

JOSÉ ORLANDO NUNES DA SILVA

Mitigação do estresse salino em sorgo sudanense com aplicação de silício isolado ou combinado com *Trichoderma harzianum* e matéria orgânica

Serra Talhada-PE

2023

**S
I
L
V
A**

**J
O
N**

**S
A
L
I
N
I
D
A
D
E**

**E
M**

**S
O
R
G
O**

·

·

·

2

0

2

3

JOSÉ ORLANDO NUNES DA SILVA

Dissertação apresentada à Universidade Federal Rural de Pernambuco, Unidade Acadêmica de Serra Talhada, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Produção Vegetal, para obtenção do título de Mestre em Produção Vegetal.

Orientador: Prof. Dr. Luiz Guilherme Medeiros Pessoa

Co-orientadores: Prof. Dr. Eduardo Soares de Souza

Prof. Dr. Sérgio Luiz
Ferreira da Silva

Serra Talhada-PE

2023

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal Rural de Pernambuco
Sistema Integrado de Bibliotecas
Gerada automaticamente, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

S586m

Silva, José Orlando Nunes

Mitigação do estresse salino em sorgo sudanense com aplicação de silício isolado ou combinado com *Trichoderma harzianum* e matéria orgânica: Dissertação / José Orlando Nunes Silva. - 2023.
82 f.

Orientador: Luiz Guilherme Medeiros Pessoa.

Coorientador: Eduardo Soares de Souza / Sergio Luiz Ferreira da Silva.

Inclui referências.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal Rural de Pernambuco, Programa de Pós-Graduação em Produção Vegetal, Serra Talhada, 2023.

1. Salinidade. 2. sorgo forrageiro. 3. semiárido. 4. propriedades do solo. 5. atenuação do estresse salino. I. Pessoa, Luiz Guilherme Medeiros, orient. II. Silva, Eduardo Soares de Souza / Sergio Luiz Ferreira da, coorient. III. Título

CDD 581.15

À minha mãe, Adalgisa Nunes da Silva, ao meu pai, Noé Gerônimo da Silva, aos meus irmãos, Maria das Neves Nunes da Silva, José Alberto Nunes da Silva, Maria do Carmo Nunes da Silva, José Nilson Nunes da Silva, José Daniel Nunes da Silva, José Cícero Nunes da Silva, e, aos meus queridos sobrinhos, João Vitor, Bianca e Júlia; com todo amor, respeito e inspiração. E, de forma especial, à ciência brasileira que sobreviveu a momentos difíceis.

Dedico

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais e irmãos por todo apoio, ensinamentos, e por estarem comigo em todos os momentos da minha vida.

Aos meus sobrinhos por todo amor e carinho.

À meu orientador, professor Luiz Guilherme Medeiros Pessoa, pela paciência, ensinamentos, por estar sempre presente e acreditar em mim.

A todos os membros do NUPSSE – Núcleo de Pesquisa em Solos de Semiárido (Luiz Filipe, Leonardo Silva, Edson Abrantes, Deiverson, Wanderson Barros, Elisângela Freitas, Emannuele Silva e Willdmark) pelo apoio na condução do experimento e momentos de distração em campo e no laboratório.

A todos que fazem parte da Estação de Agricultura Irrigada de Parnamirim - EAIP, pelo espaço cedido e auxílio na condução do experimento. Em especial, ao Sr. Eurico Lustosa, Flávio Lustosa, Edson Abrantes, Elisângela Freitas e Teorgenes Cordeiro.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq, pelo apoio financeiro prestado, obtido pela Chamada CNPq/MCTI/FNDCT Nº 18/2021 – UNIVERSAL, Faixa A – Grupos emergentes.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela bolsa cedida.

À Universidade Federal Rural de Pernambuco/Unidade Acadêmica de Serra Talhada, pela infraestrutura oferecida e aos técnicos pelo apoio.

Ao Programa de Pós-Graduação em Produção Vegetal (PGPV/UFRPE), por disponibilizar a estrutura dos laboratórios e apoio técnico.

Aos professores do PGPV pelos ensinamentos e contribuições ao longo do mestrado.

Aos meus colegas de turma (João Pedro, Kaique Salvador, Renan Leite, Wagner Martins, Pedro Hermínio, Jheizon, Amanda Teresa, Thamila, Luíza e Brenda) pelos momentos vivenciados, trabalho em equipe, contribuições, e pela amizade.

Muito obrigado!

“Sempre espere ter sucesso e nunca pense que conseguiu”.

(Thomas Arnold)

RESUMO GERAL

A salinidade tornou-se uma grande ameaça para a produção agrícola e segurança alimentar em todo o mundo, especialmente em regiões de clima árido e semiárido. Mitigar o estresse salino é essencial para garantir a produção de alimentos. Trabalhos na literatura relatam o efeito isolado de diferentes atenuantes do estresse salino. No entanto, o uso combinado dos atenuantes pode ser mais eficiente para mitigar a salinidade. Nesse sentido, objetivou-se investigar a capacidade do silício aplicado isoladamente ou em combinação com *Trichoderma harzianum* e matéria orgânica em atenuar o estresse salino em sorgo forrageiro durante três ciclos. A influência dos atenuantes sob a concentração de Na^+ , K^+ e Cl^- no solo e o conteúdo destes elementos nas plantas também foi investigada. O experimento foi conduzido em um Neossolo Flúvico salino localizado em Parnamirim, semiárido de Pernambuco. O experimento, conduzido em blocos casualizados, consistiu de cinco tratamentos e quatro repetições: sorgo (controle); sorgo + Si (silício); sorgo + Si + MO (matéria orgânica); sorgo + Si + T (*Trichoderma harzianum*); e sorgo + Si + T + MO. As plantas de sorgo foram avaliadas durante três ciclos (primeiro corte mais duas rebrotas) entre junho de 2021 e abril de 2022. A irrigação foi realizada com base na reposição total da evapotranspiração da cultura (ETc), utilizando uma água salina com condutividade elétrica de $3,12 \text{ dS m}^{-1}$. Os atenuantes Si+MO, Si+T e Si+T+MO aumentaram o crescimento das plantas em 42,17, 35,49 e 27,51%, respectivamente, a mais que o tratamento controle. Nesta mesma ordem, os atenuantes Si+MO, Si+T e Si+T+MO promoveram ganhos de 39,42, 40,44 e 31,77% no acúmulo de biomassa nas plantas de sorgo, em comparação com a testemunha. Para a produtividade de massa seca acumulada, os atenuantes Si+MO, Si+T e Si+T+MO promoveram ganhos de 32,06, 33,13 e 25,72%, respectivamente, a mais que o tratamento controle. O silício sozinho não promoveu ganhos significativos de crescimento, acúmulo de biomassa e produtividade do sorgo. Os atenuantes reduziram a condutividade elétrica, Na^+ solúvel, Cl^- , Na^+ trocável e PST, em comparação com o tratamento controle, em todas as camadas do solo. As combinações Si+MO, Si+T e Si+T+MO interferiram positivamente no conteúdo de K^+ e Cl^- nas plantas. A aplicação do Si em combinação com *Trichoderma harzianum* e/ou matéria orgânica é uma alternativa promissora para potencializar o crescimento e a produtividade do sorgo forrageiro sob condições de estresse salino em regiões semiáridas.

Palavras-chave: Salinidade, sorgo forrageiro, semiárido, propriedades do solo, atenuação do estresse salino.

GENERAL ABSTRACT

Salinity has become a major threat to agricultural production and food security around the world, especially in regions with arid and semi-arid climate. Mitigating saline stress is essential to ensure food production. Studies in the literature report the isolated effect of different attenuating of saline stress. However, the combined use of attenuators may be more efficient to mitigate salinity. In this sense, the objective of this study was to investigate the ability of Silicon applied alone or in combination with *Trichoderma harzianum* and organic matter to attenuate saline stress in forage sorghum during for three cycles. The influence of attenuators under the concentration of Na^+ , K^+ and Cl^- in the soil and the content of these elements in the plants was also investigated. The experiment was conducted in a Neossolo Flúvico saline located in Parnamirim, semi-arid region of Pernambuco. The experiment, conducted in randomized blocks, consisted of five treatments and four replications: sorde (control); sorghum + Si; sorghum + Si + OM (organic matter); sorghum + Si + T (*Trichoderma harzianum*); and sorghum + Si + T + OM. Sorghum plants were evaluated during three cycles (first cut plus two regrowths) between June 2021 and April 2022. Irrigation was performed based on total crop evapotranspiration (ETc) replacement, using saline water with electrical conductivity of 3.12 dS m^{-1} . The attenuators Si+OM, Si+T and Si+T+OM increased plant growth by 42.17, 35.49 and 27.51%, respectively, more than the control treatment. In the same order, the attenuators Si+OM, Si+T and Si+T+OM promoted gains of 39.42, 40.44 and 31.77% in biomass accumulation in sorghum plants, compared to the control. For accumulated dry mass yield, the attenuators Si+OM, Si+T and Si+T+OM promoted gains of 32.06, 33.13 and 25.72%, respectively, more than the control treatment. Silicon alone did not promote significant gains in growth, biomass accumulation and sorghum productivity. The attenuators reduced electrical conductivity, soluble Na^+ , Cl^- , exchangeable Na^+ and PST, compared to the control treatment, in all soil layers. The combinations Si+OM, Si+T and Si+T+OM positively interfered with the content of K^+ and Cl^- in the plants. The application of Si in combination with *Trichoderma harzianum* and/or organic matter is promising alternative to enhance the growth and productivity of sorghum forage under conditions of saline stress in semiarid regions.

Keywords: Salinity, sorghum forage, semiarid, soil properties, attenuation of saline stress.

LISTA DE FIGURAS CAPÍTULO 1

Figura 1. Localização do campo experimental em Parnamirim-PE, semiárido do Brasil.....	33
Figura 2. Condições meteorológicas em Parnamirim – PE durante o período experimental. Prec. – Precipitação pluviométrica (mm dia ⁻¹); LI – Lâmina de irrigação (mm dia ⁻¹); ETo – Evapotranspiração de referência (mm dia ⁻¹).....	34
Figura 3. Altura das plantas (A), espessura do colmo (B) e número de perfilhos (C) do sorgo ao longo de três ciclos sucessivos sob estresse salino em função do uso de atenuantes.....	38
Figura 4. Massa fresca do colmo (A), massa fresca das folhas (B) e massa fresca da panícula (C) do sorgo sob estresse salino em função do uso de atenuantes.	40
Figura 5. Massa seca do colmo (A), massa seca das folhas (B) e massa seca da panícula do sorgo sob estresse salino em função do uso de atenuantes.....	41
Figura 6. Massa fresca da parte aérea (A), massa seca da parte aérea (B) e biomassa relativa do sorgo sob estresse salino em função do uso de atenuantes.....	42
Figura 7. Massa fresca da parte aérea acumulada (A), massa seca da parte aérea acumulada (B) e biomassa relativa acumulada do sorgo sob estresse salino em função do uso de atenuantes.	43

LISTA DE FIGURAS CAPÍTULO 2

Figura 1. Localização do campo experimental em Parnamirim-PE, semiárido do Brasil.....	56
Figura 2. Condições meteorológicas em Parnamirim – PE durante o período experimental. Prec. – Precipitação pluviométrica (mm dia^{-1}); LI – Lâmina de irrigação (mm dia^{-1}); ETo – Evapotranspiração de referência (mm dia^{-1}).....	57
Figura 3. Produtividade de massa fresca (A), produtividade de massa seca (B) do sorgo sob estresse salino em função do uso de atenuantes.	68
Figura 4. Produtividade de massa fresca acumulada (A), produtividade de massa seca acumulada (B) do sorgo sob estresse salino em função do uso de atenuantes.	69

LISTA DE TABELAS REVISÃO DE LITERATURA

Tabela 1. Classificação da água proposta por Richards (1954).....	16
---	----

LISTA DE TABELAS CAPÍTULO 1

Tabela 1. Caracterização química e textural do solo da área experimental.....	33
Tabela 2. Propriedades químicas da água utilizada na irrigação durante o período experimental.	35
Tabela 3. Análise do esterco caprino utilizado como fonte de matéria orgânica no experimento.	36

LISTA DE TABELAS CAPÍTULO 2

Tabela 1. Caracterização química e textura do solo da área experimental.....	56
Tabela 2. Propriedades químicas da água utilizada na irrigação durante o período experimental.	58
Tabela 3. Caracterização do esterco caprino utilizado como fonte de matéria orgânica no experimento.	59
Tabela 4. Atributos do solo na camada de 0-10 cm em resposta a aplicação de atenuantes do estresse salino.	61
Tabela 5. Atributos do solo na camada de 10-20 cm em resposta a aplicação de atenuantes do estresse salino.	62
Tabela 6. Atributos do solo na camada de 20-40 cm em resposta a aplicação de atenuantes do estresse salino.	64
Tabela 7. Atributos do solo na camada de 40-60 cm em resposta a aplicação de atenuantes do estresse salino.	65
Tabela 8. Conteúdo dos elementos nas frações e parte aérea do sorgo em função dos atenuantes do estresse salino.	66

SUMÁRIO

1. Introdução	13
2. REVISÃO DE LITERATURA	15
2.1. Irrigação com água salina em ambiente semiárido	15
2.1.1 Efeito dos sais no solo	16
2.1.2 Efeitos dos sais nas plantas e mecanismos de tolerância	17
2.2 Sorgo como alternativa para a agricultura biossalina	18
2.3 Silício como atenuante ao estresse salino	20
2.4 Efetividade do <i>Trichoderma harzianum</i> e matéria orgânica em atenuar os efeitos do estresse salino em culturas agrícolas	21
Referências	23
CAPÍTULO 1 – Silício combinado com matéria orgânica e <i>Trichoderma harzianum</i> mitigam o estresse salino em sorgo forrageiro	29
1 INTRODUÇÃO	31
2 MATERIAL E MÉTODOS	32
2.1 Descrição da área experimental	32
2.2 Tratamentos e design experimental	33
2.3 Crescimento e determinação de biomassa	36
2.4 Análise estatística	36
3 RESULTADOS	36
3.1 Crescimento do sorgo em resposta a aplicação dos atenuantes	36
3.2 Acúmulo de biomassa no sorgo influenciada pelos atenuantes do estresse salino	38
4 DISCUSSÃO	44
5 CONCLUSÕES	46
REFERÊNCIAS	47
CAPÍTULO 2 - Efeitos do silício isolado e combinado com matéria orgânica e <i>Trichoderma harzianum</i> nas propriedades do solo e produtividade do sorgo forrageiro irrigado com água salina	51
1 INTRODUÇÃO	53
2 MATERIAL E MÉTODOS	55
2.1 Área do estudo	55
2.2 Design experimental	57
2.3 Análise do solo	59
2.3.1 Íons solúveis	59
2.3.2 Complexo de troca	59
2.4 Produtividade	60
2.5 Conteúdo de sódio, potássio e cloreto na planta	60
2.6 Análise estatística	60
3 RESULTADOS	61
3.1 Propriedades químicas do solo	61
3.1.1 Camada 0-10 cm	61
3.1.2 Camada 10-20 cm	62
3.1.3 Camada 20-40 cm	63
3.1.4 Camada 40-60 cm	64
3.2 Avaliação nutricional das plantas	65
3.3 Produtividade de biomassa pelo sorgo	67
4 DISCUSSÃO	69
5 CONCLUSÕES	73

REFERÊNCIAS	73
-------------------	----

1. Introdução

A salinidade é um estresse abiótico que interfere no desenvolvimento das plantas, causando limitações na produção agrícola, especialmente em áreas áridas e semiáridas (ALI et al., 2021). A irrigação com águas salinas nessas regiões é o principal fator que promove a salinização dos solos (SHOBA; RAMAKRISHNAN, 2016). No mundo, 50% das áreas irrigadas (230 milhões de ha) são afetados pelos sais, e desses, 1,5 milhões de hectares estão salinizados (ALI et al., 2021; KHORSANDI; SIADATI; RASTEGARY, 2020). O excesso de sais no solo reduz a disponibilidade de água e causa desequilíbrio nutricional às plantas, afetando o crescimento e o rendimento das culturas (PESSOA et al., 2019a). O predomínio de sais de sódio também pode acarretar danos à estrutura, interferindo, principalmente, na infiltração da água, penetração das raízes e ciclagem de nutrientes, chegando a promover a degradação de todo o ambiente (SILVA et al., 2018). Dessa forma, é necessário buscar formas para mitigar a salinidade e garantir que a produção de alimentos seja mantida.

O silício (Si) é amplamente relatado na literatura como atenuante ao estresse salino em plantas (BIJALWAN et al., 2021; CUI et al., 2021; DAS et al., 2021; GUPTA et al., 2021a; KALOTERAKIS et al., 2021; XU et al., 2021). Entretanto, devido aos crescentes níveis salinos nos solos, é necessário buscar alternativas para maximizar a atenuação do Si a salinidade. Como alternativas, o uso do *Trichoderma harzianum* (T) e o aporte de matéria orgânica (MO) ao solo podem contribuir com o Si para mitigar a salinidade. Na literatura não há trabalhos que relatem o possível efeito sinérgico entre Si, MO e T na melhoria das condições de cultivo das plantas.

O Si é um elemento mineral abundante no solo e tem se destacado por aumentar a tolerância das plantas a vários estresses abióticos de forma sustentável e com baixo custo de aquisição (DAS et al., 2021; GUPTA et al., 2021a). A presença de Si na endoderme e exoderme da raiz forma uma barreira sílica e reduz o transporte de Na^+ e Cl^- para a parte aérea das plantas (GUPTA et al., 2021a). Além disso, aumenta a atividade enzimática (reduzindo o estresse oxidativo promovido pelas espécies reativas de oxigênio), ativa genes transportadores de metal, compartimenta sais em tecido vegetal, atua na homeostase celular, aumenta a atividade fotossintética, sequestra íons de sais nos vacúolos celulares das raízes e aumenta a produção de prolina e outros solutos nas raízes para reduzir o estresse osmótico (GUPTA et al., 2021a; KALOTERAKIS et al., 2021; XIE et al., 2014). No solo pode ocorrer a imobilização ou quelação do sódio, tornando-o menos disponível para as plantas (AHMAD et al., 2021).

Por outro lado, a MO é inversamente proporcional a concentração de sais nos solos, solos salinos apresentam baixo conteúdo de compostos orgânicos. Nos solos, em geral, a adição de MO melhora as propriedades químicas, físicas e biológica. Há relatos de que os compostos orgânicos formam agregados e melhoram a porosidade do solo, facilitando a lixiviação dos sais (FOULADIDORHANI et al., 2020); aumentam a capacidade de retenção de água no solo e adsorção de Na^+ (YOUSAF et al., 2021); e elevam o potencial osmótico da solução do solo, favorecendo a absorção de água pelas plantas (SANTOS et al., 2020). Também, tornam o meio mais propício para o aumento da biomassa microbiana do solo, melhorando a mineralização e disponibilidade dos nutrientes (SOUZA et al., 2017). A população de microrganismos do solo é bastante afetada pelo estresse osmótico (ZHANG et al., 2021), logo a adição de MO ao solo é indispensável para manter a atividade microbiana e, possivelmente, melhorar o desempenho dos microrganismos tolerantes ou que atenuam a salinidade.

