER, M.; RENNENBERG, H. Nitrogen uptake and metabolism in *Populus x canescens* as affected by salinity. **New Phytologist**, v. 173, n. 2, p. 279-293, 2007.

DUBEY, R. S. Metal toxivity, oxidative stress and antioxidative defense system in plants. In: GUPTA, S. D. **Reactive oxygen species and antioxidants in higher plants**. Enfield: Science Publishers, 2011. Chap. 9p. 1788-203.

DUBOIS, M.; GILLES, K. A.; HAMILTON, J. K.; REBERS, P. A.; SMITH, F. Colorimetric method for determination of sugars and related substances. **Analytical Chemistry**, v. 28, p. 350-356, 1956.

EDREVA, A. Generation and scavenging of reactive oxygen species in chloroplasts: a submolecular approach. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v. 106, p. 119-133, 2005.

EL-BAKY, A.; HANAA, H.; AMAL, M. A.; HUSSEIN, M. M. Influence of salinity on lipid peroxidation, antioxidant enzymes and electrophoretic patterns of protein and isoenzymas in leaves of some onion cultivars. **Asian Journal of Plant Sciences**, v. 2, p. 1220-1227, 2003.

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

EPSTEIN, E. Silicon: its manifold role in plants. **Annals Applied Biology**, v. 155, n. 2, p. 155-160, 2009.

ERRABIL, T.; GANDONOU, C. B.; ESSALMANI, H.; ABRINI, J.; IDAOMAR, M.; SENHAJI, N. S.; Effects of NaCl and mannitol induced stress on sugarcane (*Saccharum sp.*) callus cultures. **Acta Physiologiae Plantarum**, v. 29, p. 95-102, 2007.

EYDOGAN, F.; OZ, M. T. Effect of salinity on antioxidant responses of chickpea seedlings. **Acta Physiologiae Plantarum**, v. 29, p. 485-493, 2007.

FAO - FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS. **Agriculture Data**. 2012. Disponível em: <<http://faostat.fao.org/site/339/default.aspx>>. Acesso em: 09 fev. 2015.

FARSHIDI, M.; ABDOLZADEH, A.; SADEGHIPOUR, H. R. Silicon nutrition alleviates physiological disorders imposed by salinity in hydroponically grown canola (*Brassica napus* L.) plants. **Acta Physiologiae Plantarum**, v. 34, n. 5, p. 1779-1788, 2012.

FASSBENDER, H. W. **Química de suelos: Com énfasis em suelos de America Latina**. San José: Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura, 1994. 422p.

FEIJÃO, A. R.; SILVA, J. C. B.; MARQUES, E. C.; PRISCO, J. T.; GOMES-FILHO, E. Efeito da nutrição de nitrato na tolerância de plantas de sorgo sudão à salinidade. **Revista Ciência Agronômica**, v. 42, p. 675-683, 2011.

FEIJÃO, A. R.; MARQUES, E. C.; SILVA, J. C. B.; LACERDA, C. F.; PRISCO, J. T.; GOMES-FILHO, E. Nitrato modula os teores de cloreto e compostos nitrogenados em plantas de milho submetidas à salinidade. **Bragantia**, v. 72, n.1, p. 10-19, 2013.

FERREIRA, D.F. Sisvar: A computer statistical analysis system. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 35, n. 6, p. 1039-1042, 2011.

FLOWERS, T. J. Improving crop salt tolerance. **Journal of Experimental Botany**, v. 55, n. 396, p. 307-319, 2004.



FORMIGA, M. S.; FERREIRA, A. C.; TRAVASSOS, K. D.; BARACUHY, J. G. V.; LIMA, V. L. A.; DANTAS, J. P. A marcha de absorção de nutrientes (NPK) no sorgo granífero sacarino. **Revista Educação Agrícola Superior**, v. 27, n. 1, p. 3-12, 2012.

FOYER, C. H.; HALLIWELL, B. The presence of glutathione and glutathione reductase on chloroplasts: a proposed role in ascorbic acid metabolism. **Planta**, v. 133, p. 21-25, 1976.

FREEDEN, A. L.; RAO, I. M.; TERRY, N. Influence of phosphorus nutrition on growth carbon partitioning in *Glycine max*. **Plant Physiology**, v. 89, p. 225-230, 1989.

FREITAS, V. S. **Aspectos fisiológicas e bioquímicos relacionados com a tolerância a salinidade em algodão, feijão-de-corda e sorgo**. 2010. 97 p. Dissertação (Mestrado em Bioquímica) – Centro de Ciências, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2010.

FREITAS, V. S.; ALENCAR, N. L. M.; LACERDA, C. F.; PRISCO, J. T.; GOMES FILHO, E. Changes in physiological and biochemical indicators associated with salt tolerance in cotton, sorghum and cowpea. **African Journal of Biochemistry Research**, v. 5, n. 8, p. 264-271, 2011.

FURLANI, A. M. C. Nutrição mineral. In: KERBAUY, G. B. **Fisiologia Vegetal**. Rio de Janeiro: Guanabara Koogan, 2004. p. 40-75.

GAO, X.; ZOU, C.; WANG, L.; ZHANG, F. Silicon improves water use efficiency in maize plants. **Journal of Plant Nutrition**, v. 27, n. 8, p. 1457-1470, 2004.

GARA, L.; LOCATO, V.; DIRPIERRO, S.; PINTO, M. C. Redox homeostasis in plants. The challenge of living with endogenous oxygen production. **Respiratory Physiology & Neurobiology**, v. 173, supplement, p. S13-S19, 2010.

GATIBONI, L. C. **Disponibilidade de formas de fósforo do solo às plantas**. 2003. 247 f. Tese (Doutorado em Agronomia) – Centro de Ciências Rurais, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2003.

GHOULAM, C.; FOURSRY, A.; FARES, K. Effects of salt stress on growth, inorganic ions and proline accumulation in relation osmotic adjustment in five sugar beet cultivar. **Environmental and Experimental Botany**, v. 47, p. 39-50, 2002.

GIANNOPOLITIS C. N.; RIES S. K.; Superoxide dismutases: I Occurrence in higher plants. **Plant Physiology**, v. 59, n. 2, p. 309-314, 1977.

GILL, S. S.; TUTEJA, N. Reactive oxygen species and antioxidant machinery in abiotic stress tolerance in crop plants. **Plant Physiology and Biochemistry: PPB / Sciété Française de Physiologie Végétale**, v. 48, n. 12, p. 909-930, 2010.

GILL, D. D.; ANJUM, N.; HASANUZZAMAN, A.; GILL, M. R.; TRIVEDI, D. K.; AHMAD, I.; PEREIRA, E.; TUTEJA, N. Glutathione reductase: A boon in disguise for plant abiotic stress defense operations. **Plant Physiology and Biochemistry**. Elsevier, 2013.

GOEDERT, W. J.; LOBATO, E. Avaliação agronômica de fosfatos em solo de cerrado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 8, p. 97-102, 1984.

GONDIM, F. A.; MIRANDA, R. S.; GOMES-FILHO, E. Enhanced salt tolerance in maize induced by leaf spraying is associated with improved gas exchange rather than with non-enzymatic antioxidant system. **Theoretical and Experimental Plant Physiology**, v. 25, p. 251-260, 2013.

GONG, H. J.; RANDALL, D. P.; FLOWERS, T. J. Silicon deposition in the root reduces sodium uptake in rice (*Oryza sativa* L.) seedling by reducing by-pass flow. **Plant, Cell and Environment**, v. 29, n. 10, p. 1970-1979, 2006.

GRANT, C. A.; PLATEN, D. N.; TOMAZIEWICZ, D. J.; SHEPPARD, S. C. **A importância do fósforo no desenvolvimento inicial da planta**. Informações Agrônomicas, n. 95, 2001.

GRATTAN, S. R.; MAAS, E. V. Interactive effects of salinity and substrate phosphate on soybean. **Agronomy Journal**, v. 76, p. 668-676, 1984.

GRATTAN, S. R.; GRIEVE, C. M. Salinity-mineral nutrient relations in horticultural crops. **Scientia Horticulturae**, v. 78, n. 01/04, p. 127-157, 1999.

GREENWAY, H.; MUNNS, R. Mechanisms of salt tolerance in nonhalophytes. **Annual Review of Plant Physiology**, v. 31, p. 149-190, 1980.

GUNES, A.; INAL, A.; BAGCI, E. G.; COBAN, S. Silicon-mediated changes on some physiological and enzymatic parameters symptomatic of oxidative stress in barley grown in sodic-B toxic soil. **Journal of Plant Physiology**, v. 164, n. 6, p. 807-811, 2007a.

GUNES, A.; PILBEAM, D. J.; INAL, A.; BAGCI, E. G.; COBAN, S. Influence of silicon on antioxidant mechanisms and lipid peroxidation in chickpea (*Cicer arietinum* L.) cultivars under drought stress. **Journal of Plant Interactions**, v. 2, p. 105-113, 2007b.

GUNES, A.; PILBEAM, D. J.; INAL, A.; COBAN, S. Influence of silicon on sunflower cultivars under drought stress. I: Growth, antioxidant mechanisms, and lipid peroxidation. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v. 39, n. 13-14, p. 1885-1903, 2008.

GUNTZER, F.; KELLER, C.; MEUNIER, J. D. Benefits of plant silicon for crops: A review. **Agronomy for Sustainable Development**, v. 32, n. 1, p. 201-213, 2012.

GUO, Y.; LIU, L.; ZHAO, J.; BI, Y. Use of silicon oxide and sodium silicate for controlling *Trichothecium roseum* postharvest rot in Chinese cantaloupe (*Cucumis melo* L.). **International Journal of Food Science and Technology**, v. 42, p. 1012-1018, 2007.

HAGHIGHI, M.; PESSARAKLI, M. Influence of silicon and nano-silicon on salinity tolerance of cherry tomatoes (*Solanum lycopersicum* L.) at early growth stage. **Scientia Horticulturae**, v. 161, p. 111-117, 2013.

HAJLAOUI, H.; EL AYEB, N.; GARREC, J. P.; DENDEN, M. Differential effects of salt stress on osmotic adjustment and solutes allocation on the basis of root and leaf tissue senescence of two silage maize (*Zea mays* L.) varieties. **Industrial Crops and Products**, v. 31, n. 1, p. 122-130, 2010.

HAMILTON, E. W.; HECKATHORN, S. A. Mitochondrial adaptation to NaCl: Complex I is protected by anti-oxidants and small heat shock proteins, whereas complex II is protected by proline and betaine. **Plant Physiology**, v. 126, n. 3, p. 1266-1274, 2001.

HANSON, A. D.; HITS, E. D. Metabolic responses of mesophytes to plant water deficits. **Annual Reviews Plant Physiology**, v. 33, 163-204, 1982.

HARE, P. D.; CRESS, W. A. Metabolic implications of stress-induced proline accumulation in plants. **Plant Growth Regulation**, v. 21, n. 2, p. 79-102, 1997.

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

HASEGAWA, P. M.; BRESSAN, R. A.; ZHU, J-K.; BOHNERT, H. L. Plant cellular and molecular responses to high salinity. **Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology**, v. 51, p. 463-499, 2000.

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**, v. 56, n. 2, p. 244-253, 2010.

HATTORI, T.; INANAGA, S.; TANIMOTO, E.; LUX, A.; LUXOVÁ, M.; SUGIMITO, Y. Silicon-induced changes in viscoelastic properties of sorghum root cell walls. **Plant Cell Physiology**, v. 44, n. 7, p. 743-749, 2003.

HEIDARI, M. Antioxidant activity and osmolyte concentration of sorghum (*Sorghum bicolor*) and wheat (*Triticum aestivum*) genotypes under salinity stress. **Asian Journal Plant Science**, v. 8, p. 240-244, 2009.

HELDT, H. W.; HELDT, F. Phenylpropanoids comprise a multitude of plant secondary metabolites and cell wall components. In: HELDT, H. W. **Plant Biochemistry**. San Diego: Academic, 2005. p. 425-454.

HERNANDEZ, J. A.; JIMENEZ, A.; MULLINEAUX, P.; SEVILLA, F. Tolerance of pea (*Pisum sativum* L.) to long-term salt stress is associated with induction of antioxidant defences. **Plant, Cell and Environmental**, v. 23, p. 853-862, 2000.

HOLANDA, J. S.; AMORIM, J. R. A.; FERREIRA NETO, M.; HOLANDA, A. C. Qualidade da água para irrigação. In: GHEYI, H. R.; DIAS, N. S.; LACERDA, C. F. **Manejo da salinidade na agricultura: Estudos básicos e aplicados**. Fortaleza: INCTSal, 2010. p. 43-61.

HORIGUCHI, T. Mechanism of manganese toxicity and tolerance of plants. IV. Effects of silicon on alleviation of manganese toxicity of rice plants. **Soil Science Plant Nutrition**, v. 34, p. 65-73, 1988.

HOROWITZ, N.; FREITAS, T. M. S. Estratégias de manejo do Fósforo em Agroecossistemas. In: FANCELLI, A. L.; DOURADO NETO, D. **Milho: Tecnologia & Produção**. Piracicaba: ESALQ/USP/LVP, 2005. p. 83-92.

IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Levantamento Sistemático da Produção Agrícola: Pesquisa Mensal de Previsão das safras agrícolas no ano civil**. Rio de Janeiro, v. 29, n. 01 p. 1-83, jan. 2015. Disponível em: <ftp://ftp.ibge.gov.br/Producao\_Agricola/Levantamento\_Sistemático\_da\_Producao\_Agricola\_%5Bmensal%5D/Fasciculo/lspa\_201501.pdf>. Acesso em: 04 fev. 2016.

ISLÃ, R.; ARAGUÉS, R. Yield and plant ion concentrations in maize (*Zea mays* L.) subject to diurnal and nocturnal saline sprinkler irrigations. **Field Crop Research**, v. 116, p. 175-183, 2010.

JONES, L. H. P.; HANDRECK, K. A. Silica in soils, plants, and animals. **Advances in Agronomy**, v. 19, p. 107-149. 1967.

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

KAFI, M.; NABATI, J.; MASOUMI, A.; MOHAMMAD, Z. M. Effect of salinity and silicon application on oxidative damage of sorghum [*Sorghum bicolor* (L.) Moench.]. **Pakistan Journal of Botany**, v. 43, p. 2457-2462, 2011.

KAMENIDOU, S.; CAVINS, T. J.; MAREK, S. Silicon supplements affects horticultural traits of aluminium in *Sorghum bicolor* (L.) Moench: Growth analysis and x-ray microanalysis. **Annals of Botany**, v. 72, n. 5, p. 389-400, 2008.

KANG, H. M.; SALTVEIT, M. E. Activity of enzymatic antioxidant defense systems in chilled and heat shocked cucumber seedling radicles. **Physiologia Plantarum**, v. 113, p. 548-556, 2001.

KANT, S.; KANT, P.; LIPS, H.; BARAK, S. Partial substitution of  $\text{NO}_3^-$  by  $\text{NH}_4^+$  fertilization increases ammonium assimilating enzyme activities and reduces the deleterious effects of salinity on the growth of barley. **Journal of Plant Physiology**, v. 164, n. 3, p. 303-311, 2007.

KARUPPANAPANDIAN, T.; MOON, J. C.; KIM, C.; MANOHARAN, K.; KIM, W. Reactive oxygen species in plants: their generation, signal transduction, and scavenging mechanisms. **Australian Journal of Crop Science**, v. 5, n. 6, p. 709, 2011.

KAYA, C.; TUNA, L. HIGGS, D. Effect of silicon on plant growth and mineral nutrition of maize grown under water-stress conditions. **Journal of Plant Nutrition**, v. 29, n. 8, p. 1469-1480, 2006.

KEMPA, S.; KRASENSKY, J.; DAL SANTO, S.; KOPKA, J.; JONAK, C. A central role of abscisic acid in stress-regulates carbohydrate metabolism. **Plos One**, v. 3, n. 12, p. 39-35, 2008.

KEREPESI, I.; GALIBA, G. Osmotic and salt stress – induced alteration in soluble carbohydrate content in wheat seedling. **Crop Science**, v. 40, p. 482-487, 2000.

KEUTGEN, A. J.; PAWELZIK, E. Impacts of NaCl stress on plant growth and mineral nutrient assimilation in two cultivars of strawberry. **Environmental and Experimental Botany**, v. 65, n. 2-3, p.170-176, 2009.

KILL, L. H. P.; MENEZES, E. A. **Espécies vegetais exóticas com potencialidades para o semiárido brasileiro**. Embrapa Semiárido, Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica, 2005. 340 p.

KIM, Y. H.; KWAK, S. S. The role of antioxidante enzymes during leaf development. In: GUPTA, S. D. **Reactive oxygen species and antioxidante in higher plants**. Enfield: Science Publischers, 2010. p. 129-150.

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 influence the phytohormonal and antioxidant responses under salinity stress. **Journal of Plant Growth Regulation**, v. 33, n. 2, 137-149, 2014.

KORNDORFER, G. H.; COELHO, N. M.; SNYDER, G. H.; MYZUTANI, T. A. Avaliação de métodos de extração de silício em solos cultivados com arroz de sequeiro. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 23, n. 1, p.101-106, 1999a.

KORNDÖRFER, G. H.; SNYDER, G. H.; ULLOA, M.; PERDOMO, R.; POWELL, C.; DEREN, C.; DATNOFF, L. E. Soil and Plant silicon calibration for rice production. **Manuscript prepared for the Rice Council Meeting**, p. 14-5, 1999b.

KORNDÖRFER, G. H.; PEREIRA, H.; CAMARGO, M. S. **Silicatos de Cálcio e Magnésio na Agricultura**. 2. ed. Uberlândia: Universidade Federal de Uberlândia / Instituto de Ciências Agrárias, 2003. (Boletim Técnico n.1).

KOSTOPOULOU, Z.; THERIOS, I. Growth and inorganic composition of 'Nova' mandarin plants grafted on two commercial rootstocks in response to salinity and silicon. **Acta Physiologiae Plantarum**, v. 36, p. 1363-1372, 2014.