Como terceiro fator, o *Trichoderma harzianum* (T) é um fungo conhecido por ser utilizado como agente de controle biológico de doenças em plantas (DALIAKOPOULOS et al., 2019). Esse fungo possui relação simbiótica com raízes das plantas em regiões áridas e semiáridas e, recentemente, foi notada a sua capacidade em mitigar a salinidade em plantas (YASMEEN; SIDDIQUI, 2018). Pesquisas têm demonstrado que o T atenua os efeitos dos sais por meio do aumento na atividade das enzimas antioxidantes, melhora o desenvolvimento radicular para maior absorção de água e nutrientes, produz osmorreguladores como a prolina, altera os níveis de fitohormônios e atua na eliminação de sódio, tornando as plantas mais tolerantes ao estresse salino (DALIAKOPOULOS et al., 2019; ZHANG et al., 2019). É importante salientar que o nível de tolerância das plantas a salinidade também varia de acordo com a espécie vegetal cultivada.

O sorgo é uma das plantas forrageiras mais importantes em todo o mundo, e seu cultivo é realizado, principalmente, em ambientes semiáridos, uma vez que é adaptado às condições edafoclimáticas dessas regiões (ALI et al., 2021). Os grãos de sorgo apresentam alto valor nutritivo e também são utilizados na alimentação humana, sendo esta cultura responsável pela nutrição de 500 milhões de pessoas no mundo (MONKHAN; CHEN; SOMTA, 2021). Além da possibilidade de cultivo em regiões semiáridas, o sorgo apresenta rendimento satisfatório quando cultivado sob condições de estresse salino (COSTA et al., 2020). A cultura do sorgo é considerada moderadamente tolerante ao estresse salino, no entanto, é susceptível nas fases de plântulas e reprodutiva (MASWADA;

DJANAGUIRAMAN; PRASAD, 2018; SONI et al., 2021). No semiárido brasileiro, o sorgo sudanense (*Sorghum sudanense*) é amplamente cultivado por apresentar tolerância ao estresse hídrico e salino (até 10 dS m⁻¹) (CARVALHO et al., 2021; JARDIM et al., 2021).

A associação do uso de Si, MO e T com plantas de sorgo pode ser capaz de melhorar sua capacidade de desenvolvimento e produção em solos salinos e deve ser estudada.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1. Irrigação com água salina em ambiente semiárido

A irrigação com água salina é uma prática comum em várias partes do mundo, especialmente em regiões áridas e semiáridas, que ocupam 41% da área global (PRASHANTHI et al., 2020). Com o processo de mudanças climáticas, é esperado um aumento no uso de água salinas para irrigação, devido à redução na disponibilidade da água de boa qualidade e destinação desta para outros usos (BIGAS, 2012).

Na região semiárida brasileira (SAB) a principal fonte de água para a irrigação é a subterrânea, extraída a partir da escavação de poços, visto que, nos períodos de estiagem as fontes superficiais reduzem drasticamente o nível de água, devido à grande evaporação e falta de chuvas (ANDRADE JÚNIOR et al., 2006). A qualidade da água subterrânea está diretamente ligada aos tipos de rochas que formam os solos e aos íons dissolvidos que são liberados da composição da rocha (SILVA JÚNIOR; GHEYI; MEDEIROS, 1999). Cerca de 70% do SAB é embasado sobre o cristalino, que são rochas impermeáveis, onde a água é armazenada em fendas ou fraturas nas rochas (BRAGA et al., 2015), e geralmente apresenta elevados teores salinos (LIMA, 2010).

Na resolução brasileira (Conama, 2005) a água é considerada salina quando apresenta salinidade igual ou superior a 30.000 - mg L⁻¹ (3,0%), salobra quando a salinidade encontra-se entre 500 e 30.000 (0,05% e 3,0%), e doce quando os valores são iguais ou inferiores a 500 (0,05%) (PEREIRA et al., 2015). Sódio (Na⁺) e cloreto (Cl⁻) são os íons mais encontrados nas águas dos poços do Semiárido brasileiro (FERNANDES et al., 2009; SAFDAR et al., 2019; SILVA; ARAÚJO; SOUZA, 2007).

A qualidade da água para irrigação é avaliada quanto à salinidade, sodicidade e toxicidade por íons (PESSOA et al., 2019a). A salinidade causa estresse abiótico nas plantas, reduzindo a disponibilidade de água e nutrientes para as plantas, afetando drasticamente o crescimento e rendimento das culturas; sodicidade refere-se à ação dos íons de sódio no solo; e por fim a toxicidade de íons refere-se aos danos nas plantas causados pela ação do boro,

cloreto, nitrato e sódio (BORTOLINI; MAUCIERI; BORIN, 2018; PESSOA et al., 2019a).

O parâmetro mais utilizado para se quantificar a salinidade do solo ou da água é por meio da condutividade elétrica (CE), que mede a corrente elétrica dos íons na solução (SILVA et al., 2018). Outro indicativo de qualidade da água é a razão de adsorção de sódio (RAS), que quantifica o risco de sodificação do solo. Nesse sentido, com a CE e a RAS é possível avaliar a limitação do uso da água para irrigação, de acordo com a classificação proposta por Richards (1954) (tabela 1).

Tabela 1. Classificação da água proposta por Richards (1954)

Critérios para classificação da água					
Salinidade			Sodicidade		
Classe	Risco	CE (dS m ⁻¹)	Classe	Risco	RAS
C1	B	< 0,25	S1	B	$RAS < 18,87 - 4,4 \log CE$
C2	M	0,25 – 0,75	S2	M	$18,87 - 4,44 \log CE < RAS < 31,31 - 6,66 \log CE$
C3	A	0,75 – 2,25	S3	A	$31,31 - 6,66 \log CE < RAS < 43,758,87 \log CE$
C4	MA	> 2,25	S4	MA	$RAS > 43,75 - 8,87 \log CE$

CE – condutividade elétrica; RAS – razão de adsorção de sódio; B – baixo; M – médio; A – alto; MA – muito alto.

Além da qualidade da água, o processo de salinização também é influenciado por outros aspectos, como o manejo e método de irrigação, e o tipo de solo; solos mais arenosos são menos afetados pelos sais, uma vez que possuem baixa adesão e são facilmente lixiviados pela ação das chuvas. O mesmo não ocorre em solos argilosos ou siltosos com baixa eficiência de drenagem, os sais são depositados na superfície do solo e dificilmente são removidos de forma natural pela lixiviação.

2.1.1 Efeito dos sais no solo

A princípio, a salinização do solo é dividida em dois grupos, a salinização primária e a secundária. A salinização primária ocorre de forma natural, resultante dos sais solúveis liberados no solo pelo intemperismo do material de origem, ascensão do lençol freático, deposição de sal oceânico carregado pelo vento ou pela chuva, e demanda atmosférica superior a precipitação pluvial; enquanto a salinidade secundária é formada pela atividade antrópica, principalmente o desmatamento e o uso contínuo da irrigação salina em solos que não dispõem de um sistema de drenagem artificial (ELGALLAL; FLETCHER; EVANS, 2016).

O primeiro impacto dos sais no solo é a redução do potencial osmótico da solução do solo, tornando a água menos disponível para as plantas; além disso, o sódio promove a dispersão das argilas, que reduz o volume dos poros, dificultando a infiltração da água e aumentando o escoamento superficial, que contribui para a erosão do solo (SILVA et al., 2018). O inverso acontece quando os íons presentes no solo são de cálcio, que devido ao tamanho reduzido do raio hidratado, as cargas positivas do Ca^{2+} conseguem neutralizar todas as cargas negativas das argilas e formar agregados estáveis, melhorando a estrutura do solo e a infiltração da água (BERTOSSO, 2013). Ainda, a microbiota do solo é afetada pelos efeitos osmótico e tóxico dos sais, alterando a fertilidade do solo, uma vez que não ocorre o processo de mineralização da matéria orgânica e ciclagem de nutrientes (SOUZA et al., 2017).

A classificação dos solos afetados por sais é realizada com base no pH do solo, condutividade elétrica do extrato de saturação (CEes) e porcentagem de sódio trocável (PST) (RICHARDS, 1954). Dessa forma, os solos são classificados em salinos (CEes $> 4 \text{ dS m}^{-1}$; PST $< 15\%$; pH $< 8,5$), salino-sódico (CEes $> 4 \text{ dS m}^{-1}$; PST $> 15\%$; pH $< 8,5$) e sódicos (CEes $< 4 \text{ dS m}^{-1}$; PST $> 15\%$; pH $> 8,5$) (RICHARDS, 1954). As principais classes de solos que apresentam problemas com salinidade no Semiárido brasileiro são os Fluvissois e Cambissolos (PESSOA et al., 2019b).

Os manejos mais utilizados para prevenir ou controlar a salinidade e sodicidade do solo incluem, gessagem, adição de matéria orgânica, aração profunda, lixiviação dos sais com água de boa qualidade, sistema de drenagem artificial para remover os sais do perfil do solo, práticas culturais como o uso de cobertura morta e adensamento das plantas, biorremediação com o uso de microrganismos tolerantes e fitorremediação com plantas extratoras de sais, manejo da irrigação, e biodrenagem com a atualização de espécies arbóreas para reduzir o nível do lençol freático em áreas alagadas (HUANG et al., 2022; MUKHOPADHYAY et al., 2021).

2.1.2 Efeitos dos sais nas plantas e mecanismos de tolerância

O estresse salino em plantas pode ser dividido em duas fases, a fase osmótica e fase iônica. A primeira corresponde ao acúmulo de sais no solo que reduz o potencial osmótico da solução do solo, dificultando a absorção de água e nutrientes pelas plantas, que resulta em fechamento estomático e estresse hídrico (MUNNS; TESTER, 2008). O fechamento estomático interrompe a assimilação de CO_2 , a transpiração e a absorção de água e nutrientes, afetando os processos metabólicos e o rendimento das plantas (SILVA et al., 2018).

A menor concentração interna de CO₂, resultante do fechamento estomático, reduz a atividade de diversas enzimas, incluindo a RuBisCo, limitando a carboxilação e a fotossíntese líquida (NEGRÃO; SCHMÖCKEL; TESTER, 2017). Além disso, a menor assimilação de CO₂ reduz a velocidade no funcionamento do Ciclo de Calvin, que resulta na sobra de elétrons livres que podem unir-se a moléculas de oxigênio e formar espécies reativas de oxigênio (EROs), causando danos oxidativos nas plantas (CAVALCANTI et al., 2007).

A fase iônica ocorre devido ao acúmulo de íons de sais em concentrações tóxicas nos tecidos vegetais, principalmente em folhas velhas, promovendo a senescência das folhas (MUNNS; TESTER, 2008). Isso ocorre quando a quantidade de sais é superior a capacidade das células em compartimentá-los nos vacúolos, a presença de sais no citoplasma inibe a atividade enzimática e, caso estejam presentes na parede celular podem promover a desidratação da célula (PARIHAR et al., 2015).

O Na⁺ e Cl⁻ são os principais íons que promovem distúrbios fisiológicos e metabólicos nas plantas (PARIHAR et al., 2015). O Na⁺ provoca distúrbios na regulação estomática, por meio da redução na absorção do íon potássio (K⁺), enquanto Cl⁻ degrada clorofila, reduzindo a capacidade fotossintética das plantas (NEGRÃO; SCHMÖCKEL; TESTER, 2017). Geralmente as plantas respondem a salinidade reduzindo as taxas fotossintéticas, e qualquer alteração na atividade fotossintética é refletida no crescimento e na produção de biomassa pelas plantas (WUNGRAMPHA et al., 2018). Entretanto, o dano da salinidade sobre a taxa fotossintética depende do nível de tolerância da espécie e da concentração salina.

As plantas tolerantes desenvolvem alguns mecanismos de tolerância a salinidade, como: exclusão de íons – exclusão líquida de íons tóxicos da parte aérea; tolerância tecidual – compartimentação dos íons tóxicos em tecidos (células e organelas sobcelulares); e tolerância independente de íons na parte aérea – crescimento e absorção de água independente da quantidade de Na⁺ acumulado na parte aérea (MUNNS; TESTER, 2008). Manutenção do estado de água na planta e produção de antioxidantes são outros mecanismos fisiológicos que contribuem para a tolerância das plantas a salinidade (NEGRÃO; SCHMÖCKEL; TESTER, 2017).

2.2 Sorgo como alternativa para a agricultura bioassalina

O sorgo é o quinto cereal mais importante em todo o mundo, sendo responsável pela nutrição de 500 milhões de pessoas (MONKHAN; CHEN; SOMTA, 2021; PUNIA et al., 2021). Além disso, é uma das culturas mais importantes para a nutrição animal (ZHU et al.,

2019), especialmente em regiões semiáridas. Devido a sua tolerância ao estresse hídrico, o sorgo pode ser cultivado em áreas com baixa precipitação pluvial e com baixa quantidade de água disponível para a irrigação (MENEZES et al., 2021), sendo uma ótima alternativa para aumentar o aporte de forragem em regiões semiáridas.

No Semiárido brasileiro, o sorgo é uma das principais fontes de alimentação para os animais, principalmente durante a época seca (OLIVEIRA et al., 2018). Sendo cultivado ao longo da estação chuvosa e estocado na forma de silagem ou feno para época seca, quando o déficit de forragem é maior. O sorgo, ainda, é cultivado com o uso da irrigação para manter a oferta de forragem durante todo o ano. Nesse caso, em grande parte das áreas essa cultura é irrigada com água salina, o que não seria possível para maioria das espécies forrageiras (SAADAT; HOMAEE, 2015).

De acordo com Huang (2018) o sorgo apresenta forte tolerância aos estresses abióticos, especialmente a salinidade. Logo, o cultivo dessa espécie em solos salinizados é uma alternativa para se produzir nesse tipo de solo marginalizado (HUANG, 2018). O manejo de plantas tolerantes em áreas que apresentam problemas com salinidade é denominado de agricultura bioassalada (KHORSANDI; SIADATI; RASTEGARY, 2020; MASTERS; BENES; NORMAN, 2007). Em geral, a agricultura bioassalada possui algumas vantagens, como: recuperação de solos salinizados, capacidade de utilizar água com diversos teores salinos na irrigação, e meio economicamente viável para explorar áreas salinizadas (BUENO; CORDOVILLA, 2021; KHORSANDI; SIADATI; RASTEGARY, 2020).

Diversos estudos mostraram que o nível de tolerância do sorgo a salinidade varia de acordo com o genótipo e o nível salino (HUANG, 2018). Estudando o comportamento de três cultivares de sorgo (Ponta Negra, BRS 506 e IPA 2502) submetidos ao estresse salino, Costa et al. (2020) verificaram que as cultivares Ponta Negra e IPA 2502 não apresentaram redução no rendimento de biomassa até a condutividade elétrica de $4,8 \text{ dS m}^{-1}$, enquanto a cultivar BRS 506 foi a mais sensível. Coelho et al. (2014) demonstraram que o nível de salinidade até 10 dS m^{-1} não interferiu na germinação de seis cultivares de sorgo, e a concentração salina entre 3 e 5 dS m^{-1} melhorou o crescimento inicial dos genótipos de sorgo estudados. O sorgo sudanense (*Sorghum sudanense*), por sua vez, apresenta tolerância a salinidade de até 10 dS m^{-1} (IPA, 2007). Pesquisas mais ousadas sugerem que o cultivo do sorgo é viável até a salinidade de 32 dS m^{-1} (BELOUCHRANI et al., 2020). Além disso, a engenharia genética parece promissora no desenvolvimento de novas cultivares tolerantes (HUANG, 2018).

As plantas de sorgo tolerantes ao estresse salino desenvolvem alguns mecanismos de tolerância a salinidade, como: bloqueio do transporte de sais para as folhas e brotos por meio de barreiras apoplásticas nas raízes (i.e. lamelas de suberinas e estrias de Caspary) para proteger o aparato fotossintético (OLIVEIRA; LOPES; GOMES-FILHO, 2020; YANG et al., 2020), expressão de genes que atuam na homeostase celular, compartimentação de íons tóxicos (Cl^- e Na^+) nos vacúolos das células nas raízes e exclusão desses sais (MANSOUR et al., 2021; SUI et al., 2015), ativação de enzimas antioxidantes (SOD, CAT, APX) para eliminação da EROs (MANSOUR et al., 2021; SUN; HUANG, 2014), e acúmulo de prolina e outros solutos compatíveis nas raízes para manter o equilíbrio osmótico (CALONE et al., 2020; RASTOGI et al., 2020). Além disso, o uso de diferentes atenuantes melhora a tolerância do sorgo a salinidade (MANSOUR et al., 2021).

2.3 Silício como atenuante ao estresse salino

O silício é o segundo elemento mais abundante na crosta terrestre, ficando atrás apenas do oxigênio (IMTIAZ et al., 2016). Por mais que o silício constitua até 10% da composição da massa seca de muitas espécies, não é considerado um nutriente essencial para o crescimento e desenvolvimento das plantas (HODSON et al., 2005; IMTIAZ et al., 2016). No entanto, é crescente o número de estudos que mostraram os benefícios do silício para as plantas, principalmente quando estão submetidas a estresses abióticos, como a salinidade (HURTADO et al., 2020; DAS et al., 2021; ETESAMI; JEONG, 2019; GUPTA et al., 2021a). Atualmente, o silício é um dos atenuantes mais promissores para aumentar a tolerância das plantas a salinidade (LIU; SOUNDARARAJAN; MANIVANNAN, 2019).

A presença de Si na endoderme e exoderme da raiz forma uma barreira sílica e reduz o transporte de Na^+ e Cl^- para a parte aérea das plantas (GUPTA et al., 2021a). Além disso, aumenta a atividade enzimática (reduzindo o estresse oxidativo promovido pelas espécies reativas de oxigênio), ativa genes transportadores de metal, atua na homeostase celular, aumenta a atividade fotossintética, sequestra íons de sais nos vacúolos celulares das raízes e aumenta a produção de prolina e outros solutos compatíveis nas raízes para reduzir o estresse osmótico; no solo pode ocorrer a imobilização ou quelação do sódio, tornando-o menos disponível para as plantas (AHMAD et al., 2021; GUPTA et al., 2021a; KALOTERAKIS et al., 2021; XIE et al., 2014).

Além disso, a suplementação com Si aumenta a rigidez e a ereção das folhas para melhorar a eficiência fotossintética e, ainda, pode estimular a produção de uma cutícula com

camada dupla nas folhas para aumentar a taxa fotossintética e reduzir a evapotranspiração (LIU; SOUNDARARAJAN; MANIVANNAN, 2019; VERMA et al., 2020). O silício previne a degradação de pigmentos fotossintéticos e regula a atividade de proteínas ligadas a fotossíntese, como a RubisCO, em condições de estresse salino (LIU; SOUNDARARAJAN; MANIVANNAN, 2019; SOUNDARARAJAN et al., 2017). O Si também favorece a absorção de K^+ em detrimento do Na^+ , melhorando a regulação na abertura estomática (IMTIAZ et al., 2016).