KRISHNAMURTHY, L.; SERRAJ, R.; HASH, C.T.; DAKHEEL, A.J.; REDDY, B.V.S. Screening sorghum genotypes for salinity tolerant biomass production. **Euphytica**, v. 156, p. 15-24, 2007.

KURUM, R.; ULUKAPI, K.; AYDINSAKIR, K.; ONUS, A. N. The influence of salinity seedling growth of some pumpkin varieties used as rootstock. **Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca**, v. 41, n. 1, 219-225, 2013.

KVEDARAS, O. P.; KEEPING, M. G. Silicon impedes stalk penetration by the borer *Eldana saccharina* in sugarcane. **Entomologia Experimentalis et Applicata**, v. 125, p. 103-110, 2007.

KVEDARAS, O. L.; KEEPING, M. G.; GOEBEL, F. R.; BYRNE, M. J. Larval performance of the pyramid borer *Eldana saccharina* Walker and stalk damage in sugarcane: influence of plant silicone, cultivar and feeding site. **International Journal of Pest Management**, v. 53, p. 183-194, 2007.

LACERDA, C. F. **Efeitos da salinidade no desenvolvimento e composição mineral de feijão-de-corda (*Vigna unguiculata* (L.) Walp.) e utilização do Ca<sup>2+</sup> como meio para minorar tais efeitos**. 1995. 87 f. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição e Plantas) – Centro de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 1995.

LACERDA, C. F.; CAMBRAIA, J.; CANO, M. A. O.; RUIZ, H. A. Plant growth and solute accumulation and distribution in two sorghum genotypes, under NaCl stress. **Revista Brasileira de Fisiologia Vegetal**, v. 13, n. 3, p. 270-284, 2001.

LACERDA, C. F.; CAMBRAIA, J.; CANO, M. A. O.; RUIZ, H. A.; PRISCO, J. T. Solute accumulation and distribution during shoot and leaf development in two sorghum genotypes under salt stress. **Environmental and Experimental Botany**, v. 49, n. 2, p. 107-120, 2003.

LACERDA, C. F.; MORAIS, H. M.; PRISCO, J. T.; GOMES FILHO, E.; BEZERRA, M. A. Interação entre salinidade e fósforo em plantas de sorgo forrageiro. **Revista Ciência Agrônômica**, v. 37, n. 2, p. 258-263, 2006a.

LACERDA, C. F.; ASSIS JÚNIOR, J. O.; LEMOS FILHO, L. C. A.; GUIMARÃES, F. V. A.; OLIVEIRA, T. S.; GOMES FILHO, E.; PRISCO, J. T.; BEZERRA, M. A.; Morpho-physiological responses of cowpea leaves to salt stress. **Brazilian Journal Plant Physiology**, v. 18, n. 4, p. 455-465, 2006b.

LANDAU, E. C.; SANS, L. M. A. **Cultivo de sorgo: Clima**. Sistema de Produção, 2, 6. ed, 2010. Embrapa Milho e Sorgo. Disponível em: <[http://www.cnpms.embrapa.br/publicacoes/sorgo\\_6\\_ed/clima.htm](http://www.cnpms.embrapa.br/publicacoes/sorgo_6_ed/clima.htm)> Acesso em: 04 fev. 2016.

LARCHER, W. **Ecofisiologia Vegetal**. São Carlos: Rima Artes e Textos, 2000. 528p.

LEÃO, D. A. S.; FREIRE, A. L. O.; MIRANDA, J. R. P.; Estado Nutricional de sorgo cultivado sob estresse hídrico e adubação fosfatada. **Revista Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 41, n. 1, p. 74-79, 2011.

LEE, S. K.; SOHN, E. Y.; HAMAYUN, M.; YOON, J. Y.; LEE, I. J. Effect of silicon growth and salinity stress of soybean plant grown under hydroponic system. **Agroforestry System**, v. 80, p. 333-340, 2010.

LI, R.; SHI, F.; FUKUDA, K. Interactive effects of various salt and alkali stresses on growth, organic solutes, and cation accumulation in a halophyte *Spartina alterniflora* (Poaceae). **Environmental and Experimental Botany**, v. 68, n. 1, p. 66-74, 2010.

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

LIANG, Y.; SI, J.; RÖMHELD, V. Silicon uptake and transport is an active process in *Cucumis sativus*. **New Phytologist**, v. 167, n. 3, p. 797-804, 2005.

LIANG, Y.; ZHANG, W.; CHEN, Q.; LIU, Y.; DING, R. Effect of exogenous silicon (Si) on H<sup>+</sup>-ATPase, phospholipids and fluidity of plasma membrane in leaves of salt-stressed barley (*Hordeum vulgare* L.). **Environmental and Experimental Botany**, v. 57, n. 3, p. 212-219, 2006.

LIMA, M. A. **Influência da aplicação de silício na atenuação dos efeitos tóxicos da salinidade em plantas de milho (*Zea mays*)**. 2011. 147f. Tese (Doutorado em Fitotecnia) - Centro de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2011.

LIMA FILHO, O. F.; LIMA, M. T. G.; TSAI, S. M. O silício na agricultura. **Informações Agrônomicas**. Piracicaba, n. 87, p. 1-7, 1999. (Encarte Técnico).

LIMA, C. J. G. S.; OLIVEIRA, F. A.; MEDEIROS, J. F.; OLIVEIRA, M. K. T.; ALMEIDA JUNIOR, A. B. Resposta do feijão caupi a salinidade da água de irrigação. **Revista Verde**, v. 2, n. 2, p. 79-86, 2007.

LIMA, M. A.; COSTA, T. G.; ENÉAS-FILHO, J. Aplicação foliar de silício em plantas de sorgo submetidas à salinidade. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE FISILOGIA VEGETAL, 13., 2009, Fortaleza. **Anais...** Fortaleza: CBFV, 2009.

LIMA, M. A.; CASTRO, V. F.; VIDAL, J. B.; ENÉAS-FILHO, J. Aplicação de silício em milho e feijão-de-corda sob estresse salino. **Revista Ciência Agrônômica**, v. 42, n. 2, p. 398-403, 2011.

LIN, C. C.; KAO, C. H. Osmotic stress-induced changes in cell wall peroxidase activity and hydrogen peroxide level in roots of rice seedlings. **Plant Growth Regulation**. v. 37, p. 177-183, 2002.

LOPES, T. C.; KLAR, A. E. Influência de diferentes níveis de salinidade sobre aspectos morfofisiológicos de mudas de *Eucalyptus urograndis* L. **Revista Irriga**, v. 14, p. 68-75, 2009.

LOPES, L. S. **Condicionamento fisiológico de sementes de mamona como meio de atenuar os efeitos do estresse salino na germinação e estabelecimento da plântula**. 2013. 94 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2013.

LÚCIO, W. da S. **Respostas fisiológicas e bioquímicas em meloeiro (*Cucumis melo* L.) inoculado em fungos micorrízicos arbusculares sob estresse salino**. 2008. 75 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Centro de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2008.

LUGAN, R.; NIOGRET, M. F.; LEPORT, L.; GUEGAN, J. P.; LARHER, F. R.; SAVOURE, A.; KOPKA, J.; BOUCHEREAU, A. Metabolome and water homeostasis analysis of *Thellungiella salsuginea* suggests that dehydration tolerance is a key response to osmotic stress in this halophyte. **The Plant Journal**, v. 64, n. 2, p. 215–229, 2010.

LUTTS, S.; MAJERUS, V.; KINET, J. M. NaCl effects on proline metabolism in rice (*Oryza sativa*) seedlings. **Physiologia Plantarum**, v. 105, n. 3, p. 450-458, 1999.

LUX, A.; ABE, J.; TANIMOTO, E.; HATTORI, T.; INANAGA, S. The dynamics of silicon deposition in the sorghum root endodermis. **New Phytologist**, v. 158, n. 3, p. 437-441, 2003.

MA, J. F.; Role of silicon in enhancing the resistance of plants to biotic and abiotic stresses. **Soil Science and Plant Nutrition**, v. 50, n. 1, p. 11-18, 2004.

MA, J. F.; MIYAKE, Y.; TAKAHASHI, E. Silicon as a beneficial element for crop plants. In: DATNOFF, L. E., SNYDER, G. H., KORNDÖRFER, G. H. Silicon in Agriculture. **Studies in Plant Science**, v. 8, p. 17-39. 2001.

MA, J. F.; YAMAJI, N. Silicon uptake and accumulation in higher plants. **Trends in Plant Science**, v. 11, n. 8, p. 392-397, 2006.

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

MA, J. F.; YAMAJI, N.; MITAMI, N.; TAMAI, K.; KONISHI, S.; FUJIWARA, T.; KATSUHARA, M.; YANA, M. An efflux transporter of silicon in rice. **Nature**, v. 448, p. 209-212. 2007.

MAAS, E. V.; GRIEVE, C. M. Sodium-induced deficiency in salt stressed corn. **Plant, Cell and Environment**, v. 10, p. 559-564, 1987.

MAEDA, S.; SILVA, H. D.; BELLOTE, A. F. J. Efeito da salinidade em características biométrica e na nutrição de *Pinus taeda* em Neossolo Litótico húmico. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 30, n. 61, p. 51-59, 2010.

MAGGIO, A.; RAIMONDI, G.; MARTINO, A.; PASCALE, S. Salt stress response in tomato beyond the salinity tolerance threshold. **Environmental and Experimental Botany**, v. 59, n. 3, p. 276-282, 2007.

MAHMOOD, T.; IQBAL, N.; RAZA, H.; QASIM, M.; ASHRAF, M. Y. Growth modulation and ion partitioning in salt stressed sorghum (*Sorghum bicolor* L.) by exogenous supply of salicylic acid. **Pakistan Journal of Botany**, v. 42, n. 5, p. 3047-3054, 2010.

MAIA, J. M. **Efeitos aditivos e interativos de tratamentos de seca e NaCl na resposta antioxidativa de raízes de feijão-de-corda [*Vigna unguiculata* L. (Walp.)]**. 2004. 129 f. Dissertação (Mestrado em Bioquímica) - Departamento de Bioquímica e Biologia Molecular, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2004.

MALAVOLTA, E. **Elementos de nutrição mineral de plantas**. São Paulo: Ceres, 1980. 254 p.

MALAVOLTA, E. **Manual de nutrição de plantas**. São Paulo: Ceres, 2006. 683 p.

MALAVOLTA, E. VITTI, G. C.; OLIVEIRA, S. A. de. **Avaliação do estado nutricional das plantas: princípios e aplicações**. Piracicaba: Associação Brasileira para Pesquisa da Potassa e do Fosfato, 1989. 201 p.

MANSOUR, M. M. F. Nitrogen containing compounds and adaptation of plants salinity stress. **Biologia Plantarum**, v. 43, n.4, p. 491-500, 2000.

MANSOUR, M. M. The plasma membrane transport systems and adaption to salinity. **Journal of Plant Physiology**, v. 171, p. 1787-1800, 2014.

MARIGUELE, K. H.; SILVA, P. S. L. Avaliação dos Rendimentos de Grãos e Forragem de Cultivares de Sorgo Granífero. **Caatinga**, v. 15, p. 13-18, 2002.

MARSCHNER, H. **Mineral nutrition of higher plants**. 2 ed. San Diego: Academic Press., 1995. 889 p.



MARQUES, E. C.; FREITAS, P. A. F.; ALENCAR, N. L. M.; PRISCO, J. T.; GOMES FILHO, E. Increased Na<sup>+</sup> and Cl<sup>-</sup> accumulation induced by NaCl salinity inhibits cotyledonary reserve mobilization and alters the source-sink relationship in establishing cashew seedlings. **Acta Physiologiae Plantarum**, v. 35, p. 2171-2182, 2013.

MARTINS, S. S.; PEREIRA, M. C.; LIMA, M. A. G.; QUEIROZ, A. A. SILVA, S. A. B.; MISTURA, C.; RODRIGUES J. D.; ORIKA ONO, E. Morfofisiologia da cunhã cultivada sob estresse salino. **Revista de Saúde e Produção Animal**, v. 13, n. 1, 13-24, 2012.

MASOJIDEK, J.; TRIVEDI, S.; HALSHAW, L.; ALEXIOU, A.; HALL, D. O. the synergetic effect of drought and light stress in sorghum and pearl millet. **Plant Physiology**, v. 96, p. 198-207, 1991.

MATEOS, N. E.; ANDRADES, M. L.; DAVY, A. J. Silicon alleviates deleterious effects of high salinity on the halophytic grass *Spartina densiflora*. **Plant Physiology and Biochemistry**, v. 63, n. 1, p. 115-121, 2013.

MATOS, F. S.; ROCHA, E. C.; CRUVINEL, C. K. L.; RIBEIRO, R. A.; RIBEIRO, R. P.; TICONO, C. F. Desenvolvimento de mudas de pinhão-mansó irrigadas com água salina. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 37, n. 4, p. 947-954, 2013.

MAUAD, M. **Desenvolvimento e marcha de absorção de silício em plantas de arroz sob condição de deficit hídrico e adubação silicatada**. 2006. 107 p. Tese (Doutorado em Agronomia) – Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2006.

McAVOY, R. J.; BIBLE, B. B. Silicon sprays reduce the incidence and severity of bract necrosis in poinsettia. **HortScience**, v. 31, p. 1146-1149, 1996.

McKERSIE, A.; LESHEM, Y. Y. **Stress and stress coping in cultivated plants**. Dordrecht: Kluwer Academic Pulbishes, 1994. 256 p.

MEDEIROS, P. R. F. **Manejo de fertirrigação em ambiente protegido visando o controle da salinidade para a cultura do tomate em solo franco-argiloso**. 2010. 86 p. Tese (Doutorado em Irrigação e Drenagem). Escola Superior de Agricultura Luiz Queiroz, Piracicaba, 2010.

MELONI, D. A.; OLIVA, M. A.; MARTINEZ, C. A.; CAMBRAIA, J. Photosynthesis and activity of superoxide dismutase, peroxidase and glutathione reductase in cotton under salt stress. **Environmental and Experimental Botany**, v. 49, p. 69-76, 2002.

MENDES, B. S. S.; WILLADINO, L.; CUNHA, P. C. C.; OLIVEIRA-FILHO, R. A.; CAMARA, T. R. Mecanismos fisiológicos e bioquímicos do abacaxi ornamental sob estresse salino. **Revista Caatinga**, v. 24, n. 3, p. 71-77, 2011.

MENESES, C. H. S. G.; LIMA, L. H. G. M.; LIMA, M. A.; VIDAL, M. S. Aspectos genéticos e moleculares de plantas submetidas ao déficit hídrico. **Revista Basileria de Oleaginosas e Fibrosas**, v. 10, n. ½, p. 1039-1072, 2006.

MENGEL, K.; KIRKBY, E. A. **Principles of plant nutrition**. Bem: International Postash Intitute, 1987. 687 p.

MILLER, G.; SUZUKI, N.; CIFTCI-YILMAZ, S.; MITTLER, R. Reactive oxygen species homeostasis and signalling during drought and solinity stresses. **Plant, Cell and Environment**, v. 33, n. 4, p. 453-467, 2010.

MILNE, C. J.; LAUBSCHER, C. P.; NDAKIDEMI, P. A.; MARNEWICK, J. L.; RAUTENBACH, F. Salinity induced changes in oxidative stress and antioxidant status as affected by application of silicon in lettuce (*Lactuca sativa*). **International Journal of Agroculture & Biology**, v. 14, n. 5, p. 763-768, 2012.

MIRANDA, J. R. P.; CARVALHO, J. G.; SANTOS, D. R.; FREIRE, A. L. O. ; BERTONI, J. C.; MELO, J. R. M.; CALDAS, A. L. Silício e cloreto de sódio na nutrição mineral e produção de matéria seca de plantas de moringa (*Moringa oleifera* L.). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 26, n. 4, p. 957-965, 2002.

MIRANDA, R. S.; ALVAREZ-PIZARRO, J. C.; ARAÚJO, C. M. S.; PRISCO, J. T.; GOMES-FILHO, E. Influence of inorganic nitrogen sources on  $K^+/Na^+$  homeostasis and salt tolerance in sorghum plants. **Acta Physiologiae Plantarum**, v. 35, n. 3, p. 841-852, 2013.

MITAMI, N.; MA, J. F. Uptake system of silicon in different plant species. **Journal of Experimental Botany**, v. 56, p. 1255, 1261, 2005.

MITAMI, N.; YAMAJI, N.; MA, J. F. Identification of maize silicon influx transporters. **Plant and Cell Physiology**, v. 50, p. 5-12. 2009.

MITTLER, R. Oxidative stress, antioxidants and stress tolerance. **Trends in Plant Science**, v. 7, p. 405-410, 2002.

MITTLER, R.; VANDERAUWERA, S.; GOLLERY, M.; VAN BREUSEGEM, F. Reactive oxygen gene network of plants. **Trends in Plant Science**, v. 9, p. 490-498, 2004.

MOLLER, I. M.; JENSEN, P. E.; HANSSON, A. Oxidative modifications to cellular components in plants. **Annual Reviews Plant Biology**, v. 58, p. 459-481, 2007.

MORAIS NETO, L. B. **Avaliação temporal do acúmulo de fitomassa e trocas gasosas do capim-canarana em função da salinidade da água de irrigação**. 2009. 74p. Dissertação (Mestrado em Zootecnia) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2009.

MOTERLE, L. M.; LOPES, F. C.; BRACCINI, A. L.; SCAPIM, C. A. Germinação de sementes e crescimento de plântulas de cultivares de milho-pipoca submetidas ao estresse hídrico e salino. **Revista Brasileira de Sementes**, v. 28, n. 3, p. 169-176, 2006.

MOUSSA, H. R. Influence of exogenous application of silicon on physiological response of salt-stressed maize (*Zea mays* L.). **International Journal of Agriculture and Biology**, v. 8, p. 293-297, 2006.

MUHLING, K. H.; LAUCHLI, A. Effects of salt stress on growth and cation compartmentation in leaves of two plant species differing in tolerance. **Journal of Plant Physiology**, v. 159, p. 137-146, 2002.