A suplementação com silício em plantas de sorgo submetidas ao estresse salino melhorou o acúmulo de prolina, assim como a atividade das enzimas antioxidantes, manteve a atividade fotossintética estável, e aumentou o crescimento e rendimento da cultura (DEHNAVI et al., 2022). Resultados semelhantes foram encontrados para várias culturas (HOFFMANN et al., 2020; HURTADO et al., 2021; LEMOS NETO et al., 2021; LIU; SOUNDARARAJAN; MANIVANNAN, 2019; RIZWAN et al., 2015; SALES et al., 2021). A concentração de silício nas plantas varia de acordo com a espécie, sistema de absorção e manejo de aplicação (HURTADO et al., 2021). Em plantas de sorgo, a aplicação foliar se demonstrou mais eficiente em comparação a aplicação via solo (HURTADO et al., 2020). Apesar dos benefícios do silício em mitigar a salinidade, devido aos crescentes níveis salinos nos solos, recomenda-se buscar formas de maximizar a atuação do silício em conjunto com outros atenuantes.

2.4 Efetividade do *Trichoderma harzianum* e matéria orgânica em atenuar os efeitos do estresse salino em culturas agrícolas

Geralmente os solos que apresentam problemas com salinidade apresentam baixa quantidade de matéria orgânica (OMAR et al., 2020). A adição de MO fornece cálcio (Ca^{2+}) a solução do solo, que remove o Na^+ da fase trocável do solo (FOULADIDORHANI et al., 2020). Os compostos orgânicos formam agregados e melhoram a porosidade do solo, facilitando a lixiviação do Na^+ (FOULADIDORHANI et al., 2020); aumenta a capacidade de retenção de água e adsorção de Na^+ (YOUSAF et al., 2021); eleva o potencial osmótico da solução do solo (SANTOS et al., 2020); e torna o meio mais propício para o aumento da biomassa microbiana do solo, melhorando a mineralização e disponibilidade dos nutrientes (SOUZA et al., 2017).

A MO reduz a toxicidade dos íons de sais (Na^+ , Cl^- e B^-) nas plantas e fornece nutrientes, melhorando o desempenho e rendimento das culturas (FOULADIDORHANI et al.,

2020; YARAMI; SEPASKHAH, 2015). A adição de MO ao solo aumentou o teor de carbono orgânico no solo, assim como a atividade microbiana, e reduziu a razão Na^+/K^+ em decorrência da maior concentração de K^+ (FOULADIDORHANI et al., 2020; ZHANG et al., 2021). Em um experimento conduzido por 10 anos, a aplicação de esterco (25 t ha^{-1}) reduziu significativamente a salinidade e a sodicidade do solo, ao mesmo tempo que aumentou a sua fertilidade (HUANG et al., 2022). Com isso, o uso de matéria orgânica é amplamente recomendado para recuperação, mitigação e melhoria dos solos afetados por sais, uma vez que está prontamente disponível na maioria das propriedades rurais (HUANG et al., 2022; LI-PING et al., 2015).

A população de microrganismos do solo é bastante afetada pelo estresse osmótico (ZHANG et al., 2021). No entanto, a MO estimula a proliferação de bactérias e fungos que atuam em simbiose com as plantas em condições de salinidade (ZHANG et al., 2021), incluindo o *Trichoderma harzianum* (KONG et al., 2021). O T é um fungo endofítico conhecido por ser utilizado como agente de controle biológico em doenças de plantas (DALIAKOPOULOS et al., 2019). O T possui relação simbiótica com as raízes das plantas principalmente em regiões áridas e semiáridas, e recentemente foi notada a sua capacidade em mitigar a salinidade em plantas (YASMEEN; SIDDIQUI, 2018).

O T estimula as plantas a produzirem compostos (auxinas, etileno, giberelinas e enzimas antioxidantes) que melhoram a tolerância das plantas ao estresse salino (HIDANGMAYUM; DWIVEDI; PADMANABH DWIVEDI, 2018). T ameniza o estresse salino por meio do aumento na atividade das enzimas antioxidantes e a expressão gênica, melhora o desenvolvimento radicular e a absorção de água e nutrientes, aumenta os níveis de prolina, altera os níveis de fitohormônios e atua na eliminação de sais, tornando as plantas mais tolerantes ao estresse salino (DALIAKOPOULOS et al., 2019; ZHANG et al., 2019). O T também tem a capacidade de aumentar a taxa fotossintética e o rendimento das culturas (HIDANGMAYUM; DWIVEDI; PADMANABH DWIVEDI, 2018).

Estudando o comportamento da germinação e crescimento inicial das plântulas de milho e arroz sob estresse salino, Yasmeen e Siddiqui, (2018) observaram que as sementes tratadas com T apresentaram germinação mais uniforme e rápida, e as plântulas melhoraram o crescimento. Além disso, aspectos fisiológicos como a condutância estomática, pigmentos fotossintéticos e enzimas antioxidantes foram melhorados. A aplicação do T também reduziu a absorção e o acúmulo de Na^+ e Cl^- nas plântulas. Resultados semelhantes foram encontrados para diversas culturas, como o tomate (DALIAKOPOULOS et al., 2019), trigo (RAWAT et

al., 2011), pepino (ZHANG et al., 2019), cevada (GUPTA et al., 2021b), soja (KHOMARI et al., 2018) e espinafre (KONG et al., 2021).

Referências

AHMAD, A. et al. Synergistic effects of nitric oxide and silicon on promoting plant growth, oxidative stress tolerance and reduction of arsenic uptake in *Brassica juncea*. **Chemosphere**, v. 262, p. 128384, 2021.

ALI, A. Y. A. et al. Gibberellic acid and nitrogen efficiently protect early seedlings growth stage from salt stress damage in Sorghum. **Scientific Reports**, v. 11, n. 1, 2021.

ANDRADE JÚNIOR, A. S. et al. Uso e qualidade da água subterrânea para irrigação no semi-árido piauiense. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 10, n. 4, p. 873–880, 2006.

BELOUCHRANI, A. S. et al. Study of the interaction salinity: phosphorus fertilization on Sorghum. **Journal of Plant Growth Regulation**, v. 39, n. 3, p. 1205–1210, 2020.

BERTOSSI, A. P. A. Influência da aplicação de águas residuárias sobre a infiltração de água no solo. **Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável**, v. 8, n. 5, p. 188–193, 2013.

BIGAS, H. The Global Water Crisis: Addressing an Urgent Security Issue. **Papers for interaction Council**, p. 176, 2012.

BIJALWAN, P. et al. Mitigation of saline conditions in watermelon with mycorrhiza and silicon application. **Saudi Journal of Biological Sciences**, v. 28, n. 7, p. 3678–3684, 2021.

BORTOLINI, L.; MAUCIERI, C.; BORIN, M. A tool for the evaluation of irrigation water quality in the arid and semi-arid regions. **Agronomy**, v. 8, n. 2, p. 23, 2018.

BRAGA, E. A. S. et al. Avaliação da salinidade das águas subterrâneas de poços localizados em diferentes cidades do interior do estado de Ceará. **Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental**, 2015.

BUENO, M.; CORDOVILLA, M. P. Plant growth regulators application enhance tolerance to salinity and benefit the halophyte *Plantago coronopus* in saline agriculture. **Plants**, v. 10, n. 9, 2021.

CARVALHO, A. A. et al. Coupling water resources and agricultural practices for sorghum in a semiarid environment. **Water**, v. 13, n. 16, 2021.

CALONE, R. et al. Salt tolerance and na allocation in sorghum bicolor under variable soil and water salinity. **Plants**, v. 9, n. 5, p. 561, 2020.

CAVALCANTI, F. R. et al. Roots and leaves display contrasting oxidative response during salt stress and recovery in cowpea. **Journal of Plant Physiology**, v. 164, n. 5, p. 591–600, 2007.

COELHO, D. S. et al. Germinação e crescimento inicial de variedades de sorgo forrageiro submetidas ao estresse salino. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 18, n. 1, p. 25–30, 2014.

CONAMA, Conselho Nacional do Meio Ambiente (2005). Resolução nº. 357, de 17 de março

de 2005. CONAMA, MMA, 23 pp. Disponível em: <http://www.cetesb.sp.gov.br/Agua/praias/res_conama_357_05.pdf>. Acesso em 28/02/2023.

COSTA, J. P. N. et al. Desempenho de variedades de sorgo dupla aptidão submetidas a diferentes lâminas de irrigação com água salina. **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**, v. 18, n. 3, p. 417–428, 2020.

CUI, J. et al. Silicon alleviates salinity stress in licorice (*Glycyrrhiza uralensis*) by regulating carbon and nitrogen metabolism. **Scientific Reports**, v. 11, n. 1, 2021.

DALIAKOPOULOS, I. N. et al. Effectiveness of *Trichoderma harzianum* in soil and yield conservation of tomato crops under saline irrigation. **CATENA**, v. 175, p. 144–153, 2019.

DAS, P. et al. Silicon augments salt tolerance through modulation of polyamine and GABA metabolism in two indica rice (*Oryza sativa* L.) cultivars. **Plant Physiology and Biochemistry**, v. 166, p. 41–52, 2021.

DEHNAVI, A. R. et al. Foliar Application of Salicylic Acid Improves Salt Tolerance of Sorghum (*Sorghum bicolor* (L.) Moench). **Plants**, v. 11, n. 3, p. 368, 2022.

ELGALLAL, M.; FLETCHER, L.; EVANS, B. Assessment of potential risks associated with chemicals in wastewater used for irrigation in arid and semiarid zones: a review. **Agricultural Water Management**, v. 177, p. 419–431, 2016.

ETESAMI, H.; JEONG, B. R. Importance of silicon in fruit nutrition: agronomic and physiological implications. **Fruit Crops: Diagnosis and Management of Nutrient Constraints**, p. 255–277, 2019.

FERNANDES, J. G. et al. Qualidade físico-química das águas utilizadas no Perímetro Irrigado Cachoiera II, Serra Talhada, Pernambuco. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v. 4, n. 1, p. 27–34, 2009.

FOULADIDORHANI, M. et al. Biochar, manure, and super absorbent increased wheat yields and salt redistribution in a saline-sodic soil. **Agronomy Journal**, v. 112, n. 6, p. 5193–5205, 2020.

GUPTA, B. K. et al. Silicon nutrition stimulates Salt-Overly Sensitive (SOS) pathway to enhance salinity stress tolerance and yield in rice. **Plant Physiology and Biochemistry**, v. 166, p. 593–604, 2021a.

GUPTA, S. et al. Inoculation of barley with *Trichoderma harzianum* T-22 modifies lipids and metabolites to improve salt tolerance. **Journal of Experimental Botany**, v. 72, n. 20, p. 7229–7246, 2021b.

HIDANGMAYUM, A.; DWIVEDI, P.; PADMANABH DWIVEDI, C. Plant responses to *Trichoderma* spp. and their tolerance to abiotic stresses: a review. **Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry**, v. 7, n. 1, p. 758–766, 2018.

HODSON, M. J. et al. Phylogenetic variation in the silicon composition of plants. **Annals of Botany**, v. 96, n. 6, p. 1027–1046, 2005.

HOFFMANN, J. et al. A review on the beneficial role of silicon against salinity in non-accumulator crops: tomato as a model. **Biomolecules**, v. 10, n. 9, p. 1–15, 2020.

HUANG, L. et al. Long-term combined effects of tillage and rice cultivation with phosphogypsum or farmyard manure on the concentration of salts, minerals, and heavy metals

of saline-sodic paddy fields in Northeast China. **Soil and Tillage Research**, v. 215, 2022.

HUANG, R. D. Research progress on plant tolerance to soil salinity and alkalinity in sorghum. **Journal of Integrative Agriculture**, v. 17, n. 4, p. 739–746, 2018.

HURTADO, A. C. et al. Different methods of silicon application attenuate salt stress in sorghum and sunflower by modifying the antioxidative defense mechanism. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, v. 203, 2020.

HURTADO, A. C. et al. Silicon alleviates sodium toxicity in sorghum and sunflower plants by enhancing ionic homeostasis in roots and shoots and increasing dry matter accumulation. **Silicon**, v. 13, n. 2, p. 475–486, 2021.

IPA, Instituto Agrônômico de Pernambuco. Sorgo sudão: Sudan 4202. Cultivar tolerante a salinidade e com aptidão para feno (2007). Disponível online: <http://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/487334> (acesso em 03 de agosto de 2023).

IMTIAZ, M. et al. Silicon occurrence, uptake, transport and mechanisms of heavy metals, minerals and salinity enhanced tolerance in plants with future prospects: a review. **Journal of Environmental Management**, v. 183, p. 521–529, 2016.

JARDIM, A. M. R. F. et al. Intercropping forage cactus and sorghum in a semi-arid environment improves biological efficiency and competitive ability through interspecific complementarity. **Journal of Arid Environments**, v. 188, 2021.

KALOTERAKIS, N. et al. Silicon application and plant growth promoting rhizobacteria consisting of six pure *Bacillus* species alleviate salinity stress in cucumber (*Cucumis sativus* L.). **Scientia Horticulturae**, v. 288, p. 110383, 2021.

KHOMARI, S. et al. Improvement of soybean seedling growth under salinity stress by biopriming of high-vigour seeds with salt-tolerant isolate of *Trichoderma harzianum*. **New Zealand Journal of Crop and Horticultural Science**, v. 46, n. 2, p. 117–132, 2018.

KHORSANDI, F.; SIADATI, S. M. H.; RASTEGARY, J. Haloengineering as a vital component of sustainable development in salt-affected ecosystems. **Environmental Development**, v. 35, 2020.

KONG, F. et al. Integrated usage of *Trichoderma harzianum* and biochar to ameliorate salt stress on spinach plants. **Archives of Agronomy and Soil Science**, p. 1–22, 2021.

LEMO NETO, H. S. et al. Silicon supplementation induces physiological and biochemical changes that assist lettuce salinity tolerance. **Silicon**, v. 13, n. 11, p. 4075–4089, 2021.

LI-PING, L. et al. Ameliorants improve saline-alkaline soils on a large scale in northern Jiangsu Province, China. **Ecological Engineering**, v. 81, p. 328–334, 2015.

LIMA, O. A. L. Estruturas geotérmica e hidroquímica do sistema aquífero cristalino da bacia do alto rio Curaçá, semi-árido da Bahia. **Revista Brasileira de Geofísica**, v. 28, n. 3, p. 445–461, 2010.

LIU, B.; SOUNDARARAJAN, P.; MANIVANNAN, A. Mechanisms of silicon-mediated amelioration of salt stress in plants. **Plants**, v. 8, n. 9, 2019.

MANSOUR, M. M. F. et al. Sorghum under saline conditions: responses, tolerance mechanisms, and management strategies. **Planta**, v. 254, n. 2, 2021.

- MASTERS, D. G.; BENES, S. E.; NORMAN, H. C. Biosaline agriculture for forage and livestock production. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v. 119, n. 3–4, p. 234–248, 2007.
- MASWADA, H. F.; DJANAGUIRAMAN, M.; PRASAD, P. V. V. Seed treatment with nano-iron (III) oxide enhances germination, seedling growth and salinity tolerance of sorghum. **Journal of Agronomy and Crop Science**, v. 204, n. 6, p. 577–587, 2018.
- MENEZES, C. B. et al. **Importância do sorgo para o abastecimento de grãos, forragem e bioenergia no Brasil**. 2021.
- MONKHAN, T.; CHEN, X.; SOMTA, P. BADH1 is associated with fragrance in sorghum (*Sorghum bicolor* (L.) Moench) cultivar ‘Ambemohor’. **Journal of Genetics**, v. 100, n. 1, 2021.
- MUKHOPADHYAY, R. et al. Soil salinity under climate change: Challenges for sustainable agriculture and food security. **Journal of Environmental Management**, v. 280, 2021.
- MUNNS, R.; TESTER, M. Mechanisms of salinity tolerance. **Annual Review of Plant Biology**, v. 59, p. 651–681, 2008.
- NEGRÃO, S.; SCHMÖCKEL, S. M.; TESTER, M. Evaluating physiological responses of plants to salinity stress. **Annals of Botany**, v. 119, n. 1, p. 1–11, 2017.
- OLIVEIRA, B. S. et al. Silage quality of six sorghum cultivars for sheep. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 53, n. 2, p. 256–264, 2018.
- OLIVEIRA, D. F.; LOPES, L. S.; GOMES-FILHO, E. Metabolic changes associated with differential salt tolerance in sorghum genotypes. **Planta**, v. 252, n. 3, 2020.
- OMAR, Z. et al. Spectroscopic and chromatographic investigation of soil organic matter composition for different agrosystems from arid saline soils from Southeastern Tunisia. **Arabian Journal of Geosciences**, v. 13, n. 13, 2020.
- PARIHAR, P. et al. Effect of salinity stress on plants and its tolerance strategies: a review. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 22, n. 6, p. 4056–4075, 2015.
- PEREIRA, S. P. et al. **Dessalinização de águas**. Oficina de textos, 2015.
- PESSOA, L. G. M. et al. Saline water irrigation in semiarid region: II - effects on growth and nutritional status of onions. **Australian Journal of Crop Science**, v. 13, n. 7, p. 1177–1182, 2019a.
- PESSOA, L. G. M. et al. Characterization and Classification of Halomorphic Soils in the Semiarid Region of Northeastern Brazil. **Journal of Agricultural Science**, v. 11, n. 4, p. 405, 2019b.
- PRASHANTHI, B. et al. Impact of saline water on growth, yield, quality, nutrient uptake in various crops: a review. **International Journal of Chemical Studies**, v. 8, n. 2, p. 2344–2347, 2020.
- PUNIA, H. et al. Discerning morpho-physiological and quality traits contributing to salinity tolerance acquisition in sorghum [*Sorghum bicolor* (L.) Moench]. **South African Journal of Botany**, v. 140, p. 409–418, 2021.
- RASTOGI, A. et al. JIP-test as a tool to identify salinity tolerance in sweet sorghum genotypes. **Photosynthetica**, v. 58, n. Special Issue, p. 518–528, 2020.

RAWAT, L. et al. Alleviation of the adverse effects of salinity stress in wheat (*Triticum aestivum* L.) by seed biopriming with salinity tolerant isolates of *Trichoderma harzianum*. **Plant and Soil**, v. 347, n. 1, p. 387–400, 2011.

RICHARDS, L. A. **Diagnosis and improvement of saline and alkali soils**. Agricultur ed. Vol. 78. N. 2. LWW, 1954.

RIZWAN, M. et al. Mechanisms of silicon-mediated alleviation of drought and salt stress in plants: a review. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 22, n. 20, p. 15416–15431, 2015.

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

SAFDAR, H. et al. A review: Impact of salinity on plant growth. **Nature and Science**, v. 17, n. 1, p. 34–40, 2019.

SALES, A. C. et al. Silicon mitigates nutritional stress in quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.). **Scientific Reports**, v. 11, n. 1, 2021.

SANTOS, R. H. S. et al. Matéria orgânica como atenuante da salinidade da água de irrigação na cultura do milho. **Colloquium Agrariae**, v. 16, n. 3, p. 84–93, 2020.

SHOBA, P.; RAMAKRISHNAN, S. S. Modeling the contributing factors of desertification and evaluating their relationships to the soil degradation process through geomatic techniques. **Solid Earth**, v. 7, n. 2, p. 341–354, 2016.

SILVA, F. J. A.; ARAÚJO, A. L.; SOUZA, R. O. Águas subterrâneas no Ceará: poços instalados e salinidade. **Revista Tecnologia**, v. 28, n. 2, 2007.

SILVA, J. R. I. et al. Estresse salino como desafio para produção de plantas forrageiras. **Revista Brasileira de Tecnologia Aplicada nas Ciências Agrárias**, v. 11, n. 3, 2018.

SILVA JÚNIOR, L. G. A.; GHEYI, H. R.; MEDEIROS, J. F. Composição química de águas do cristalino do nordeste brasileiro. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 3, n. 1, p. 11–17, 1999.

SONI, P. G. et al. Deficit saline water irrigation under reduced tillage and residue mulch improves soil health in sorghum-wheat cropping system in semi-arid region. **Scientific Reports**, v. 11, n. 1, 2021.

SOUNDARARAJAN, P. et al. Exogenous supplementation of silicon improved the recovery of hyperhydric shoots in *dianthus caryophyllus* L. By stabilizing the physiology and protein expression. **Frontiers in Plant Science**, v. 8, 2017.

SOUZA, M. C. M. R. et al. Tolerância a salinidade e qualidade de mudas de noni sob diferentes ambientes e matéria orgânica. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, v. 11, n. 7, p. 2052–2062, 2017.

SUI, N. et al. Identification and transcriptomic profiling of genes involved in increasing sugar content during salt stress in sweet sorghum leaves. **BMC Genomics**, v. 16, n. 1, 2015.

SUN, L.; HUANG, R. Responses to salt stress of protective enzyme system in sorghum seedlings. **Journal of Shenyang Agricultural University**, v. 45, n. 2, p. 134–137, 2014.

VERMA, K. K. et al. The Impact of Silicon on Photosynthetic and Biochemical Responses of Sugarcane under Different Soil Moisture Levels. **Silicon**, v. 12, n. 6, p. 1355–1367, 2020.

- WUNGRAMPHA, S. et al. Photosynthesis and salinity: are these mutually exclusive? **Photosynthetica**, v. 56, n. 1, p. 366–381, 2018.
- XIE, Z. et al. Effects of silicon on photosynthetic characteristics of maize (*Zea mays* L.) on alluvial soil. **Scientific World Journal**, v. 2014, p. 6, 2014.
- XU, S. et al. The synergistic effects of silicon and selenium on enhancing salt tolerance of maize plants. **Environmental and Experimental Botany**, v. 187, 2021.
- YANG, Z. et al. Photosynthetic regulation under salt stress and salt-tolerance mechanism of sweet Sorghum. **Frontiers in Plant Science**, v. 10, 2020.
- YARAMI, N.; SEPASKHAH, A. R. Saffron response to irrigation water salinity, cow manure and planting method. **Agricultural Water Management**, v. 150, p. 57–66, 2015.
- YASMEEN, R.; SIDDIQUI, Z. S. Ameliorative effects of *Trichoderma harzianum* on monocot crops under hydroponic saline environment. **Acta Physiologiae Plantarum**, v. 40, n. 1, 2018.
- YOUSAF, M. T. BIN et al. Effect of three different types of biochars on eco-physiological response of important agroforestry tree species under salt stress. **International Journal of Phytoremediation**, v. 23, n. 13, p. 1412–1422, 2021.
- ZHANG, F. et al. *Trichoderma harzianum* mitigates salt stress in cucumber via multiple responses. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, v. 170, p. 436–445, 2019.
- ZHANG, Z. et al. Organic fertilizer enhances rice growth in severe saline–alkali soil by increasing soil bacterial diversity. **Soil Use and Management**, v. 38, n. 1, p. 964–977, 2021.
- ZHU, L. et al. Phenotypic and proteomic characteristics of sorghum (*Sorghum bicolor*) albino lethal mutant sbe6-a1. **Plant Physiology and Biochemistry**, v. 139, p. 400–410, 2019.

CAPÍTULO 1 – Silício combinado com matéria orgânica e *Trichoderma harzianum* mitigam o estresse salino em sorgo sudanense

RESUMO

O estresse salino é um dos principais fatores abióticos que limita o crescimento das plantas cultivadas em todo o mundo. Em regiões áridas e semiáridas isso é agravado com o uso excessivo das águas subterrâneas na irrigação que, em grande parte, contém elevadas concentrações de sais. É necessário buscar alternativas que viabilizem a agricultura sob essas condições. Nesse sentido, objetivou-se investigar a capacidade do silício, aplicado isoladamente ou em combinação com *Trichoderma harzianum* e matéria orgânica, em atenuar o estresse salino em sorgo sudanense. O experimento foi conduzido em um Neossolo Flúvico salino localizado em Parnamirim, semiárido de Pernambuco, em blocos casualizados, com cinco tratamentos e quatro repetições: sorgo (controle); sorgo + Si; sorgo + Si + MO (matéria orgânica); sorgo + Si + T (*Trichoderma harzianum*); e sorgo + Si + T + MO. As plantas de sorgo foram avaliadas durante três ciclos (primeiro corte mais duas rebrotas) entre junho de 2021 e abril de 2022. Os atenuantes Si+MO, Si+T e Si+T+MO aumentaram o crescimento das plantas em 42,17, 35,49 e 27,51%, respectivamente, em relação ao tratamento controle. Nesta mesma ordem, os atenuantes Si+MO, Si+T e Si+T+MO promoveram ganhos de 39,42, 40,44 e 31,77% no acúmulo de biomassa nas plantas de sorgo, em comparação com a testemunha. O silício sozinho não promoveu ganhos significativos de crescimento e acúmulo de biomassa nas plantas. A aplicação do Si em combinação com *Trichoderma harzianum* e/ou matéria orgânica é uma alternativa promissora para potencializar o crescimento do sorgo sudanense sob condições de estresse salino em regiões semiáridas.

Palavras-chave: *Sorghum sudanense*; Salinidade; Atenuantes do estresse salino; Semiárido.

ABSTRACT

Salt stress is one of the main abiotic factors that limit the growth of cultivated plants worldwide. In arid and semiarid regions, this is aggravated by the excessive use of groundwater in irrigation, which contains high salt concentrations. It is necessary to seek alternatives that make agriculture viable under these conditions. In this sense, this study aimed to investigate the ability of silicon applied alone or in combination with *Trichoderma harzianum* and organic matter to attenuate salt stress in forage sorghum. The experiment was conducted in a saline Fluvisol located in Parnamirim, semiarid region of Pernambuco, Brazil.

The experiment, conducted in randomized blocks, consisted of five treatments and four replications: sorghum (control); sorghum + Si; sorghum + Si + OM (organic matter); sorghum + Si + T (*Trichoderma harzianum*); and sorghum + Si + T + OM. Sorghum plants were evaluated during three cycles (first cut plus two regrowths) between June 2021 and April 2022. The attenuators Si+OM, Si+T, and Si+T+OM, increased plant growth by 42.17, 35.49 and 27.51%, respectively, more than the control treatment. In the same order, the attenuators Si+OM, Si+T, and Si+T+OM promoted gains of 39.42, 40.44, and 31.77% in biomass accumulation in sorghum plants compared to the control. Silicon alone did not promote significant growth gains and biomass accumulation in plants. Applying Si in combination with *Trichoderma harzianum* and, or organic matter is a promising alternative to enhance forage sorghum growth under saline stress conditions in semiarid regions.

Keywords: *Sorghum sudanense*; Salinity; Salt stress attenuator; Semiarid.

1 INTRODUÇÃO

Erro! Indicador não definido. Salinização dos solos é umas das principais limitações na produção de alimentos em áreas de clima árido e semiárido no mundo (MUNNS, 2002). No Semiárido brasileiro é comum a utilização de águas na irrigação com elevadas concentrações de sais, devido à baixa oferta de águas de boa qualidade para esta finalidade. Desta forma, é importante investigar formas de atenuar os efeitos do estresse salino sobre as plantas e potencializar o crescimento vegetal.

O silício é relatado na literatura como um elemento atenuador importante do estresse salino e que tem despertado o interesse para a produção vegetal (CANTUÁRIO et al., 2014; DHIMAN et al., 2021). O silício melhora a tolerância das plantas aos estresses abióticos, como a salinidade do solo, atuando principalmente na regulação fotossintética, ativação de enzimas antioxidantes, formação de barreira sílica nas raízes para reduzir a passagem de sais para a parte aérea e aumenta a produção de osmorreguladores para ajustar o potencial osmóticos das raízes com o solo (COSKUN et al., 2016). Quando associado a outros atenuantes, a capacidade de mitigação do silício pode ser melhorada (CHAKMA et al., 2022; KALOTERAKIS et al., 2021). No entanto, relatos na literatura sobre eficácia do silício combinado com outros atenuadores para mitigar o estresse salino em plantas são escassos.

A matéria orgânica de origem animal promove melhorias no solo e possibilita condições de cultivo mais favoráveis ao desenvolvimento vegetal, frente ao processo de salinização ou utilização de áreas salinas. Condicionadores orgânicos (esterco de curral) contribuem para reduzir a porcentagem de sódio trocável (PST) no solo, devido a liberação de Ca^{2+} e Mg^{2+} que substituem o Na^+ no complexo de troca (PESSOA et al., 2022). Também aumenta a fertilidade, retenção de água e agregação dos solos, interferindo positivamente na infiltração de água e lixiviação dos sais (MIRANDA et al., 2018). A matéria orgânica possui baixo custo de aquisição e normalmente é disponibilizada em grande parte das propriedades rurais (HUANG et al., 2022).

Por outro lado, o *Trichoderma harzianum* é um fungo que possui relação simbiótica com as raízes das plantas e libera uma variedade de compostos que melhoram a resposta das plantas aos estresses abióticos, especialmente a salinidade (AFZAL et al., 2006). Além disso, melhora o crescimento radicular, atividade de enzimas antioxidantes, produção de osmorreguladores, e taxa fotossintética, que são mecanismos que controlam o nível de tolerância das plantas a salinidade (ZHANG et al., 2019).

Alguns trabalhos na literatura têm relatado efeitos isolados destes atenuantes do estresse salino e esforços precisam ser feitos para testar a eficácia das suas interações (GUPTA et al., 2021b; OLIVEIRA et al., 2022; YIN et al., 2016). Com isso, foi levantada a hipótese que a atuação conjunta da matéria orgânica e/ou do *T. harzianum* potencializam o efeito atenuante do silício, melhorando o desempenho do sorgo forrageiro em ambiente salino no semiárido.

Na região semiárida brasileira, a oferta de forragem é regulada pelas condições climáticas, quase sempre desfavoráveis. O sorgo sudanense (*Sorghum sudanense*) é uma alternativa para suprir essa demanda, visto que, é tolerante as condições edafoclimáticas dessa região (JARDIM et al., 2020). A cultura do sorgo também é considerada moderadamente tolerante ao estresse salino, no entanto, é susceptível nas fases de plântulas e reprodutiva (MASWADA; DJANAGUIRAMAN; PRASAD, 2018; SONI et al., 2021). Diante deste contexto, é importante investigar maneiras e formas de atenuar o estresse salino sobre o sorgo forrageiro no Semiárido brasileiro, como forma de suprir a demanda de forragem da região.

Com isso, objetivou-se avaliar a eficácia do silício aplicado isoladamente ou em combinação com *T. harzianum* e matéria orgânica em mitigar o estresse salino e potencializar o crescimento do sorgo forrageiro.

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Descrição da área experimental

O experimento foi conduzido em campo na Estação de Agricultura Irrigada de Parnamirim - Universidade Federal Rural de Pernambuco (UFRPE), em Parnamirim –PE, Semiárido do Brasil (latitude 8° 5' 08'' S, longitude 39° 34' 27'' O e altitude de 390 m) (Figura 1). Antes da implantação do experimento, a área foi ocupada com cultivos de banana irrigada com água proveniente do Rio Brígida. O solo da área é um Neossolo Flúvico (Tabela 1), classificado como salino (EMBRAPA, 2013).

O clima da região é Semiárido do tipo BSw^h, quente e seco, com ocorrência de chuvas no verão e seca no inverno, conforme caracterização de Köppen. A precipitação pluvial média da região é de 431,8 mm, com chuvas concentradas entre os meses de dezembro a abril (RODRIGUES et al., 2019). A temperatura média do ar no município é de 26 °C.

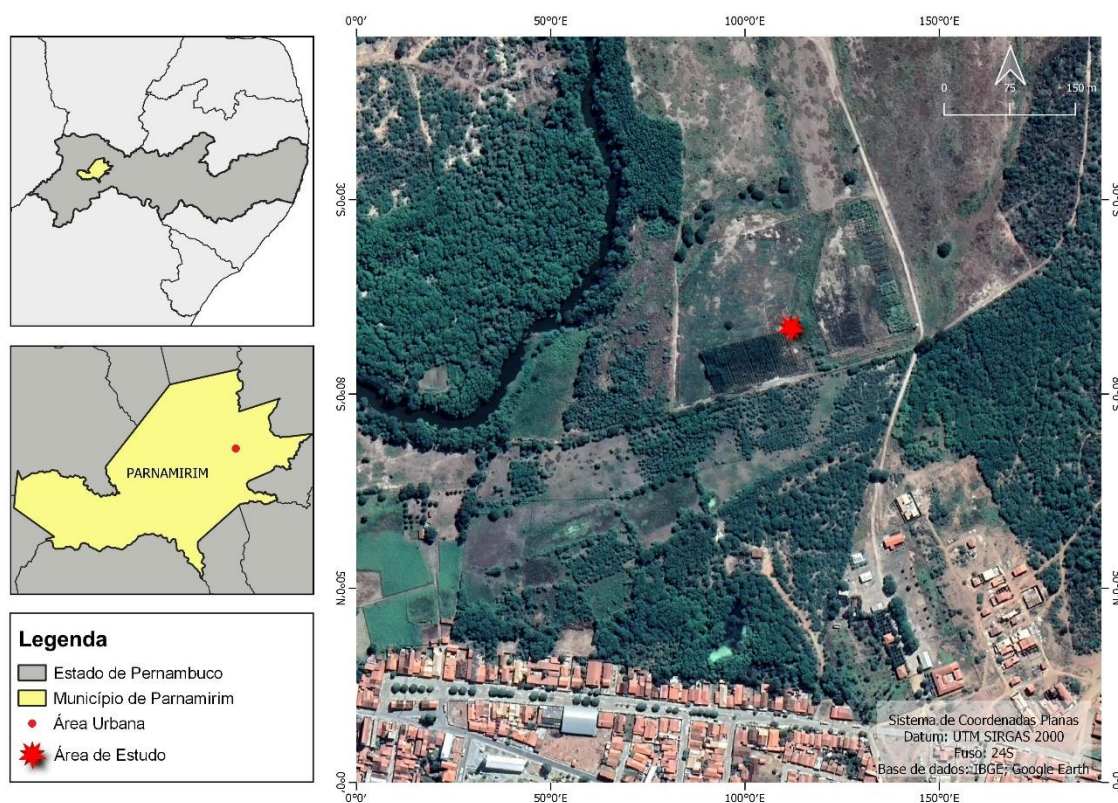


Figura 1. Localização do campo experimental em Parnamirim-PE, Semiárido do Brasil.

Tabela 1. Caracterização química e textural do solo da área experimental.

Propriedades	Camada (cm)			
	0-10	10-20	20-40	40-60
CE (dS m ⁻¹)	3,56	6,21	7,22	5,77
pH	6,05	6,09	6,16	6,32
MO (g kg ⁻¹)	25,08	19,35	18,00	11,75
P (mg dm ⁻³)	28,40	19,73	14,83	9,75
K ⁺ (cmol _c dm ⁻³)	0,51	0,34	0,24	0,14
Na ⁺ (cmol _c dm ⁻³)	0,30	0,37	0,52	0,82
Ca ²⁺ (cmol _c dm ⁻³)	9,06	8,54	8,79	9,98
Mg ²⁺ (cmol _c dm ⁻³)	5,29	5,40	5,21	5,53
H+Al (cmol _c dm ⁻³)	0,96	0,89	0,76	0,60
SB (cmol _c dm ⁻³)	15,14	14,65	14,93	16,48
CTC (cmol _c dm ⁻³)	16,10	15,54	15,69	17,08
PST (%)	1,86	2,38	3,31	4,80
Areia (%)	14,20	10,30	11,30	10,92
Silte (%)	72,12	75,62	71,62	75,48
Argila (%)	13,68	14,08	17,08	13,60

CE – condutividade elétrica do extrato de saturação; pH – potencial hidrogeniônico; MO – matéria orgânica; SB – soma de bases; CTC – capacidade de troca catiônica; PST – porcentagem de sódio trocável.

2.2 Tratamentos e design experimental

O experimento foi disposto em delineamento com blocos casualizados, com cinco tratamentos e quatro repetições. Os tratamentos consistiram em testar a eficácia do *Trichoderma harzianum* (T) e matéria orgânica (MO) para melhorar a atuação do silício (Si)

na mitigação da salinidade na cultura do sorgo sudão (*Sorghum sudanense* (Piper) Stapf), cv. IPA Sudan 4202. Os tratamentos foram: sorgo sem aplicação de atenuante (controle); sorgo + Si; sorgo + Si + MO; sorgo + Si + T; e sorgo + Si + T + MO. O espaçamento adotado foi de 0,50 m entre fileiras e 10 plantas por metro linear. As dimensões do experimento foram de 20,0 x 16,5 m para área total, 4 x 4 m para as parcelas, e 2 x 2 m para as parcelas úteis (onde foram coletadas e avaliadas as plantas).

Para o estudo, três ciclos de sorgo (o primeiro corte mais duas rebrotas) foram conduzidos entre junho de 2021 e abril de 2022, totalizando 10 meses, dentre os quais, foi possível avaliar as respostas de crescimento do sorgo à aplicação de atenuantes para a salinidade durante as estações seca e chuvosa da região (Figura 2). Não ocorreram chuvas entre a semeadura e o primeiro corte (1º ciclo), enquanto que no 2º e 3º ciclo os valores acumulados de precipitação foram iguais a 176,5 e 252 mm, respectivamente.

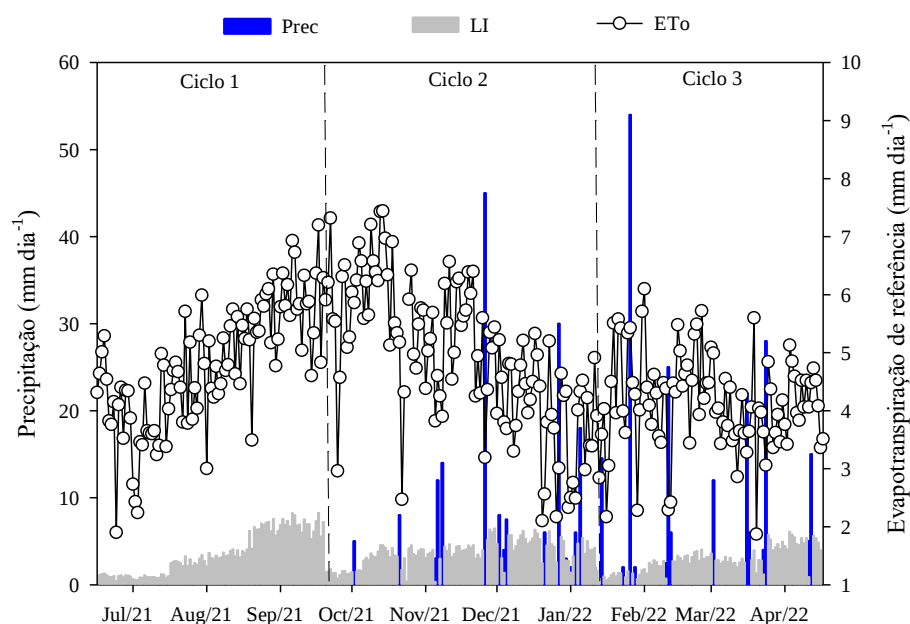


Figura 2. Condições meteorológicas em Parnamirim – PE durante o período experimental. Prec. – Precipitação pluviométrica (mm dia^{-1}); LI – Lâmina de irrigação (mm dia^{-1}); ETo – Evapotranspiração de referência (mm dia^{-1}).