MUNNS, R. Physiological processes limiting plant growth in saline soils: some dogmas and hypotheses? **Plant, Cell and Environment**, v. 16, p. 15-24, 1993.

MUNNS, R. Comparative physiology of salt and water stress. **Plant, Cell and Environment**, v. 25, n. 2, p. 239-250, 2002.

MUNNS, R. Genes and salt tolerance: bringing them together. **New Phytologist**, v. 167, p. 6445-663, 2005.

MUNNS, R. The impact of salinity stress. **Plant stress**. Virtual article. Disponível em: <[http://www.plantstress.com/articles/salinity\\_i/salinity\\_i.htm](http://www.plantstress.com/articles/salinity_i/salinity_i.htm)>. Acesso em 05 ago. 2016.

MUNNS, R.; TERMAAT, A. Whole-plant responses to salinity. **Australian Journal of Plant Physiology**, v. 13, p. 143-160, 1986.

MUNNS, R.; TESTER, M. Mechanism of Salinity Tolerance. **Annual Review Plant Biology**, v. 59, p. 651-681, 2008.

NABATI, J.; KAFI, M.; NEZAMI, A.; MOGHADDAM, P. R.; MASOUMI, A.; MEHRJERDI, M. Z. Effect of salinity on biomass production and activities of some key enzymatic antioxidants in kochia (*Kochia scoparia*). **Pakistan Journal of Botany**, v. 43, n. 1, p. 539-548, 2011.

NAIFF, A. P. M. **Crescimento, composição mineral e sintomas visuais de deficiências de macronutrientes em plantas de *Alpinia purpurata* cv. Jungle King**. 2007. 75 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Universidade Federal da Amazônia, Belém, 2007.

NAKANO, Y.; ASADA, K. Spinach chloroplasts scavenge hydrogen peroxide on illumination. **Plant and Cell Physiology**, v. 21, p. 1295-1307, 1980.

NAKANO, Y.; ASADA, K. Hydrogen peroxide is scavenged by ascorbate-specific peroxidase in spinach chloroplast. **Plant and Cell Physiology**, v. 22, n. 5, p. 887-880, 1981.

NASCIMENTO, E. H. S.; RUPPENTHAL, V.; NASCIMENTO, I. L.; SILVA, M. L. S.; SABÓIA, C. B.; ENÉAS-FILHO, J. Utilização de silício na atenuação dos efeitos do estresse salino em plantas de sorgo. **II Inovagre International Meeting**, Fortaleza, 2014.

NASCIMENTO, I. B.; MEDEIROS, J. F.; ALVES, S. S. V.; LIMA, B. L. C.; SILVA, J. L. A. Desenvolvimento inicial da cultura do pimentão influenciada pela salinidade da água de irrigação em dois tipos de solos. **Agropecuária Científica no Semiárido**, v. 11, n. 1, p. 37-43, 2015.

NEUMANN, M.; RESTLE, J.; ALVES FILHO, D. C.; BRONDANI, I. L.; MENEZES, L. F. G. Resposta econômica da terminação de novilhos em confinamento, alimentados com silagem de diferentes híbridos de sorgo (*Sorghum bicolor*, L. Moench). **Ciência Rural**, v. 32, n. 5, p. 123-133, 2002.

NEVES, J. M. G. **Silício e boro reduzem os efeitos da deficiência hídrica no girassol**. 2014. 85f. Tese (Doutorado em Fitotecnia) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2014.

NIEMAN, R. H. CLARK, R. A. Interactive effects of salinity and phosphorus nutrition on the mature photosynthesizing corn leaves. **Plant Physiology**, v. 57, p. 157-161, 1976.

NIU, X.; BRESSAN, R. A.; HASEGAWA, P. M.; PARDO, J. M. Ion homeostase in NaCl stress environments. **Plant Physiology**, v. 109, p. 735-742, 1995.

NOVAIS, R. F.; ALVAREZ, V. H. V. BARROS, N. F.; FONTES, R. L. F.; CANTARUTTI, R. B.; NEVES, J. C. L. **Fertilidade do solo**. 1. ed. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007. 1017 p.

OLIVEIRA, H. P. M. **Efeitos das concentrações iso-osmóticas de sais (NaCl + KCl) sobre o crescimento e o acúmulo de íons em plantas de sorgo forrageiro**. 2002. 32p. Monografia (Graduação em Agronomia) – Centro de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2002.

OLIVEIRA, A. B. **Envelhecimento artificial, osmocondicionamento e estresse osmótico em sementes de sorgo: parâmetros fisiológicos, bioquímicos e citoquímicos**. 2010. 230 p. Tese (Doutorado em Agronomia) - Centro de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2010.

OLIVEIRA, L. A.; CASTRO, N. M. Ocorrência de Sílica nas Folhas de *Curatella americana* L. e de *Davilla elliptica* St. Hil. **Revista Horizonte Científico**, 2002.

OLIVEIRA, L. A. A.; BARRETO, L. P.; BEZERRA NETO, E.; SANTOS, M. V. F.; COSTA, J. C. A. Solutos orgânicos em genótipos de sorgo forrageiro sob estresse salino. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 41, n. 1, p. 31-35, 2006.

OLIVEIRA, A. B.; GOMES-FILHO, E.; ENÉAS-FILHO, J. O problema da salinidade na agricultura e as adaptações das plantas ao estresse salino. **Enciclopédia Biosfera**, Centro Científico Conhecer, v. 6, n. 11, p. 1-16, 2010.

OLIVEIRA, I. R. S.; OLIVEIRA, F. N.; MEDEIROS, M. A.; TORRES, S. B.; TEIXEIRA, F. J. V. Crescimento inicial do pinhão manso (*Jatropha curcas* L.) em função da salinidade da água de irrigação. **Revista Caatinga**, v. 23, n. 4, p. 40-45, 2010.

OLIVEIRA, A.B; GOMES FILHO, E. Cultivo hidropônico de sorgo sob estresse salino com sementes envelhecidas artificialmente e osmocondicionada. **Ciência Rural**, v. 41, n. 1, p. 10-16, 2011.

OLIVEIRA, F. A.; MEDEIROS, J. F.; OLIVEIRA, F. R. A.; FREIRE, A. G.; SOARES, L. C. S. Produção do algodoeiro em função da salinidade e tratamento de sementes com regulador de crescimento. **Revista Ciência Agronômica**, v. 43, n. 2, p. 279-287, 2012.

OLIVEIRA, V. P.; MARQUES, E. C.; LACERDA, C. F.; PRISCO, J. T.; GOMES-FILHO, E. Physiological and biochemical characteristics of *Sorghum bicolor* and *Sorghum sudanense* subjected to salt stress in two stages of development. **African Journal of Agricultural Research**, v. 8, n. 8, p. 660-670, 2013.

PANDA, S. K.; KHAN, M. H. Growth, oxidative damage and antioxidant responses in greengram (*Vigna radiate* L.) under short-term salinity stress and its recovery. **Journal of Agronomy and Crop Science**, v. 195, n. 6, p. 442-454, 2009.

PANG, C. A.; WANG, B. Oxidative Stress and Salt Tolerance in Plants. **Progress in Botany**, v. 69, p. 231-246, 2008.

PARIDA, A.; DAS, A. B.; MITTRA, Effects of salt on growth, ion accumulation photosynthesis and leaf anatomy of the mangrove, *Bruguiera parviflora*. **Trees Structure and Function**, v. 18, n. 2, p. 167-174, 2004.

PARIDA, A. K.; DAS, A. B. Salt tolerance and salinity effects on plants: a review. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, v. 60, p. 324-349, 2005.

PATEL, A. D.; PANCHAL, N. S.; PNADEY, I. B.; PANDEY, A. N. Growth status and nutrient accumulation of seedlings of *Jatropha curcas* L. (Euphorbiaceae) in response to soil salinity. **Anales de Biologia**, v. 1, n. 32, p. 59-71, 2010.

PERL-TREVES, R.; PERL, A. Oxidative stress: an introduction. *In*: INZÉ, D.; VAN MONTAGU, M. **Oxidative Stress in Plant**, 2002.

PILON, C. **Aplicação de silício solúvel via solo e foliar na cultura da batata (*Solanum tuberosum* L.) sob deficiência hídrica**. 2011. 65 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual de São Paulo, Botucatu, 2011.

PLEWA, M. J.; SMITH, S. R.; WAGNER, E. D. Diethyldithiocarbamate suppresses the plant activation of aromatic amines into mutagens by inhibiting tobacco cell peroxidase. **Mutation Research**, v. 247, n. 1, p. 57-64, 1991.

PLETT, D. C.; MØLLER, I. S. Na<sup>+</sup> transport in glycophytid plants: what we know and know like to know. **Plant, Cell and Environment**, v. 33, p. 612-626, 2010.

PONTES, G. M. **Avaliação da produtividade de biomassa de capim elefante e sorgo sacarino no estado do Ceará para uso energético**. 2013. 103 f. Dissertação (Mestrado em Agroenergia) - Escola de Economia de São Paulo, da Fundação Getúlio Vargas – EESP – FGV, São Paulo, 2013.