A irrigação foi realizada por meio de um sistema de irrigação por gotejamento com eficiência de 96%, vazão de cada gotejador de $1,06 \text{ L h}^{-1}$, emissores espaçados em 40 cm e intervalo de aplicação de 48 horas; tomando como base a reposição total da evapotranspiração da cultura (ETc) (ALLEN et al., 1998). A evapotranspiração de referência (ETo) foi determinada pelo modelo proposto por Penman-Monteith e adaptado pela FAO-56 (ALLEN

et al., 1998). Os dados meteorológicos foram coletados em uma estação automática do INMET (Instituto Nacional de Meteorologia), localizada a 50 km da área experimental. Apenas os dados da precipitação pluvial foram coletados na área do experimento, utilizando um pluviômetro manual.

A água para irrigação foi proveniente de um poço artesiano (Tabela 2), sendo classificada como C₄S₁, com risco muito alto de promover a salinização do solo e baixo risco de sodificação, conforme Richards (1954).

Tabela 2. Propriedades químicas da água utilizada na irrigação durante o período experimental

pH	CE	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Na ⁺	Cl ⁻	HCO ₃ ³⁻	SO ₄ ²⁻	B	Cu	Fe	Mn	Zn	RAS
-	mS cm ⁻¹	mmol _c L ⁻¹				mmol _c L ⁻¹				mg L ⁻¹				mmol _c L ^{-0.5}
7,23	3,12	9,29	9,23	0,12	11,73	26,38	5,70	0,76	0,11	0,02	0,02	0,03	0,20	3,85

pH – potencial hidrogeniônico; CE – condutividade elétrica; RAS – razão de adsorção de sódio.

O *T. harzianum* foi obtido a partir do produto comercial Trichodermil SC I306. Foram realizadas duas aplicações via solo, a primeira na ocasião do semeio e a segunda com intervalo de 30 dias após a primeira aplicação. A concentração da calda foi de 12,5 mL L⁻¹, conforme a recomendação do fabricante. Com o uso de uma bomba costal manual, aplicou-se 39,06 mL de calda por metro linear, acompanhando a linha de plantio.

O silicato de potássio, fonte de silício usada neste trabalho, foi aplicada duas vezes via solo (primeira aplicação realizada uma semana após o semeio e a segunda com intervalo de 15 dias) e duas aplicações foliares (a primeira com 15 dias após a aplicação via solo e a segunda 15 dias após a primeira aplicação foliar). As concentrações das caldas foram de 5 mL L⁻¹ e 10 mL L⁻¹, para as aplicações via solo e foliar, respectivamente, conforme a recomendação do fabricante. Aplicaram-se 39,06 mL m⁻¹ linear em ambas as condições. O silicato de potássio é um fertilizante que contém no mínimo 10% de K⁺ na forma de K₂O e 10% de silício.

Na ocasião do semeio o solo foi adubado com esterco caprino (Tabela 3) na proporção de 50 Mg ha⁻¹, nos tratamentos que constavam aplicação de matéria orgânica. Segundo Freitas et al. (2012), essa dose proporciona o melhor desempenho para a cultura do sorgo. O esterco foi previamente curtido e incorporado ao solo na camada superficial do solo.

Tabela 3. Caracterização do esterco caprino utilizado como fonte de matéria orgânica neste experimento

D	C	N	P	K ⁺	Na ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	pH	CE
g cm ⁻³	-----				g kg ⁻¹	-----			-
0,8158	119,70	17,90	8,70	4,50	1,10	27,70	10,20	7,87	mS cm ⁻¹

D – densidade do esterco; C – carbono orgânico total; N – nitrogênio total, pH - potencial hidrogeniônico; CE – condutividade elétrica.

2.3 Crescimento e determinação de biomassa

Ao final de cada ciclo realizou-se a biometria para determinação da altura de planta, diâmetro de colmo e número de perfilhos das plantas. Em cada parcela útil foram avaliadas cinco plantas representativas para determinação dos valores médios.

Para determinar a massa fresca da parte aérea (folhas, colmos e panículas) das plantas, as cinco plantas utilizadas nas medidas biométricas foram fracionadas (caule, folhas e panícula) e pesadas. Em seguida, as amostras foram levadas para a estufa de circulação de ar forçada a 65 °C até atingir a massa constante e pesadas novamente em balança analítica para se obter o valor da massa seca da parte aérea. A biomassa relativa foi expressa pela relação entre a biomassa seca produzida pelo sorgo com a aplicação dos diferentes atenuantes e aquela obtida com o controle (sem aplicação de atenuantes). A biomassa fresca e seca da parte aérea acumulada e a biomassa relativa acumulada foram obtidas pelo somatório dos valores encontrados nos três ciclos.

2.4 Análise estatística

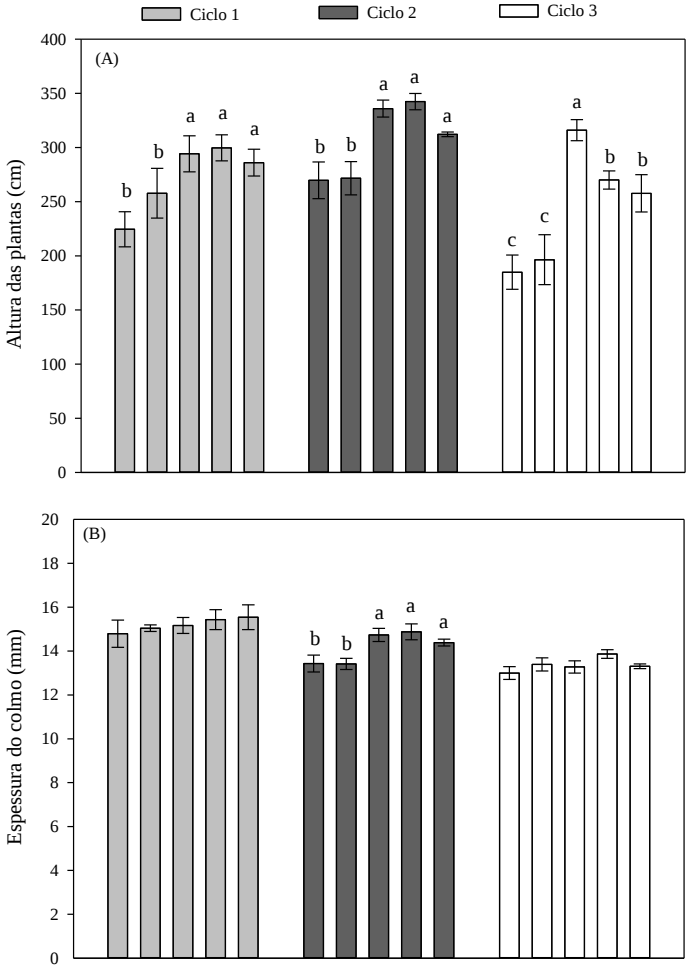
Os dados foram submetidos à análise da variância e normalidade, sendo as médias comparadas pelo teste de Scott-Knott ao nível de 5% de probabilidade, utilizando o programa estatístico Rstudio (R Core Team, 2019). Os gráficos foram elaborados no SigmaPlot (versão 14.0) (Systat Software Inc., San Jose, California, USA).

3 RESULTADOS

3.1 Crescimento do sorgo em resposta à aplicação dos atenuantes

T. harzianum e matéria orgânica aplicados em associação com o silício promoveram aumento significativo ($p < 0,05$) no crescimento das plantas, em comparação com a testemunha (Figura 3A), em todos os ciclos. O silício isolado não promoveu diferença significativa para essa mesma variável em relação à testemunha. Em média, o silício sozinho aumentou a altura de planta em 7,25% para todos os ciclos, enquanto para as combinações

Si+MO, Si+T e Si+T+MO, esse aumento foi 42,17, 35,49 e 27,51% superior em relação ao tratamento controle, respectivamente.



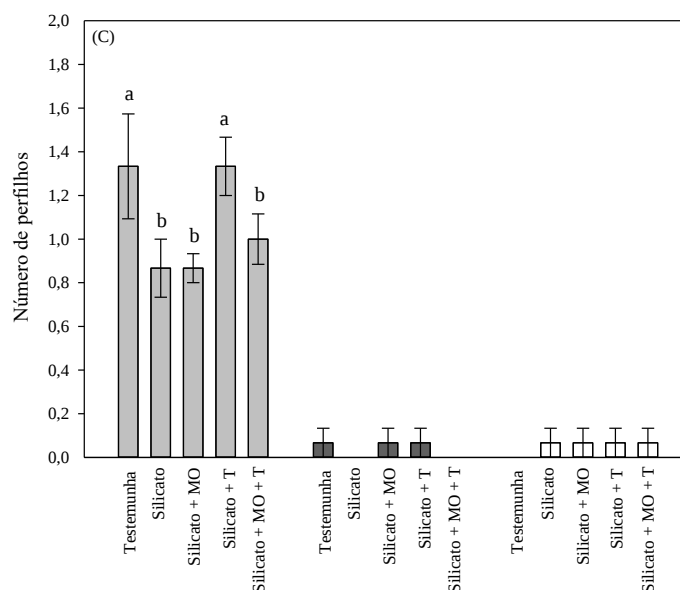


Figura 3. Altura das plantas (A), espessura do colmo (B) e número de perfilhos (C) do sorgo sudanense ao longo de três ciclos sucessivos sob estresse salino em função do uso de atenuantes.

Os valores médios de altura das plantas para a testemunha, silício sozinho e as combinações Si+MO, Si+T e Si+T+MO foram de 224,6, 257,8, 294,3, 299,7 e 286,1 cm, respectivamente, para 1ª ciclo; 269,75, 271,67, 335,98, 342,47 e 312,0 cm para o 2ª ciclo; e 184,89, 196,43, 316,03, 270,08 e 257,72 cm para o 3ª ciclo (Figura 3A).

Para o diâmetro dos colmos, houve diferença significativa apenas no 2ª ciclo (Figura 3 B). As combinações, Si+MO, Si+T e Si+T+MO aumentaram a espessura do colmo em 1,3, 1,4 e 0,96 mm, respectivamente, em comparação com a testemunha. Por mais que sejam valores pouco expressivos, pequenas variações no diâmetro do colmo tem influência direta no acúmulo de sua biomassa (MAIA JÚNIOR et al., 2018) e isso é importante para a produção da planta. Não houve diferença significativa para essa variável entre o tratamento controle e o silício aplicado isoladamente. Para o número de perfilhos, houve emissão significativa apenas no primeiro ciclo (Figura 3 C). Os maiores valores de perfilhamento foram observados no tratamento controle e na combinação Si+T.

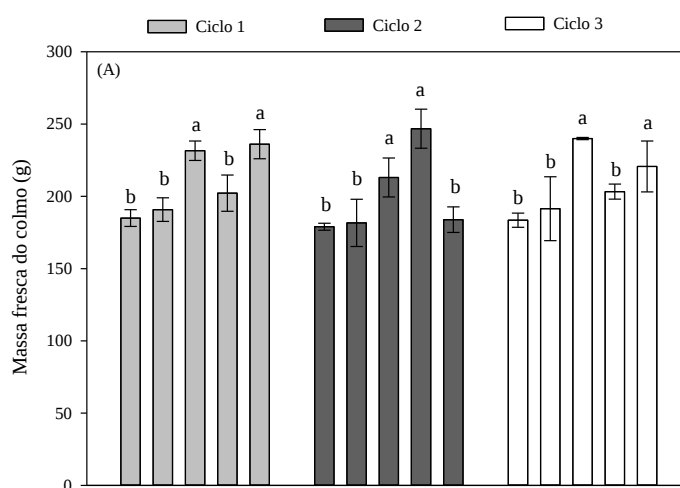
3.2 Acúmulo de biomassa no sorgo influenciada pelos atenuantes do estresse salino

Houve diferenças significativas ($p < 0,05$) para a produção de biomassa fresca, biomassa seca e biomassa relativa, em todos os ciclos (Figuras 4, 5 e 6), e no acumulado dos ciclos (Figura 7). No 1ª ciclo, os tratamentos Si+MO e Si+T+MO se destacaram dos demais em produção de massa fresca e seca da parte aérea (Figuras 6A e B). Esse resultado foi

influenciado pela maior produção de massa fresca e seca dos colmos e das panículas para esses tratamentos em comparação com os demais (Figura 4A e C, Figura 5A e C). No entanto, os atenuantes Si+MO, Si+T e Si+T+MO não diferiram significativamente entre si para a biomassa relativa, apresentando valores de acúmulo de biomassa 30,63, 29,99 e 32,86% superiores ao tratamento controle (Figura 6 C), respectivamente.

No 2ª ciclo, a combinação Si+T se destacou em comparação aos demais tratamentos para a produção de matéria fresca e seca da parte aérea (Figura 6 A e B). Para essa mesma combinação, a biomassa relativa foi 38,02% superior ao tratamento controle (Figura 6 C). No 3ª ciclo, as combinações Si+MO, Si+T e Si+T+MO apresentaram os melhores resultados para a produção de massa fresca da parte aérea (Figura 6 A). Para a massa seca da parte aérea, a combinação Si+MO apresentou o melhor desempenho, seguida pelos atenuantes Si+T e Si+T+MO (Figura 6 B). Entretanto, não houve diferença significativa entre os atenuantes Si+MO, Si+T e Si+T+MO para a biomassa relativa. Os valores de biomassa relativa para os atenuantes Si+MO, Si+T e Si+T+MO foram 95,26, 55,91 e 73,28% superiores ao tratamento controle, respectivamente.

O silício sozinho não diferiu estatisticamente da testemunha para a maioria das variáveis. No entanto, aumentou em média 9,86% o acúmulo de biomassa em comparação com a testemunha, em todos os ciclos.



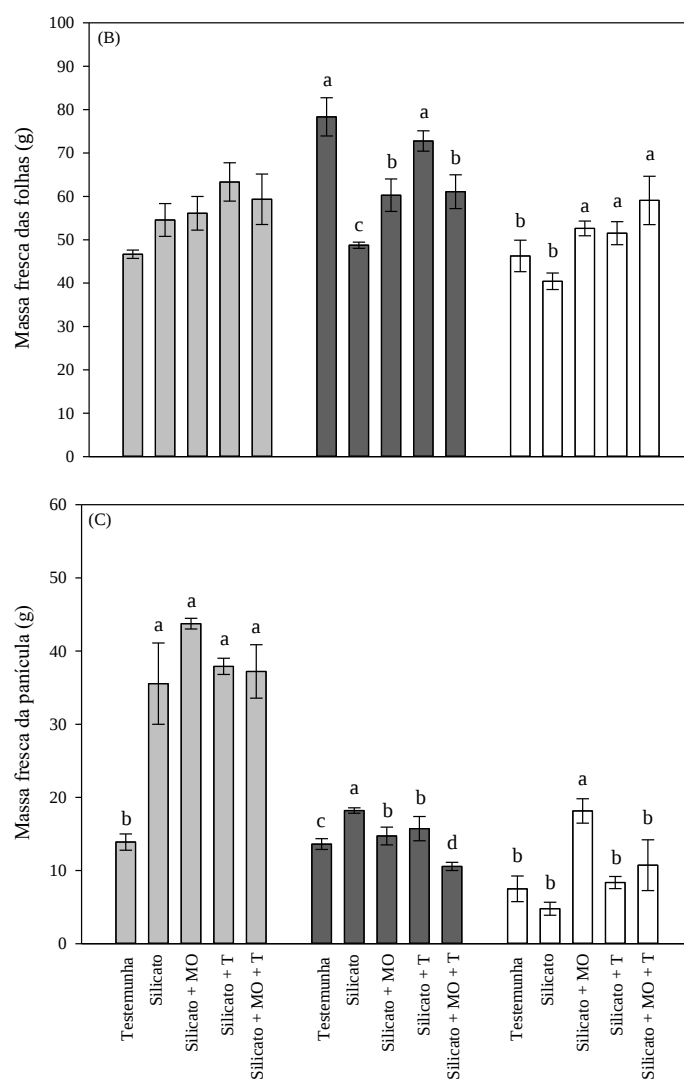
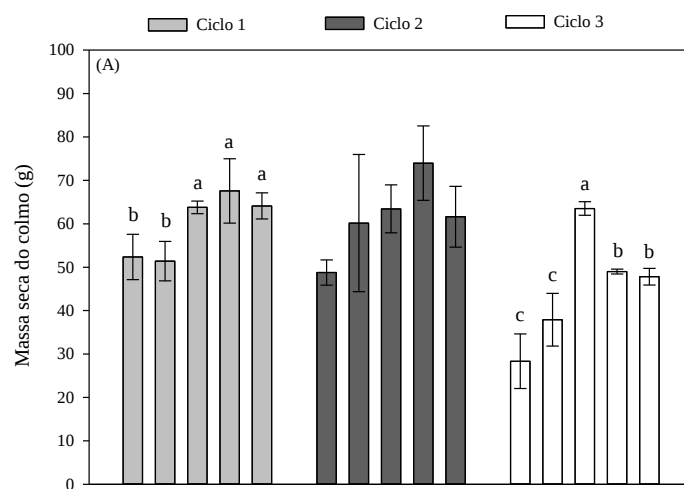


Figura 4. Massa fresca do colmo (A), massa fresca das folhas (B) e massa fresca da panícula (C) do sorgo sudanense sob estresse salino em função do uso de atenuantes.



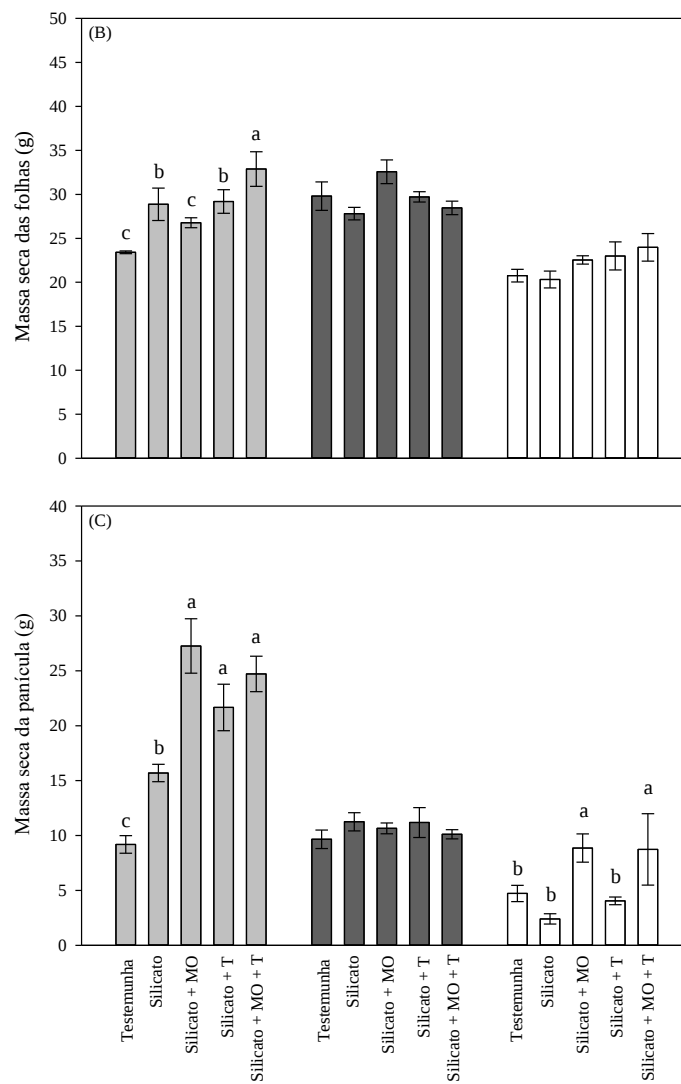
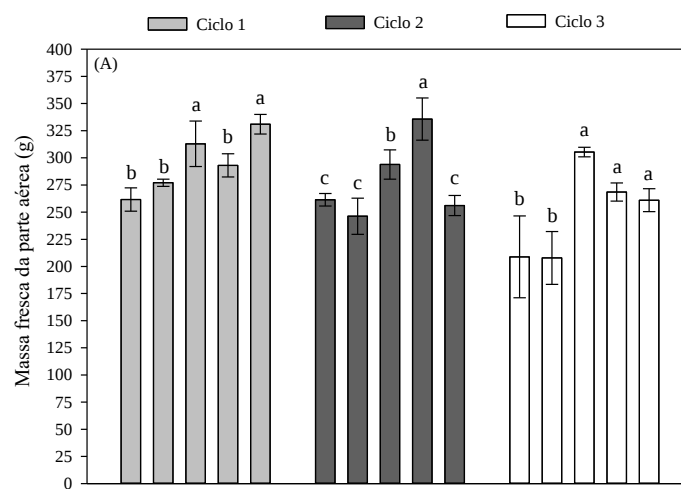


Figura 5. Massa seca do colmo (A), massa seca das folhas (B) e massa seca da panícula do sorgo sudanense sob estresse salino em função do uso de atenuantes.



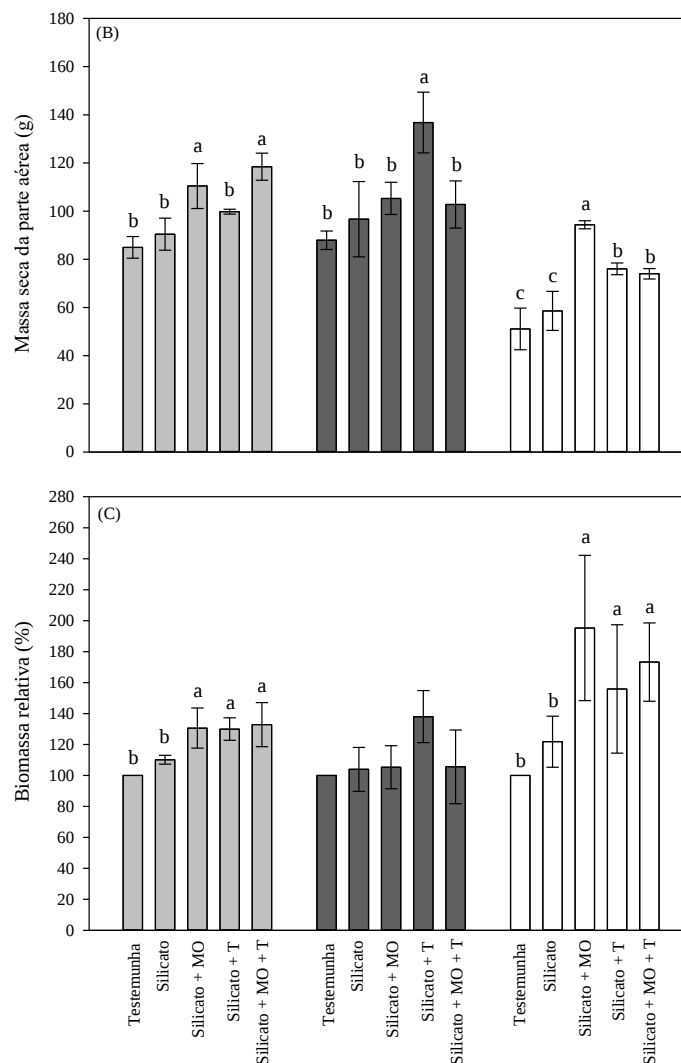


Figura 6. Massa fresca da parte aérea (A), massa seca da parte aérea (B) e biomassa relativa (C) do sorgo sudanense sob estresse salino em função do uso de atenuantes.

A produção de massa seca e fresca da parte aérea (colmo + folha + panícula) diferiu significativamente entre os tratamentos dos atenuantes em todos os ciclos (Figura 6 A e B). A biomassa relativa não apresentou diferença significativa no 2^a ciclo, no entanto, quando somado os três ciclos foi observado uma compensação (Figura 6 C e Figura 7 C). Os atenuantes Si+MO, Si+T e Si+T+MO promoveram o melhor desempenho para essas variáveis. Para a matéria seca da parte aérea acumulada, os atenuantes Si+MO, Si+T e Si+T+MO promoveram ganhos de 86,15, 88,67 e 71,26 g (Figura 7 B), respectivamente; em valores percentuais, isso corresponde a ganhos de 39,42, 40,44 e 31,77% no acúmulo de biomassa a mais que o tratamento controle (Figura 7 C). O silício sozinho aumentou o acúmulo de biomassa em 9,86%, porém os ganhos foram mais expressivos quando sua aplicação foi combinada com *T. harzianum* ou matéria orgânica.

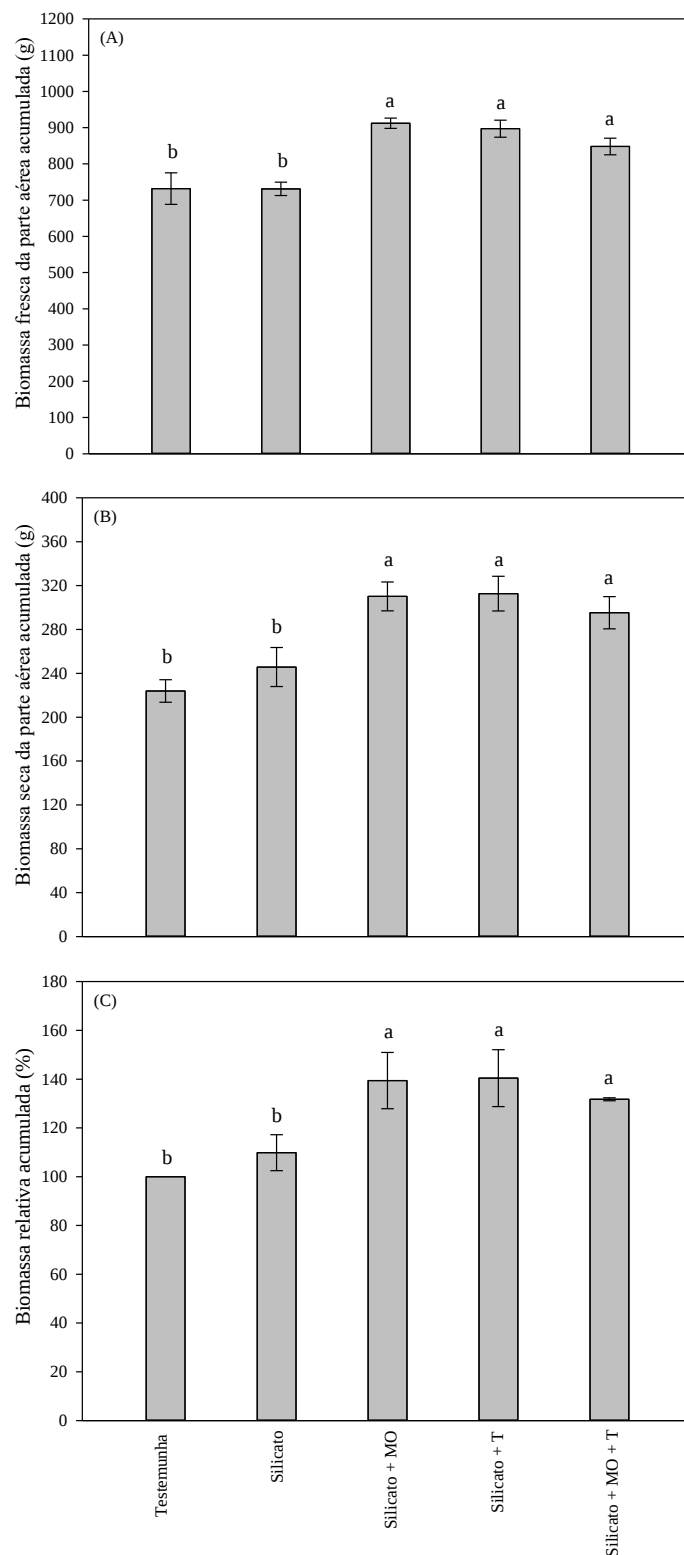


Figura 7. Massa fresca da parte aérea acumulada (A), massa seca da parte aérea acumulada (B) e biomassa relativa acumulada (C) do sorgo sob estresse salino em função do uso de atenuantes.

4 DISCUSSÃO

Os resultados deste trabalho mostraram o potencial da combinação de matéria orgânica, e *Trichoderma* com silício em atenuar o estresse salino e seus efeitos sobre o crescimento e acúmulo de biomassa no sorgo sudanense. O menor crescimento e acúmulo de biomassa observado nas plantas do tratamento testemunha pode, em parte, estar associado ao efeito osmótico promovido pela alta presença de sais no solo, o que leva a uma redução no potencial hídrico do solo, restringindo a absorção de água pela planta e afetando a expansão celular (MUNNS; TESTER, 2008; TAIZ; ZEIGER, 2017). Além disso, pode estar atrelado ao desequilíbrio iônico, decorrente da absorção em excesso de íons como Na^+ e Cl^- , muito presentes no solo e excessivamente presentes na água utilizada para a irrigação do experimento (Tabelas 1 e 2).

O ganho de crescimento e de biomassa (~10%) com o uso do silício está associado aos benefícios promovidos pela presença desse componente no tecido vegetal. De acordo com Pinheiro et al. (2022), o sorgo pode absorver e acumular Si em abundância, melhorando a tolerância da planta ao estresse salino. Quanto maior é o acúmulo de silício nos tecidos, maiores são os benefícios observados para reduzir os danos provocados pelo estresse salino nas plantas (MIGLIORINI et al., 2021). No entanto, Abdolzadeh et al. (2022) demonstraram que formas mais disponíveis de Si, como os nano silício, são mais eficientes para mitigar o estresse salino em sorgo. Isto pode justificar a baixa produção de biomassa encontrada no tratamento com silício aplicado isoladamente, em comparação com o controle.

Um dos principais benefícios do Si em mitigar a salinidade no sorgo está associado à capacidade desse elemento em reduzir a absorção de Na^+ e aumentar a concentração de K^+ no tecido vegetal, equilibrando assim a razão Na^+/K^+ (DHIMAN et al., 2021; HURTADO et al., 2021; YIN et al., 2016). O produto comercial silicato de potássio utilizado neste estudo como fonte de Si também é fonte de potássio, o que pode diminuir a razão Na^+/K^+ , beneficiando o cultivo das plantas. O silício melhora a tolerância das plantas aos estresses abióticos, como a salinidade do solo, atuando principalmente na regulação fotossintética, ativação de enzimas antioxidantes e formação de barreira sílica nas raízes para reduzir a passagem de sais para a parte aérea (AHMAD et al., 2021; COSKUN et al., 2016; GUPTA et al., 2021a; KALOTERAKIS et al., 2021; XIE et al., 2014). Além disso, o silício aumenta a produção de osmorreguladores para ajustar o potencial osmótico das raízes com o solo e melhorar o status hídrico das plantas, sendo esta uma característica importante que concede tolerância ao estresse salino nas plantas (ABDELAAL; MAZROU; HAFEZ, 2020). Por mais importante

que seja o papel do silício em mitigar a salinidade, nesse estudo o Si não conseguiu amenizar os danos dos sais nas plantas, mas, quando associado ao *Trichoderma* ou à matéria orgânica, sua eficácia foi potencializada.

A interação do *Trichoderma* com o silício aumentou o crescimento e a produção de biomassa em 35,49 e 40,44%, respectivamente, comparado ao tratamento controle. Na literatura são encontrados estudos que comprovam a capacidade do *Trichoderma* em mitigar os danos da salinidade no crescimento e produção de biomassa em outras espécies cultivadas. No trigo, o uso do *Trichoderma* melhorou a germinação e o crescimento das plantas devido a alterações metabólicas (RAWAT et al., 2011). Enquanto no amendoim, o *Trichoderma* aliviou o estresse salino pela maior absorção de nutrientes e melhora na atividade enzimática (YUSNAWAN et al., 2021). Os poucos relatos sobre a eficiência do *Trichoderma* em aliviar o estresse salino no sorgo atribuiu esse benefício a melhorias na atividade enzimática e fotossintética (ANAM; REDDY; AHN, 2019).

O *Trichoderma* produz fitohormônios, como citocininas e giberelinas, que induzem o crescimento das plantas em condições estressantes (BENÍTEZ et al., 2004). O *Trichoderma* também aumenta o crescimento radicular para promover maior absorção de água e nutrientes e libera uma gama de compostos que induz as plantas a responderem ao estresse salino com mais eficiência (HARMAN et al., 2004; KUMAR; MANIGUNDAN; AMARESAN, 2017; RAWAT et al., 2011). Outra capacidade importante do *Trichoderma* é a de solubilizar fosfato e potássio, aumentando a disponibilidade desses elementos para as plantas (IKRAM et al., 2019). No 2^a ciclo, a interação Si+T foi mais eficiente para promover maior produção de biomassa em relação aos demais atenuantes (Figura 6 A e B), o que pode ser associado a maior umidade presente no solo devido a ocorrência de chuvas nesse período (Figura 2), visto que a umidade do solo influencia a eficácia do *Trichoderma* (MILANESI et al., 2013). Outros estudos mostraram que a eficiência do *Trichoderma* é melhorada quando o mesmo é combinado com compostos orgânicos (KONG et al., 2021), no entanto, no presente estudo não houve diferença significativa entre os tratamentos Si+T e Si+T+MO.

O aumento de 42,17 e 39,42% no crescimento e produção de biomassa pelo sorgo com o uso dos atenuantes Si+MO esteve associado à melhor nutrição das plantas e benefícios da matéria orgânica em mitigar a salinidade do solo. A matéria orgânica favorece a retenção de água no solo, melhora a estrutura, proporcionando que os sais sejam lixiviados, aumenta o potencial osmótico da solução do solo e libera Ca^+ e Mg^{2+} , que substitui o Na^+ no complexo de troca (YOUSAF et al., 2021). Devido a isso, diversos trabalhos relataram a eficácia da

matéria orgânica para reduzir os danos dos sais nas plantas (NAVEED et al., 2020, 2021; OLIVEIRA et al., 2022; YARAMI; SEPASKHAH, 2015). Os resultados obtidos no presente estudo coincidem com os verificados por Sousa et al. (2018) e Lacerda et al. (2017), nos quais o aumento no crescimento das plantas de sorgo sob estresse salino esteve associado a melhorias na química do solo e aumento da fertilidade, promovidos pela adição de matéria orgânica.

Com relação ao número de perfilhos (Figura 3 C), o maior valor de perfilhamento observado no tratamento controle pode estar associado à maior concentração de carboidratos nos caules das plantas, característica essa que induz as plantas a aumentarem o grau de perfilhamento (MAGALHAES; DURAES; RODRIGUES, 2003). Nesse mesmo sentido, o *Trichoderma* induz as plantas a concentrarem mais carboidratos nos colmos e, conseqüentemente, aumentam o número de perfilhos (MUSA; BAHRUN; KARDINA, 2021).

Como o tratamento com silício isoladamente não promoveu diferença significativa em relação à testemunha, pode-se supor que sua aplicação deve ser feita em combinação com outros atenuantes de estresse salino, como *Trichoderma* e/ou matéria orgânica. Neste estudo, tanto o *Trichoderma* quanto a matéria orgânica podem ser utilizados para atenuar a salinidade, não havendo necessidade de utilizar a mistura entre os dois. Em pequenas áreas, pode-se utilizar a matéria orgânica devido ao baixo custo, mas em grandes áreas a quantidade de matéria orgânica necessária a ser aplicada é exorbitante, o que pode inviabilizar o manejo, devido as grandes quantidades a serem aplicadas. Em contrapartida, o manejo com *Trichoderma* em grandes áreas é facilitado, reduzindo drasticamente o custo de manejo (SIVILA; ALVAREZ, 2013).

5 CONCLUSÕES

Silício combinado com *Trichoderma harzianum* e/ou matéria orgânica é mais eficaz para promover um maior crescimento no sorgo sudanense, como consequência de maior mitigação do estresse salino. Em nosso estudo, isso foi demonstrado pelo aumento no crescimento e na produção de biomassa do sorgo com o uso combinado desses atenuantes. A combinação desses atenuantes é recomendada para viabilizar o cultivo do sorgo sudanense em condições de estresse salino, contribuindo para fortalecer a produção de forragem em ambiente semiárido. Os autores recomendam que mais estudos sejam realizados com outras espécies de *Trichoderma* e outras fontes de silício e matéria orgânica para aumentar o leque de

possibilidades de cultivo, bem como, para atenuar os efeitos prejudiciais da salinidade no sorgo forrageiro e em outras culturas agrícolas.