PRAXEDES, S. C. **Alterações fisiológicas e bioquímicas em dois cultivares de feijão-de-corda com tolerância diferencial à salinidade**. 2008. 154 f. Tese (Doutorado em Agronomia) - Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2008.

PRISCO, J. T.; GOMES-FILHO, E. Fisiologia do estresse salino em plantas. *In*: GHEYI, H. R.; DIAS, N. S.; LACERDA, C. F. (eds.). **Manejo da salinidade na agricultura: Estudos básicos e aplicados**. Fortaleza: INCTSal, 2010. p. 143-159.

PURCINO, A. A. C. Sorgo sacarino na Embrapa: histórico, importância e usos. *In*: DURÃES, F. O. M. Sorgo sacarino: tecnologia agrônômica e industrial para alimentos e energia. Embrapa Agroenergia, **Agroenergia em revista**. Ano II, n. 3, ago. 2011.

QADIR, M.; OSTER, J. D.; SHUBERT, S.; NOBLE, A. D.; SAHRAWAT, K. L. Phytoremediation of sodic and saline-sodic soils. **Advances in Agronomy**, v. 96, p. 197-247, 2007.

RAVEN, J. A. The transport and function of silicon in plants. **Biological Reviews**, New York, v. 58, p. 179-207, 1983.

REA, P. A.; SANDERS, D.; Tonoplast energization: two H<sup>+</sup> pumps, one membrane. **Physiologia Plantarum**, v. 71, p. 131-141, 1987.

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

REUNIÃO TÉCNICA ANUAL DE MILHO E SORGO. 2013. Pelotas. **Indicações técnicas para o cultivo de milho e de sorgo no Rio Grande do Sul, safras 2013/2014 e 2014/2015**. In: LVIII REUNIÃO TÉCNICA ANUAL DE MILHO E XLI REUNIÃO TÉCNICA ANUAL DE SORGO. (Org.). EMYGDIO, B. M.; ROSA, A. P. S. A. de; TEIXEIRA, M. C. C. Pelotas: Embrapa Clima Temperado, 2013. 123p.

RHOADES, J. D.; KANDIAH, A.; MASHALI, A. M. **Uso de águas salinas para produção agrícola**. Trad. GHEYI, H. R.; SOUSA, J. R.; QUEIROZ, J. E. Campina Grande: UFPB, 2000.

RIBAS, P. M. **Sorgo: Introdução e Importância Econômica**. Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 2003. 16 p. (Documentos, 26).

RIBEIRO, M. R. Origem e classificação dos solos afetados por sais. In: GHEYI, R. F. H.; DIAS, N. S.; LACERDA, C. F. **Manejo da salinidade na agricultura: Estudos básicos e aplicados**. Fortaleza: INTC Sal, 2010. 472p.

RIBEIRO, M. R.; FREIRE, F. J.; MONTENEGRO, A. A. A.; Solos haolomórficos no Brasil: Ocorrência, gênese, classificação, uso e manejo sustentável. IN: CURI, N.; MARQUES, J. J.; GUILHERME, L. R.; G.; LIMA, J. M.; LOPES, A. S.; ALVAREZ, V. H. (eds.). **Tópicos em Ciência do Solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, v. 3, p. 165-208. 2003.

RIBEIRO, J. S.; LIMA, A. B.; CUNHA, P. C.; WILLADINO, L.; CÂMARA, T. R. O estresse abiótico em regiões semiáridas: respostas metabólicas das plantas. IN: MOURA, A. N.; ARAÚJO, E. L.; ALBUQUERQUE, U. P. (Orgs.) **Biodiversidade, potencial econômico e processos eco- fisiológicos em ecossistemas nordestinos**, Recife: Comunigraf., 2007. 361 p.

RIBEIRO, M. R.; BARROS, M. F. C.; FREIRE, M. B. G. Química dos solos salinos e sódicos. IN: MELO, V. F. ALLEONI, L. R. F. (eds.). **Química e mineralogia do solo. Parte II – Aplicações**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, p. 449-484, 2009.

RICHARDS, L. A. **Diagnostic and improvement of saline and alkali soils**. USDA. Agriculture Handbook, 60. Washington United States Salinity Laboratory, 1954. 160 p.

RICHARDS, I. R.; JOHNSTON, A. E. The effectiveness of different precipitated phosphates as sources of phosphorus for plants. **Soil Use and Management**, v. 19, n. 1, p. 45-49, 2003.

RISHI, A.; SNEHA, S. Antioxidative defense against reactive oxygen species in plants under salt stress. **International Journal of Current**, v. 5, p.1622-1627, 2013.

ROCHA, I. M. A. **Regulação metabólica da acumulação de prolina em folhas de cajueiro expostas ao estresse salino**. 2003. 104 p. Tese (Doutorado em Bioquímica) – Centro de Ciências, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2003.

RODRÍGUEZ-NAVARRO, A.; RUBIO, F. High-affinity potassium and transport systems in plants. **Journal of Experimental Botany**, v. 57, n. 5, p. 1149-1160, 2006.

ROHANIPOOR, A.; NOROUZI, M; MOEZZI, A; HASSIBI, P. Effect of silicon on some physiological properties of maize (*Zea mays*) under salt stress. **Journal of Biology and Environmental Science**, v. 20, p. 71-79, 2013.

ROMERO-ARANDA, M. R.; JURADO, O.; CUARTERO, J. Silicon alleviates the deleterious salt effect on tomato plant growth by improving plant water status. **Journal of Plant Physiology**, v. 163, n. 8, p. 847-855, 2006.

SAADAT, S.; HOMAEE, M. Modeling sorghum response to irrigation water salinity at early growth stage. **Agricultural Water Management**, v. 152, p. 119– 124, 2015.

SAIRAM, R. K., VEERABHADRA RAO, K.; SRIVASTAVA, G. C. Differential response of wheat genotypes to long term salinity stress in relation to oxidative stress, antioxidant activity and osmolyte concentration. **Plant Science**, v. 163, p. 1037-1046, 2002.

SANCHEZ, P. A.; SALINAS, J. G.; Low input technology for managing Oxisols and Ultisols in tropical America. **Advances in Agronomy**, v. 34, 280-406, 1981.

SANCHEZ, P. A.; SALINAS, J. G. **Suelos ácidos: estratégias para su manejo con bajos insumos in America Tropical**. Bogotá: Sociedade Colombiana de la Ciencia del Suelo, 1983. 93p.

SANCHEZ, D. H.; SIAHPOOSH, M. R.; ROESSNER, U.; UDVARDI, M.; KOPKA, J. Plant metabolomics reveals conserved and divergent metabolic responses to salinity. **Physiologia Plantarum**, v. 132, n. 2, 209–219, 2008.

SANGSTER, A. G.; HORSON, M. J.; PARRY, D. W. Silicon deposition and anatomical studies in the inflorescence bracts of four *Phalaris species* with their possible relevance to carcinogenesis. **New Phytologist**, v. 93, p. 105-122, 2001.

SANTOS, P. R. **Germinação, vigor e crescimento de duas cultivares de feijoeiro em soluções salinas**. 2006. 48 f. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2006.

SANTOS, F. G.; CASELA, C. R.; WAQUIL, J. M. Melhoramento de Sorgo. *In*: BORÉM, A. (Org). **Melhoramento de Espécies Cultivadas**. 2. ed. Viçosa: Editora UFV, 2005. p. 429-466.

SANTOS, H. Q.; FONSECA, D. M.; CANTURUTTI, R. B.; ALVAREZ, V. H.; NASCIMENTO JUNIOR, D. Níveis críticos de fósforo no solo e na planta para gramíneas forrageiras tropicais, em diferentes idades. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 26, n. 1, p. 173-182, 2002.

SANTOS, J. B.; GHEYI, H. R.; LIMA, G. S.; XAVIER, D. A.; CAVALCANTE, L. F.; CENTENO, C. R. M. Morfofisiologia e produção do algodoeiro herbáceo irrigado com águas salinas e adubado com nitrogênio. **Comunicata Scientiae**, v. 7, n. 1, p. 86-96, 2016.

SAVANT, N.K.; KORNDORFER, G.H.; DATNOFF, L.E.; SNYDER, G.H. Silicon nutrition and sugarcane production: A Review. **Journal of Plant Nutrition**, v. 22, n. 12, p. 1853-1903, 1997.

SAVANT, N. K.; KORNDORFER, G. H.; DATNOFF, L. E.; SNYDER, G. H. Silicon nutrition and sugarcane production: a review. **Journal of Plant Nutrition**, v. 22, n. 12, p. 1853-1903, 1999.

SAVVAS, D.; MANOS, G.; KOTSIRAS, A.; SOUVALIOTIS, S. Effects of silicon and nutrient induced salinity on yield, flower quality and nutrient uptake of gerbera grown in a closed hydroponic system. **Journal of Applied Botany**, v. 76, n. 5-6, p. 153-158, 2002.

SAYYED, A.; GUL, H.; HAMAYUN, M.; NANGYAL, H.; FAZAL, I. Influence of sodium chloride on growth and chemical composition of *Tagetes erecta*. **South Asian Journal of Life Sciences**, v. 2, n. 2, p. 29-32, 2014.