REFERÊNCIAS

- ABDELAAL, K. A. A.; MAZROU, Y. S. A.; HAFEZ, Y. M. Silicon Foliar Application Mitigates Salt Stress in Sweet Pepper Plants by Enhancing Water Status, Photosynthesis, Antioxidant Enzyme Activity and Fruit Yield. **Plants**, v. 9, n. 6, 2020.
- ABDOLZADEH, A. et al. Effect of silicon and nano silicon application on wheat (C3) and sorghum (C4) under salinity stress. **Journal of Plant Production Research**, v. 29, n. 1, p. 173–190, 2022.
- AFZAL, I. et al. Alleviation of Salinity Stress in Spring Wheat by Hormonal Priming with ABA, Salicylic Acid and Ascorbic Acid. **International Journal of Agriculture & Biology**, v. 8530, p. 8–1, 2006.
- AHMAD, A. et al. Synergistic effects of nitric oxide and silicon on promoting plant growth, oxidative stress tolerance and reduction of arsenic uptake in Brassica juncea. **Chemosphere**, v. 262, 2021.
- ALLEN, R. G. et al. Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop requirements. **Irrigation and Drainage Paper** No. 56, FAO, n. 56, p. 300, 1998.
- ANAM, G. B.; REDDY, M. S.; AHN, Y. H. Characterization of Trichoderma asperellum RM-28 for its sodic/saline-alkali tolerance and plant growth promoting activities to alleviate toxicity of red mud. **Science of the Total Environment**, v. 662, p. 462–469, 2019.
- BENÍTEZ, T. et al. Biocontrol mechanisms of {Trichoderma} strains. **International Microbiology**, v. 7, p. 249–260, 2004.
- CANTUÁRIO, F. S. et al. Podridão apical e escaldadura em frutos de pimentão submetidos a estresse hídrico e doses de silício. **Horticultura Brasileira**, v. 32, n. 2, p. 215–219, 2014.
- CHAKMA, R. et al. Effects of silicon and organic manure on growth, fruit yield, and quality of grape tomato under water-deficit stress. **Silicon**, p. 763–774, 2022.
- COSKUN, D. et al. The role of silicon in higher plants under salinity and drought stress. **Frontiers in Plant Science**, v. 7, 2016.
- DHIMAN, P. et al. Fascinating role of silicon to combat salinity stress in plants: An updated overview. **Plant Physiology and Biochemistry**, v. 162, p. 110–123, 2021.
- EMBRAPA. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. Centro Nacional de Pesquisa de Solos: Rio de Janeiro, v. 3, 2013.
- FREITAS, G. A. et al. Adubação orgânica no sulco de plantio e sua influência no desenvolvimento do sorgo. **Journal of Biotechnology and Biodiversity**, v. 3, n. 1, p. 61–67, 2012.
- GUPTA, B. K. et al. Silicon nutrition stimulates Salt-Overly Sensitive (SOS) pathway to enhance salinity stress tolerance and yield in rice. **Plant Physiology and Biochemistry**, v. 166, p. 593–604, 2021a.
- GUPTA, S. et al. Inoculation of barley with Trichoderma harzianum T-22 modifies lipids and

metabolites to improve salt tolerance. **Journal of Experimental Botany**, v. 72, n. 20, p. 7229–7246, 2021b.

HARMAN, G. E. et al. Trichoderma species-opportunistic, avirulent plant symbionts. **Nature reviews microbiology**, v. 2, n. 1, p. 43–56, 2004.

HUANG et al. Long-term combined effects of tillage and rice cultivation with phosphogypsum or farmyard manure on the concentration of salts, minerals, and heavy metals of saline-sodic paddy fields in Northeast China. **Soil and Tillage Research**, v. 215, 2022.

HURTADO, A. C. et al. Silicon alleviates sodium toxicity in sorghum and sunflower plants by enhancing ionic homeostasis in roots and shoots and increasing dry matter accumulation. **Silicon**, v. 13, n. 2, p. 475–486, 2021.

IKRAM, M. et al. Trichoderma reesei improved the nutrition status of wheat crop under salt stress. **Journal of Plant Interactions**, v. 14, n. 1, p. 590–602, 2019.

JARDIM, A. M. R. F. et al. Production potential of *Sorghum bicolor* (L.) Moench crop in the Brazilian semiarid: review. **Pubvet**, v. 14, n. 4, p. 1–12, 2020.

KALOTERAKIS, N. et al. Silicon application and plant growth promoting rhizobacteria consisting of six pure Bacillus species alleviate salinity stress in cucumber (*Cucumis sativus* L.). **Scientia Horticulturae**, v. 288, p. 110383, 2021.

KONG, F. et al. Integrated usage of Trichoderma harzianum and biochar to ameliorate salt stress on spinach plants. **Archives of Agronomy and Soil Science**, p. 1–22, 2021.

KUMAR, K.; MANIGUNDAN, K.; AMARESAN, N. Influence of salt tolerant Trichoderma spp. on growth of maize (*Zea mays*) under different salinity conditions. **Journal of Basic Microbiology**, v. 57, n. 2, p. 141–150, 2017.

LACERDA, C. F. et al. Efeito da aplicação de biofertilizante líquido no desenvolvimento do sorgo irrigado com água salobra. **Científica**, v. 46, n. 4, p. 380–397, 2017.

MAGALHAES, P. C.; DURAES, F. O. M.; RODRIGUES, J. A. S. **Fisiologia da Planta de sorgo. Embrapa Milho e Sorgo-Comunicado Técnico (INFOTECA-E)**, p. 1–16, 2003.

MAIA JÚNIOR, S. D. O. et al. Caracterização morfológica e produtiva e suas correlações em cultivares de cana-de-açúcar. **Revista Ciência Agrícola**, v. 16, n. 1, p. 31, 2018.

MASWADA, H. F.; DJANAGUIRAMAN, M.; PRASAD, P. V. V. Seed treatment with nano-iron (III) oxide enhances germination, seeding growth and salinity tolerance of sorghum. **Journal of Agronomy and Crop Science**, v. 204, n. 6, p. 577–587, 2018.

MIGLIORINI, P. et al. Quality of calcium and magnesium silicate coated Phaseolus vulgaris seeds. **Colloquium Agrariae**, v. 17, n. 1, p. 56–65, 2021.

MILANESI, P. M. et al. Detecção de Fusarium spp. e Trichoderma spp. e antagonismo de Trichoderma sp. em soja sob plantio direto. **Semina: Ciências Agrárias**, v. 34, n. 1, p. 3219–3234, 2013.

MIRANDA, M. F. A. et al. Improvement of degraded physical attributes of a saline-sodic soil as influenced by phytoremediation and soil conditioners. **Archives of Agronomy and Soil Science**, v. 64, n. 9, p. 1207–1221, 2018.

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

- MUNNS, R.; TESTER, M. Mechanisms of salinity tolerance. **Annual Review of Plant Biology**, v. 59, p. 651–681, 2008.
- MUSA, Y.; BAHRUN, A. H.; KARDINA. Application of Trichoderma on single bud Sugarcane (*Saccharum officinarum* L.) seedlings originated from different stems. **IOP Conference Series: Earth and Environmental Science**, v. 807, n. 4, 2021.
- NAVEED, M. et al. Alleviation of salinity-induced oxidative stress, improvement in growth, physiology and mineral nutrition of canola (*Brassica napus* L.) through calcium-fortified composted animal manure. **Sustainability (Switzerland)**, v. 12, n. 3, 2020.
- NAVEED, M. et al. Processed animal manure improves morpho-physiological and biochemical characteristics of *Brassica napus* L. under nickel and salinity stress. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 28, n. 33, p. 45629–45645, 2021.
- OLIVEIRA, L. M. et al. Salt stress and organic fertilization on the growth and biochemical metabolism of *Hylocereus costaricensis* (red pitaya) seedlings. **Brazilian Journal of Biology**, v. 84, 2022.
- PESSOA, L. G. M. et al. Effectiveness of soil conditioners to enhance salt extraction ability of *Salicornia ramosissima* in saline-sodic soil for different soil moisture contents. **International Journal of Phytoremediation**, v. 24, n. 5, p. 447–455, 2022.
- PINHEIRO, P. R. et al. Potassium silicate as an inducer of abiotic stress resistance in grain sorghum seeds. **Revista Ciencia Agronomica**, v. 53, 2022.
- RAWAT, L. et al. Alleviation of the adverse effects of salinity stress in wheat (*Triticum aestivum* L.) by seed biopriming with salinity tolerant isolates of *Trichoderma harzianum*. **Plant and Soil**, v. 347, n. 1, p. 387–400, 2011.
- RODRIGUES, A. C. F. et al. Classificação da precipitação pluviométrica anual para o município de Parnamirim – PE utilizando Índice de Anomalia de Chuva (IAC). **Revista Semiárido de Visu**, v. 7, n. 3, p. 275–284, 2019.
- SIVILA, N.; ALVAREZ, S. Producción artesanal y control de calidad del hongo antagonista Trichoderma. **Library Journal JN - Library Journal**, v. 115, n. 11, p. 10–48, 2013.
- SONI, P. G. et al. Deficit saline water irrigation under reduced tillage and residue mulch improves soil health in sorghum-wheat cropping system in semi-arid region. **Scientific Reports**, v. 11, n. 1, 2021.
- SOUSA, R. A. et al. Crescimento do sorgo em função da irrigação com água salobra e aplicação de compostos orgânicos. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, v. 12, n. 1, p. 2315–2326, 2018.
- TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Fisiologia e Desenvolvimento Vegetal**. Artmed Editora, 2017.
- XIE, Z. et al. Effects of silicon on photosynthetic characteristics of maize (*Zea mays* L.) on alluvial soil. **Scientific World Journal**, v. 2014, p. 6, 2014.
- YARAMI, N.; SEPASKHAH, A. R. Saffron response to irrigation water salinity, cow manure and planting method. **Agricultural Water Management**, v. 150, p. 57–66, 2015.
- YIN, L. et al. Silicon-mediated changes in polyamines participate in silicon-induced salt tolerance in *Sorghum bicolor* L. **Plant Cell and Environment**, v. 39, n. 2, p. 245–258, 2016.
- YOUSAF, M. T. et al. Effect of three different types of biochars on eco-physiological

response of important agroforestry tree species under salt stress. **International Journal of Phytoremediation**, v. 23, n. 13, p. 1412–1422, 2021.

YUSNAWAN, E. et al. Changes in volatile organic compounds from salt-tolerant trichoderma and the biochemical response and growth performance in saline-stressed groundnut. **Sustainability (Switzerland)**, v. 13, n. 23, 2021.

ZHANG, F. et al. Trichoderma harzianum mitigates salt stress in cucumber via multiple responses. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, v. 170, p. 436–445, 2019.

CAPÍTULO 2 - Efeitos do silício isolado e combinado com matéria orgânica e *Trichoderma harzianum* nas propriedades do solo e produtividade do sorgo forrageiro irrigado com água salina

RESUMO

A salinidade do solo afeta severamente a agricultura irrigada em regiões áridas e semiáridas. Provoca, entre outras coisas, alterações nas propriedades químicas do solo e desequilíbrio na nutrição das plantas, que resulta na redução do rendimento. Nesse sentido, objetivou-se avaliar o potencial do silício isolado ou combinado com matéria orgânica e/ou *Trichoderma harzianum* em melhorar a produtividade do sorgo forrageiro irrigado com água salina. A influência dos atenuantes sobre a concentração de Na^+ , K^+ e Cl^- no solo e o conteúdo destes elementos nas plantas também foi investigada. O experimento foi conduzido em um Neossolo Flúvico salino localizado em Parnamirim, semiárido de Pernambuco. O experimento, conduzido em blocos casualizados, consistiu em cinco tratamentos e quatro repetições: controle; Si (silício); Si + MO (matéria orgânica); Si + T (*Trichoderma harzianum*); Si + T + MO. O sorgo foi avaliado durante três ciclos (primeiro corte mais duas rebrotas) entre junho de 2021 e abril de 2022. No solo, foram avaliados: CE, Na^+ solúvel e trocável, Cl^- solúvel, K^+ solúvel e trocável e PST. Também foi determinada a produtividade e o conteúdo de Na^+ , Cl^- e K^+ nas plantas. Os atenuantes reduziram a condutividade elétrica, Na^+ solúvel, Cl^- , Na^+ trocável e PST, em comparação com o tratamento controle, em todas as camadas do solo. As combinações Si+MO, Si+T e Si+T+MO interferiram positivamente no conteúdo de K^+ e Cl^- nas plantas. O tratamento apenas com Si não promoveu diferença da testemunha para a produtividade de massa fresca e seca. Para a produtividade de massa seca acumulada, os atenuantes Si+MO, Si+T e Si+T+MO promoveram ganhos de 32,06, 33,13 e 25,72%, respectivamente, a mais que o tratamento controle e o Si. Conclui-se que a qualidade química do solo é melhorada com o uso dos atenuantes do estresse salino e o Si combinado com a matéria orgânica ou *Trichoderma harzianum* incrementa a produtividade do sorgo irrigado com água salina.

Palavras-chave: Salinidade, sodicidade, *Sorghum sudanense*, atenuantes do estresse salino.

ABSTRACT

Soil salinity severely affects irrigated agriculture in arid and semi-arid regions. It causes, among other things, changes in soil chemical properties and an imbalance in plant nutrition, which results in reduced yield. In this sense, the objective was to evaluate the potential of silicon isolated or combined with organic matter and/or *Trichoderma harzianum* in improving the productivity of forage sorghum irrigated with saline water. The influence of attenuators under the concentration of Na^+ , K^+ and Cl^- in the soil and the content of these elements in the plants was also investigated. The experiment was conducted in a Neossolo Flúvico saline located in Parnamirim, semi-arid region of Pernambuco. The experiment, conducted in randomized blocks, consisted of five treatments and four replications: control; Si (silicon); Si + OM (organic matter); Si + T (*Trichoderma harzianum*); and Si + T + OM. Sorghum was evaluated for three cycles (first cut plus two regrowth) between June 2021 and April 2022. In the soil, the following parameters were evaluated: EC, Soluble and Exchangeable Na^+ , Cl^- , Soluble and exchangeable K^+ and PST. Productivity and content of Na^+ , Cl^- and K^+ in plants were also determined. The attenuators reduced electrical conductivity, soluble Na^+ , Cl^- , exchangeable Na^+ and PST, compared to the control treatment, in all soil layers. The combinations Si+OM, Si+T and Si+T+OM positively interfered with the content of K^+ and Cl^- in the plants. Silicon did not differ statistically from the control for fresh and dry mass yield. For accumulated dry mass yield, the attenuators Si+OM, Si+T and Si+T+OM promoted gains of 32.06, 33.13 and 25.72%, respectively, more than the control treatment and silicon. It is concluded that the chemical quality of the soil is improved with the use of saline stress attenuators and silicon combined with organic matter or *Trichoderma harzianum* increases the productivity of sorghum irrigated with saline water.

Keywords: Salinity, sodicity, *Sorghum sudanense*, attenuating salt stress.

1 INTRODUÇÃO

A salinidade é uma das principais ameaças para a produção de alimentos em regiões áridas e semiáridas em todo o mundo (FITA et al., 2015). E cerca de 20% das terras agricultáveis no globo são afetadas pela salinidade e/ou sodicidade, com crescimento anual de 1 a 2% (RIZWAN et al., 2015). Um dos principais fatores que promove a salinização do solo é a irrigação com água de baixa qualidade e ineficiência na drenagem dos solos (YANG et al., 2019).

Na região semiárida brasileira, a água subterrânea utilizada para irrigação geralmente apresenta elevada concentração de sais (FERNANDES et al., 2009). Com isso, a irrigação com água salina altera negativamente as propriedades químicas, físicas e biológicas do solo, podendo levar a degradação e perda da capacidade produtiva do solo (AQUINO et al., 2007; MINHAS; QADIR; YADAV, 2019). Dentre os íons presentes nas águas de irrigação usadas dessas regiões, o Cl^- e o Na^+ são os predominantes e podem causar processos de salinização e de sodificação, ocasionando a degradação de solos no semiárido pernambucano (PESSOA et al., 2022). Altas concentrações de Na^+ e Cl^- provocam desequilíbrio nutricional, estresse iônico e oxidativo nas plantas, que resultam em perdas na produtividade (XIE et al., 2015).

O Cl^- é um micronutriente e participa de diversos processos metabólicos, no entanto, em altas concentrações é tóxico para as plantas (SHI et al., 2013). A depender da composição da água utilizada na irrigação, o Cl^- e o Na^+ podem rapidamente atingir níveis tóxicos para as plantas, devido à grande solubilidade desses elementos. O Na^+ ainda pode migrar para a fase trocável do solo e promover a degradação do arranjo estrutural, que promove a dispersão dos coloides e a redução da condutividade hidráulica do solo (MINHAS; QADIR; YADAV, 2019).

Por outro lado, o K^+ pode migrar da fase solúvel para a trocável, a depender da concentração desse elemento na solução do solo (WERLE; GARCIA; ROSOLEM, 2008). É importante investigar diferentes formas de elevar o teor de K^+ no solo, visto que o K^+ compete com o Na^+ e sua concentração no solo pode reduzir a relação Na^+/K^+ nas plantas (GARDNER, 2016; KHARE et al., 2020).

Para mitigar a salinidade, práticas de manejo como o uso de atenuantes do estresse salino são essenciais, bem como a escolha de culturas tolerantes. Devido à tolerância ao estresse hídrico e salino, o sorgo sudão (*Sorghum sudanense*) é amplamente adotado no semiárido de Pernambuco para garantir o aporte de forragem, principalmente na época de estiagem (CARVALHO et al., 2021; JARDIM et al., 2021). Apesar disso, é importante

estudar formas de mitigar o estresse salino em sorgo, não apenas para promover aumentos de produtividade, como também, tentar mitigar os efeitos danosos das águas salinas sobre o solo, pois o uso contínuo delas pode causar a salinização e inviabilizar a produção no semiárido. Para isto, o uso de atenuadores do estresse salino em plantas tem ganhado destaque em pesquisas relatadas na literatura, porém é importante avaliar também as alterações ocorridas no solo com o uso destes.

O silício (Si) é amplamente estudado como atenuante do estresse salino (ABDOLZADEH et al., 2022; LEMOS NETO et al., 2021; LIU; SOUNDARARAJAN; MANIVANNAN, 2019; YIN et al., 2016). Atua, principalmente, aumentando a disponibilidade de nutrientes no solo e reduzindo a absorção em excesso de íons tóxicos pelas plantas (GREGER; LANDBERG; VACULÍK, 2018). Quando associado a outros atenuantes a capacidade de mitigação do Si pode ser melhorada (CHAKMA et al., 2022; KALOTERAKIS et al., 2021). Na literatura, poucos estudos avaliaram a eficiência do Si combinado com outros atenuantes. É provável que a matéria orgânica e/ou *Trichoderma harzianum* possam melhorar a atuação do Si como atenuante do estresse salino, pelos efeitos positivos destes dois materiais em solos sob salinidade.

A matéria orgânica (esterco de curral) atua como fonte de nutrientes para as plantas (BELLO et al., 2021; WALKER; BERNAL, 2008). Além disso, melhora a retenção de água (AHMED; INOUE; MORITANI, 2010) e a agregação dos coloides nos solos (GOLDBERG et al., 2020), promovendo redução na salinidade, possibilitando que a lixiviação dos sais seja facilitada pela maior porosidade do solo. Em solos sódicos, a matéria orgânica contribui para reduzir a sodicidade, devido à liberação de Ca^{2+} e Mg^{2+} , que substituem o Na^+ no complexo de troca (MINHAS; QADIR; YADAV, 2019). Solos pobres em matéria orgânica, geralmente, são mais vulneráveis aos processos de degradação pela salinidade e sodicidade (PESSOA et al., 2022).

Na literatura, diversos estudos também relataram os benefícios promovidos pelo *T. harzianum* para mitigar o estresse salino em plantas (FAZELI-NASAB et al., 2022; YASMEEN; SIDDIQUI, 2018; ZHANG et al., 2019; ZIN; BADALUDDIN, 2020). Isso ocorre graças à relação simbiótica do *T. harzianum* com as plantas. O *T. harzianum* libera uma gama de compostos que induz as plantas a responderem ao estresse salino com mais eficiência (HARMAN et al., 2004; RAWAT et al., 2011). Além disso, o *T. harzianum* pode atuar como mineralizador da matéria orgânica (ZIN; BADALUDDIN, 2020), solubilizador de

fosfato e K^+ (AISHWARYA et al., 2020), e aumenta o crescimento radicular (HERMOSA et al., 2012).