SERRAJ, R.; SINCLAIR, T. R. Osmolyte accumulation: can it really help increase crop yield under drought conditions. **Plant, Cell and Environment**, v. 25, p. 333-341, 2002.

SHABALA, S.; POTTOSIN, I. Regulation of potassium transport in plants under hostile conditions: implications for abiotic and biotic stress tolerance. **Physiologia Plantarum**, v. 151, p. 257-279, 2014.

SHALATA, A.; MITTOVA, V.; VOLOKITA, M.; GUY, M.; TAL, M. Response of the cultivated tomato and its wild salt-tolerance relative *Lycopersicon pennellii* to salt-dependent oxidative stress: The root antioxidative system. **Physiologia Plantarum**, v. 112, p. 487-494, 2001.

SHANNON, M. C. Adaptation of plants of salinity. **Advances in Agronomy**, v. 60, p.75-120, 1997.

SHARAF, A. E. M. M. Improvement growth, and yield of wheat plants grown under salinity stress by using silicon. **Journal of American Science**, v. 6, n. 11, 2010.

SHI, Y.; WANG, Y. C.; FLOWERS, T. J.; GONG, H. J. Silicon decreases chloride transport in rice (*Oryza sativa* L.) in saline conditions. **Journal of Plant Physiology**, v. 170, n. 9, p. 847-853, 2013.

SHIBLI, R. A.; SAWWANC, J.; SWAIDATA, I.; TAHATC, M. Increased phosphorus mitigates the adverse effects of salinity in tissue culture. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v. 32, n. 03/04, p. 429-440, 2001.



SHIGEOKA, S.; ISHIKAWA, T.; TAMOI, M.; MIYAGAWA, T.; YABUTA, Y.; YOSHIMURA, K. Regulation and function of ascorbate peroxidase isoenzymes. **Journal of Experimental Botany**, v. 53, n. 372, p. 1305-1319, 2002.

SCHUMACHER, M. V.; CESSONI, D. E.; SANTANA, C. A. Influência de diferentes doses de fósforo no crescimento das plantas de *Peltophorum dubium* (Sprengel) Taubert. **Boletim Pesquisa Florestal**, n. 47, p. 99-114, 2003.

SILVA, J. S. **Caracteres fisiológicos e bioquímicos de dois genótipos de sorgo forrageiro submetidos à salinidade**. 2003. 109 f. Tese (Doutorado em Agronomia) – Centro de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2003.

SILVA, P. R. C. **Processo de produção de adubos foliares**. Salvador: Serviço Brasileiro de Respostas Técnicas (Rede de Tecnologia da Bahia), 2006. 5 p.

SILVA, M. L. **Avaliação de genótipos de sorgo forrageiro na zona da mata de Alagoas**. 2011, 68 f. Dissertação (Mestrado em Zootecnia) – Centro de Ciências Agrárias, Universidade Federal de Alagoas, Rio Largo, 2011.

SILVA, M. L. S. **Aplicação de silício nas respostas fisiológicas e bioquímicas de plantas de arroz submetidas ao estresse salino**. 2015. 79p. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Centro de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2015a.

SILVA, M. L. S. **Avaliação da tolerância à salinidade em quatro genótipos de sorgo forrageiro/sacarino através de análises fisiológicas e bioquímicas**. 2015. 77p. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Centro de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2015b.

SILVA, J. V.; LACERDA, C. F.; AZEVEDO NETO, A. D.; COSTA, H. A.; PRISCO, J. T.; ENÉAS FILHO, J.; GOMES FILHO, E. Crescimento e osmorregulação em dois genótipos de sorgo submetidos a estresse salino. **Revista Ciência Agrônômica**, v. 34, p. 125-131, 2003a.

SILVA, J. V.; LACERDA, C. F.; COSTA, P. H. A.; ENÉAS FILHO, J.; GOMES FILHO, E.; PRISCO, J. T. Physiological responses of NaCl stressed cowpea plants grown in nutrient solution supplemented with CaCl<sub>2</sub>. **Brazilian Journal Plant Physiology**, v. 15, p. 99-105, 2003b.

SILVA, R. N.; LOPES, N. F.; MORAES, D. M.; PEREIRA, A. L.; DUARTE, G. L. Physiological quality of barley seeds submitted to saline stress. **Revista Brasileira de Sementes**, v. 29, n. 1, p. 40-44, 2007.

SILVA, R. N.; DUARTE, G. L.; LOPES, N. F.; MORAES, D. M.; PEREIRA, A. L. A. Composição química de sementes de trigo (*Triticum aestivum* L.) submetidas a estresse salino na germinação. **Revista Brasileira de Sementes**, v. 30, n. 1, p. 215-220, 2008.

SILVA, E. N.; SILVEIRA, J. A. G.; RODRIGUES, C. R. F.; DUTRA, A. T. B.; ARAGÃO, R. M. Acúmulo de íons e crescimento de pinhão-mansô sob diferentes níveis de salinidade. **Revista Ciência Agrônômica**, v. 40, n. 2, p. 240-246, 2009a.

SILVA, E. N.; SILVEIRA, J. A. G.; RODRIGUES, C. R. F.; LIMA, C. C.; VIEGAS, R. A. Contribuição de solutos orgânicos no ajustamento osmótico de pinhão-manso submetido à salinidade. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 44, n. 5, p. 437-445, 2009b.

SILVA, E. N.; RIBEIRO, R. V.; FERREIRA-SILVA, S. L.; SILVEIRA, J. A. G. Comparative effects of salinity and water stress on photosynthesis, water relations and growth of *Jatropha curcas* plants. **Journal of Arid Environments**, v. 74, n. 10 p. 1130-1137, 2010.

SILVA JUNIOR, G. S. E.; MORAIS, M. B.; CAMARA, T. R.; WILLADINO, L. Crescimento de genótipos de diploides de bananeira submetidos ao estresse salino. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 16, n. 11, p. 1145-1151, 2012a.

SILVA JÚNIOR, G. S. E.; CAMARA, T. R.; WILLADINO, L. G.; MARTINS, L. S. S.; SILVA, L. E. Parâmetros biométricos, nutricionais e bioquímicos em cultivares e somaclones de bananeira submetidos à salinidade. **Revista de Ciência, Tecnologia e Humanidades do IFPE**, v. 4, n. 1, p. 10-20, 2012b.

SILVA, M. L. S. ; FEIJAO, A. R. ; MARQUES, E. C. ; SILVA, M. L. S. ; GOMES FILHO, E.; PRISCO, J. T. Growth, accumulation of solutes and nitrogen metabolism in plants of sunflower under salt stress. In: **II Brazilian Symposium on Salinity & II Brazilian Meeting on Irrigation**, Fortaleza. 2014.

SILVEIRA, J. A. G.; SILVA, S. I. F.; SILVA, E. N.; VIÉGAS, A. R. Mecanismos biomoleculares envolvidos com a resistência ao estresse salino em plantas. In: GHEYI, H. R.; DIAS, N. S.; LACERDA, C. F. **Manejo da salinidade na agricultura: estudos básicos e aplicados**. 1. ed. Fortaleza: INCTSal. 2010. cap. 11, p. 161-18.

SINGH, L. S. Study on compatible solutes under chloride stress in some wheat genotypes. **Annals of Biology**, v. 22, p. 131-136, 2006.

SNYDER, G. H. Development of silicon soil test for Histosol-grow Rice. **Belle Glade**: Univ. Florida, (EREC Res. Report), 1991.

SOARES, L. A. A.; NOBRE, R. G.; GHEYI, H. R.; LIMA, G. S.; SILVA, A. O.; SOARES, S. S. Componente de crescimento da mamoneira cultivada com águas salinas e doses de nitrogênio. **Irriga**, Botucatu, Edição Especial, p. 40-54, 2012.

SONOBE, K.; HATTORI, T.; AN, P.; TSUJI, W.; ENEJI, E.; TANAKA, K.; INANAGA, S. Diurnal variations in photosynthesis, stomatal conductance and leaf water relation in sorghum grown with or without silicon under water stress. **Journal of Plant Nutrition**, v. 32, p. 433-442, 2009.

SOUSA, C.H.C. **Análise da tolerância à salinidade de plantas de sorgo, feijão-de-corda e algodão**. 2006. 73 p. Dissertação (Mestrado em Irrigação e Drenagem) – Centro de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2007.

SOUSA, A. E. C.; GHEYI, R. H.; CORREIA, K. G.; SOARES, F. A. L.; NOBRE, R. G. Crescimento e consumo hídrico de pinhão manso sob estresse salino e doses de fósforo. **Revista Ciência Agronômica**, v. 42, n. 2, p. 310-318, 2011.

- SZABADOS, L.; SAVOURÉ, A. Proline: a multifunctional amino acid. **Trends in Plant Science**, v. 15, n. 2, p. 89-97, 2010.
- SZE, H.; LI, X.; PALMGREM, M. Energization of plant cell membranes by H<sup>+</sup> - pumping ATPases: Regulation and Biosynthesis. **The Plant Cell**, v. 11, p. 677-689, 1999.
- TABOSA, J. N.; FRANÇA, J. G. E.; SANTOS, J. P. O.; MACIEL, G. A.; LIRA, M. A.; ARAÚJO, M. R. A.; GUERRA, N. B. Teste em linhas de sorgo no semi-árido de Pernambuco para consumo humano. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 28, n. 12, p. 1385-1390, 1993.
- TABOSA, J. N.; COLAÇO, W.; REIS, O. V.; SIMPLÍCIO, J. B.; CARVALHO, H.W.L.; DIAS, F.M. Sorghum genotypes evaluation under salinity levels and gamma ray. **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**, v. 6, n. 3, p. 339-350, 2007.
- TAIZ; L. ZEIGER, E. **Fisiologia Vegeral**. 5. ed. Porto Alegre: Artmed, 2013. 918p.
- TAKAHASHI, E.; MA, J. F.; MIYAKE, Y. The possibility of silicon as an essential element for higher plants. **Comments on Agricultural and Food Chemistry**, v. 2, p. 2-122, 1990.
- TEAKLE, N. L.; TYERMAN, S. D.; Mechanisms of Cl<sup>-</sup> transport contributing to salt tolerance. **Plant, Cell and Environmental**, v. 33, p. 566-589, 2010.
- TESTER, M.; DAVENPORT, R. Na<sup>+</sup> Tolerance and Na<sup>+</sup> Transport in Higher Plants. **Annals of Botany**, v. 91, n. 5, p. 503-527, 2003.
- THILAGAM, V. K.; MOHANTY, S.; SHAHID, M.; TRIPATHI, R. NAYAR, A. K.; KUMAR, A. Role of silicon beneficial nutrient for rice crop. **Popular Kheti**, v. 2, n. 1, p. 105-107, 2014.
- TOBE, K.; LI, K.; OMASA, K. Seed germination and radicle growth of a halophyte, *Kalidium capsicum* (Chenopodiaceae). **Annals of Botany**, v. 85, p. 391-396, 2000.
- TUNÇTURK, M.; TUNÇTURK, R.; YASAR, F. Changes in micronutrients, dry weight and plant growth of soybeans (*Glycine max* L. Merrill) cultivars under salt stress. **African Journal of Biotechnology**, v. 7, n. 11, p. 1650-1654, 2008.
- TURKAN, I. Plant responses to drought and salinity stress: Developments in Post- Genomic Era. In: **Advances in Botanical Research**, v. 57. Elsevier. 2011. 593p.
- TYERMANN, S. D.; SKERRETT, I. M. Root ion channels and salinity. **Scientia Horticulturae**, v. 78, p. 175-235, 1999.
- ULRICH, D.; AARON, B. S.; TOMOAKI, H.; WEI, L.; GUOHUA, X.; JULIAN, I. S.; Plant salt-tolerance mechanisms. **Trends in Plant Science**, v. 19, n. 6, p. 371-379, 2014.
- URBANEK, H., KUZNIAK-GEBAROWSKA, E.; HERKA H. Elicitation of defense responses in bean leaves by *Botrytis cinerea* polygalacturonase. **Acta Physiologia Plantarum**, v. 13, n.1, p. 43-50, 1991.

USADEL, B.; BLASING, O. E.; GIBON, Y.; POREE, F.; HOHNE, M.; GUNTER, M.; TRETHERWEY, R.; KAMLAGE, B.; POORTER, H.; STITT, M. Multilevel genomic analysis of the response of transcripts, enzyme activities and metabolites in *Arabidopsis rosettes* to a progressive decrease of temperature in the non-freezing range. **Plant, Cell and Environment**, v. 31, n. 4, p. 518–547, 2008.

WANG, W. B.; KIM, Y. H.; LEE, H. S.; KIM, K. Y.; DENG, X. P.; KWAK, S. S. Analysis of antioxidant enzyme activity during germination of alfalfa under salt and drought stresses. **Plant Physiology and Biochemistry**, v. 47, p. 570-577, 2009.

WANG, X.; HOU, C.; LIU, J.; HE, W.; NAN, W.; GONG, H.; BI, Y. Hydrogen peroxide is involved in the regulation of rice (*Oryza sativa* L.) tolerance to salt stress. **Acta Physiologiae Plantarum**, v. 35, n. 3, p. 891-900, 2013.

WERNER, D.; ROTH, R.; Silica metabolism. In: LAUCHLI, A. BIELESKI, R. L. (Ed). **Encyclopedia of plant physiology**. New Series. Berlin: Springer-Verlag, 1983. v. 15B, p. 682-694.

WIDODO, P. J.H.; NEWBIGIN, E.; TESTER, M.; BACIC, A.; ROESSNER, U. Metabolic responses to salt stress of barley (*Hordeum vulgare* L.) cultivars, Sahara and Clipper, which differ in salinity tolerance. **Journal of Experimental Botany**, v. 60, n. 14, p. 4089-4103, 2009.

WILD, A. **Russel's soil conditions and plant growth**. 11 ed. London: Longman, 1988. 991p.

WILLADINO, L.; CAMARA, T. R. Tolerância das plantas à salinidade: Aspectos fisiológicos e bioquímicos. **Enciclopédia Biosfera**, v. 6, n. 11, p. 1-23, 2010.

WILLADINO, L.; GOMES, E. W. F.; SILVA, E. F. F.; MARTINS, L. S. S.; CAMARA, T. R. Efeito do estresse salino em genótipos tetraplóides de bananeira. **Revista Brasileira de Engenharia Ambiental**, v. 15, p. 53-59, 2011.

VAIDYANATHAN, H.; SIVAKUMAR, P.; CHAKRABARTY, R.; THOMAS, G. Scavenging of reactive oxygen species in NaCl-stressed rice (*Oryza sativa* L.) - differential response in salt-tolerant and sensitive varieties. **Plant Science**, v. 165, p. 1411-1418, 2003.

VIDAL, J. B. **Influência do silício na germinação de sementes de sorgo de quatro genótipos submetidos à salinidade**. 2012. 47 p. Monografia (Graduação em Agronomia) – Centro de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2012.

VIEIRA, M. R. **Produtividade, análises químico-bromatológicas e nutrição mineral de plantas de sorgo forrageiro irrigadas com águas salinas**. 2006. 97 f. Dissertação (Mestrado em Irrigação e Drenagem) – Centro de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2006.

VOSS, I.; SUNIL, B.; SCHEIBE, R.; RAGHAVENDRA, A. S. Emerging concept for the role of photorespiration as an import part of abiotic stress response. **Plant Biology**, v. 15, n. 4, p. 713-722, 2013.

YAMAGUCHI, T.; BLUMWALD, E. Developing salt-tolerant crop plants: challenges and opportunities. **Trends in Plant Science**, v. 10, p. 615-620, 2005.

YAO, Z.; LIU, L.; GAO, F.; RAMPITSCH, C.; REINECKE, D. M.; OZGA, J. A.; AYELE, B. T. Developmental and seed aging mediated regulation of antioxidative genes and differential expression of proteins during pre- and post germinative phases in pea. **Journal of Plant Physiology**, v. 169, p. 1477-1488, 2012.

YEMM, E. W.; COCKING, E. C. The determination of amino-acids with ninhydrin. **Analyst**, v. 8, p. 209-213, 1955.

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**, v. 35, n. 11, p. 3099-3107, 2013.

YIN, L.; WANG, S.; TANAKA, K.; FUJIHARA, S.; ITAI, A.; DEN, X.; ZHANG, S. Silicon-mediated changes in polyamines participate in silicon-induced salt tolerance in *Sorghum bicolor* L. **Plant Cell Environ**, v. 39, n. 2, p. 245-258, 2015.

YOSHIDA, S. **The physiology of silicon in rice**. Food and Fertilizer Technology Center Taipei. Taiwan. 1975. (Technical bulletin, 25).

YOSHIDA, S.; OHNISHI, Y.; KITAGISHI, K. Role of silicon in rice nutrition. **Soil Plant Food**, v. 5, p. 127-133, 1959.

YOSHIDA, S.; OHNISHI, Y.; KITAGISHI, K. Chemical forms, mobility and deposition of silicon in rice plant. **Soil Science Plant Nutrition**, v. 8, p. 15-21, 1962.

YU, S.; WANG, W.; WANG, B. **Recent progress of salinity tolerance research in plants**. **Russian Journal of Genetics**, v. 48, p. 497-505, 2012.

ZHU, J. K. Regulation of ion homeostasis under stress. **Current Opinion in Plant Biology**, v. 6, p. 441-445, 2003.

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

ZHU, Y.; GONG, H. Beneficial effects of silicon on salt and drought tolerance in plants. **Agronomy for Sustainable Development**, v. 34, n. 2, p. 455-472, 2014.

ZHUJUN, Z.; GUOQUIANG, W.; JUAN, L.; QIIOGQIU, Q.; JINGQUAN, Y. Silicon alleviates salt stress and increases antioxidant enzymes activity in leaves of salt-stressed cucumber (*Cucumis sativus* L.). **Plant Science**, v. 167, p. 527-533, 2004.

ZUCCARINI, P. Effects of silicon on photosynthesis, water relations and nutrient uptake of *Phaseolus vulgaris* under NaCl stress. **Biologia Plantarum**, v. 52, p. 157-160, 2008.