Objetivou-se nesse estudo avaliar o potencial do silício isolado ou combinado com matéria orgânica e/ou *Trichoderma harzianum* em melhorar a produtividade do sorgo sudanense, ao longo de três ciclos, em um Neossolo Flúvico salino irrigado com água salina. A influência dos atenuantes sob a concentração de Na^+ , K^+ e Cl^- no solo e o conteúdo destes elementos nas plantas também foi investigado.

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Área do estudo

O estudo foi realizado na Estação de Agricultura Irrigada de Parnamirim - Universidade Federal Rural de Pernambuco (UFRPE), em Parnamirim – PE, Semiárido do Brasil (latitude 8° 5' 08'' S, longitude 39° 34' 27'' O e altitude de 390 m) (Figura 1). Segundo a classificação de Köppen , o clima da região é do tipo BSw^h, semiárido com curta estação chuvosa (dezembro a abril). A precipitação pluvial média anual da região é de 431,8 mm (RODRIGUES et al., 2019). O experimento foi conduzido em campo, em um Neossolo Flúvico salino (EMBRAPA, 2013). As propriedades químicas e físicas do solo nas profundidades 0 a 10, 10 a 20, 20 a 40 e 40 a 60 cm estão apresentadas na Tabela 1.

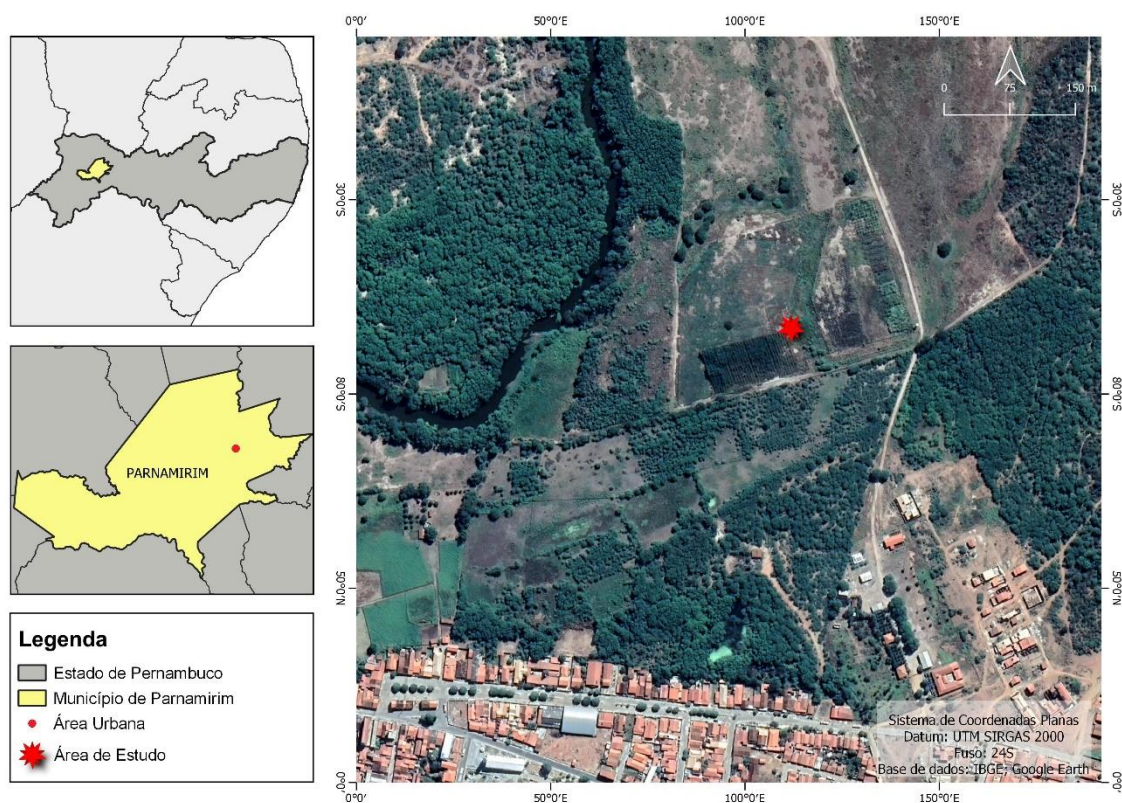


Figura 1. Localização do campo experimental em Parnamirim-PE, semiárido do Brasil.

Tabela 1. Caracterização química e textura do solo da área experimental.

Atributos	Camada (cm)			
	0-10	10-20	20-40	40-60
Propriedades químicas				
CE (dS m ⁻¹)	3,56	6,21	7,22	5,77
pH -	6,05	6,09	6,16	6,32
MO (g kg ⁻¹)	25,08	19,35	18,00	11,75
P (mg dm ⁻³)	28,40	19,73	14,83	9,75
K ⁺ (cmol _c dm ⁻³)	0,51	0,34	0,24	0,14
Na ⁺ (cmol _c dm ⁻³)	0,30	0,37	0,52	0,82
Ca ²⁺ (cmol _c dm ⁻³)	9,06	8,54	8,79	9,98
Mg ²⁺ (cmol _c dm ⁻³)	5,29	5,40	5,21	5,53
H+Al (cmol _c dm ⁻³)	0,96	0,89	0,76	0,60
SB (cmol _c dm ⁻³)	15,14	14,65	14,93	16,48
CTC (cmol _c dm ⁻³)	16,10	15,54	15,69	17,08
PST (%)	1,86	2,38	3,31	4,80
Extrato de saturação				
Ca ²⁺ (mmol _c L ⁻¹)	31,88	58,88	60,45	43,85
Mg ²⁺ (mmol _c L ⁻¹)	12,03	22,78	25,15	18,00
K ⁺ (mmol _c L ⁻¹)	9,63	5,78	5,08	2,13
Na ⁺ (mmol _c L ⁻¹)	5,58	9,40	12,18	13,15
RAS (mmol _c L ⁻¹)	1,20	1,50	1,83	2,23
Textura do solo				
Areia (%)	14,20	10,30	11,30	10,92
Silte (%)	72,12	75,62	71,62	75,48
Argila (%)	13,68	14,08	17,08	13,60

CE – condutividade elétrica do extrato de saturação; pH – potencial hidrogeniônico; MO – matéria orgânica; SB – soma de bases; CTC – capacidade de troca catiônica; PST – porcentagem de sódio trocável.

2.2 Design experimental

O experimento foi disposto em delineamento com blocos casualizados, com cinco tratamentos e quatro repetições. Os tratamentos consistiram em testar a eficácia do *Trichoderma harzianum* (T) e matéria orgânica (MO) para melhorar a atuação do silício (Si) na mitigação da salinidade na cultura do sorgo sudão (*Sorghum sudanense* (Piper) Stapf), cv. IPA Sudan 4202. Os tratamentos foram: sorgo sem aplicação de atenuante (controle); sorgo + Si; sorgo + Si + MO; sorgo + Si + T; e sorgo + Si + T + MO. O espaçamento adotado foi de 0,50 m entre fileiras e 10 plantas por metro linear. As dimensões do experimento foram de 20,0 x 16,5 m para área total, 4 x 4 m para as parcelas, e 2 x 2 m para as parcelas úteis (onde foram coletadas e avaliadas as plantas).

Para o estudo, três ciclos de sorgo (o primeiro corte mais duas rebrotas) foram conduzidos entre junho de 2021 e abril de 2022, totalizando 10 meses, dentre os quais, foi possível avaliar as respostas de crescimento do sorgo à aplicação de atenuantes para a salinidade durante as estações seca e chuvosa da região (Figura 2). Não ocorreram chuvas entre a semeadura e o primeiro corte (1º ciclo), enquanto no 2º e 3º ciclo os valores acumulados de precipitação foram iguais a 176,5 e 252 mm, respectivamente.

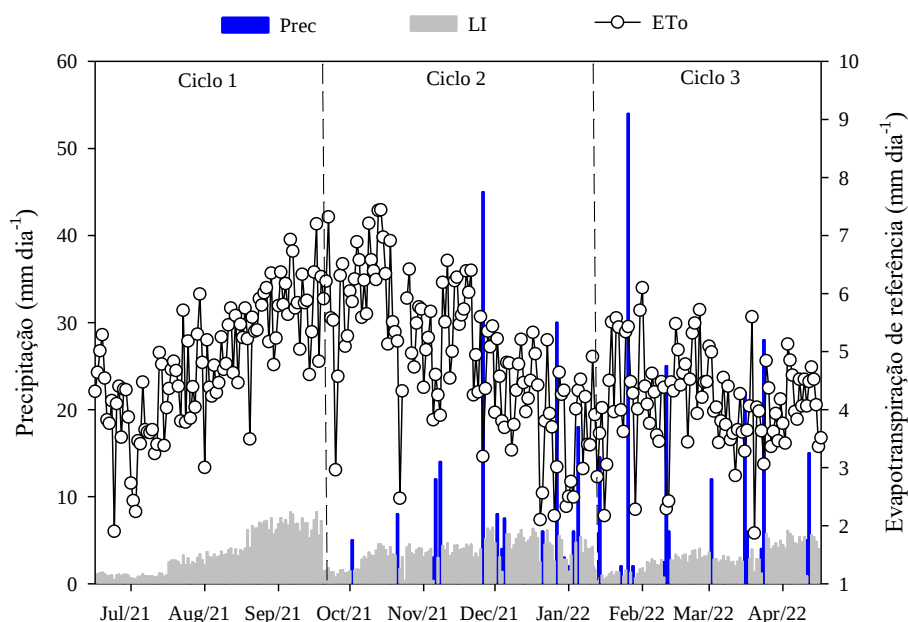


Figura 2. Condições meteorológicas em Parnamirim – PE durante o período experimental. Prec. – Precipitação pluvial (mm dia⁻¹); LI – Lâmina de irrigação (mm dia⁻¹); ET_o – Evapotranspiração de referência (mm dia⁻¹).

A irrigação foi realizada por meio de um sistema de irrigação por gotejamento com eficiência de 96%, vazão de cada gotejador de 1,06 L h⁻¹, emissores espaçados em 40 cm e intervalo de aplicação de 48 horas; tomando como base a reposição total da evapotranspiração da cultura (ET_c) (ALLEN et al., 1998). A Evapotranspiração de referência (ET_o) foi determinada pelo modelo proposto por Penman-Monteith e adaptado pela FAO-56 (ALLEN et al., 1998). Os dados meteorológicos foram coletados em uma estação automática do INMET (Instituto Nacional de Meteorologia), localizada a 50 km da área experimental. Apenas os dados da precipitação pluvial foram coletados na área do experimento, utilizando um pluviômetro manual.

A água para irrigação foi proveniente de um poço artesiano (Tabela 2), sendo classificada como C₄S₁, com risco muito alto de promover a salinização do solo e baixo risco de sodificação, conforme Richards (1954).

Tabela 2. Propriedades químicas da água utilizada na irrigação durante o período experimental

pH	CE	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Na ⁺	Cl ⁻	HCO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	B	Cu	Fe	Mn	Zn	RAS
-	mS cm ⁻¹	mmol _c L ⁻¹					mg L ⁻¹					mmol _c L ^{-0,5}		
7,23	3,12	9,29	9,23	0,12	11,73	26,38	5,70	0,76	0,11	0,02	0,02	0,03	0,20	3,85

pH – potencial hidrogeniônico; CE – condutividade elétrica; RAS – razão de adsorção de sódio.

O *T. harzianum* foi obtido a partir do produto comercial Trichodermil SC I306. No primeiro ciclo foram realizadas duas aplicações via solo, a primeira na ocasião do semeio e a segunda com intervalo de 30 dias após a primeira aplicação. No 2º e 3º ciclo foi realizada uma aplicação no início de cada rebrota. Em todas as aplicações a concentração da calda foi de 12,5 mL L⁻¹, conforme recomendação do fabricante. Com o uso de uma bomba costal manual, aplicaram-se 39,06 mL de calda por metro linear, acompanhando a linha de plantio.

O silicato de potássio, fonte de silício usada neste trabalho, foi aplicada duas vezes via solo (primeira aplicação realizada uma semana após o semeio e a segunda com intervalo de 15 dias) e duas aplicações foliares (a primeira com 15 dias após as aplicações via solo e a segunda 15 dias após a primeira aplicação foliar), em todos os ciclos. As concentrações das caldas foram de 5 mL L⁻¹ e 10 mL L⁻¹, para as aplicações via solo e foliar, respectivamente, conforme recomendação do fabricante. Aplicaram-se 39,06 mL m⁻¹ linear em ambas as condições. O silicato de potássio é um fertilizante que contém no mínimo 10% de K⁺ na forma de K₂O e 10% de silício.

Na ocasião do semeio, o solo foi adubado com esterco caprino (Tabela 3) na proporção de 50 Mg ha⁻¹, nos tratamentos que constavam aplicação de matéria orgânica. Segundo Freitas et al. (2012) essa dose proporciona o melhor desempenho para a cultura do sorgo. O esterco foi previamente curtido e incorporado na camada superficial do solo.

Tabela 3. Caracterização do esterco caprino utilizado como fonte de matéria orgânica neste experimento.

D	C	N	P	K ⁺	Na ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	pH	CE
g cm ⁻³	-----				g kg ⁻¹ -----			-	mS cm ⁻¹
0,8158	119,70	17,90	8,70	4,50	1,10	27,70	10,20	7,87	1,87

D – densidade do esterco; C – carbono orgânico total; N – nitrogênio total, pH - potencial hidrogeniônico; CE – condutividade elétrica.

2.3 Análise do solo

As amostras de solo foram coletadas ao final de cada ciclo, nas profundidades 0 a 10, 10 a 20, 20 a 40 e 40 a 60 cm. Todas as amostras foram secas ao ar e peneiradas em malha de 2 mm. Em seguida, as amostras foram submetidas à análise de elementos do complexo de troca e saturação do solo.

2.3.1 Fase solúvel

A pasta saturada foi preparada conforme a metodologia descrita por USSL (1954). Para isso, adicionou-se água destilada a 500 g de solo até atingir a saturação completa (USSL, 1954). Após 24 horas de descanso, a solução do solo foi extraída por sucção. Na solução do solo foi medida a condutividade elétrica (CE) a 25 °C, usando um condutivímetro, e as concentrações de Na⁺ e K⁺ (cátions), e Cl⁻ (ânion). Na⁺ e K⁺ foram determinados por fotometria de emissão de chama (USSL, 1954), e o Cl⁻ por titulação com solução de AgNO₃, utilizando K₂CrO₄ como indicador (USSL, 1954).

2.3.2 Complexo trocável

O pH do solo foi medido diretamente na suspensão da mistura solo:água de 1:2,5, utilizando um potenciômetro. A determinação dos cátions trocáveis foi feita após a lavagem das amostras de solo com álcool 96°. Os cátions trocáveis foram extraídos com solução de acetato de amônio a 1 mol L⁻¹. Após isso, Na⁺ e K⁺ foram determinados por fotometria de emissão de chama (USSL, 1954). A porcentagem de sódio trocável (PST) foi calculada pela razão do Na⁺ trocável com a capacidade de troca catiônica (CTC), conforme USSL (1954) (Equação 1).

$$\text{PST (\%)} = (\text{Na}^+/\text{CTC}) \times 100 \quad (1)$$

2.4 Produtividade

No momento da colheita, cinco plantas representativas da parcela útil foram pesadas para se obter a biomassa fresca. Em seguida, foram secas em estufa com circulação de ar forçada para se obter o peso seco. O peso médio (fresco e seco) das cinco plantas foi multiplicado pelo estande de plantas (número de plantas/ha) para se obter a produtividade de massa fresca e seca da parte aérea. Para eliminar a interferência de fatores bióticos, foi considerado um estande homogêneo de 200.000 plantas/ha para todos os tratamentos (SCHMILDT et al., 2001). Esse valor corresponde à média do estande de plantas dos tratamentos no momento da colheita. A produtividade de massa fresca e seca acumulada foi obtida pelo somatório dos valores encontrados nos três ciclos.

2.5 Conteúdo de sódio, potássio e cloreto na planta

Para determinar o conteúdo dos elementos nas frações das plantas, foi considerada a biomassa seca e os teores dos elementos em cada fração. A biomassa seca foi aquela obtida com as cinco plantas utilizadas para calcular a produtividade, no entanto, nesse caso, as plantas foram separadas por frações (folhas, colmos e panículas).

As frações vegetais secas foram trituradas em moinho do tipo Willey para determinação dos elementos Na^+ , K^+ e Cl^- . Em seguida, amostras de 100 mg da matéria seca foram submetidas à extração por incubação em tubos de ensaio com tampas rosqueadas, contendo 20 mL de água ultrapura, e fervidos em banho-maria por 1 hora a 100 °C. O extrato foi filtrado e os teores de Na^+ e K^+ foram determinados por fotometria de emissão de chama, conforme descrito por Rodrigues et al. (2013).

Para determinação do cloreto (Cl^-), a extração por incubação foi realizada com 25 mL de água ultrapura, 100 mg da matéria seca e fervura por 1 hora a 100 °C. Após a filtração, 10 mL do extrato foi coletado para titulação do cloreto com nitrato de prata (AgNO_3 28 mM), utilizando o cromato de potássio (K_2CrO_4 5%) como indicador (FERREIRA-SILVA et al., 2008). Com os valores dos teores destes elementos por fração das plantas e a produção de massa seca de cada fração, foram calculados os conteúdos dos elementos na parte aérea.

2.6 Análise estatística

Os dados foram submetidos à análise da variância e, normalidade, comparando-se a médias pelo teste de Scott-Knott ao nível de 5% de probabilidade, utilizando o programa estatístico Rstudio (R Core Team, 2019). Os gráficos foram elaborados no SigmaPlot (versão 14.0) (Systat Software Inc., San Jose, California, USA).

3 RESULTADOS

3.1 Propriedades químicas do solo

3.1.1 Camada 0-10 cm

As propriedades do solo foram alteradas com a aplicação dos atenuantes, quando comparado ao tratamento controle. No complexo de saturação, a CE apresentou diferença significativa entre os atenuantes apenas no 2º ciclo (Tabela 4). Para essa variável, o controle foi 61,17 % superior à média dos demais tratamentos. Com relação ao K^+ solúvel, as maiores concentrações foram observadas nos tratamentos com a presença da MO ou do T (i.e. 1ª ciclo - Si+MO e Si+T+MO; 2ª ciclo - Si+T e Si+T+MO; 3ª ciclo - Si+T) (Tabela 4). A testemunha e o Si apresentaram a menor concentração de K^+ . Para o Na^+ solúvel, no 1ª ciclo as maiores médias foram no controle, Si+MO e Si+T+MO, no 2ª ciclo no controle, e no 3ª ciclo na combinação Si+T (Tabela 4). O Cl^- apresentou as maiores concentrações na testemunha (1ª e 2ª ciclo) e nas combinações Si+MO e Si+T+MO (1ª e 3ª ciclo) (Tabela 4).

Tabela 4. Atributos químicos do solo na camada de 0-10 cm em resposta à aplicação de atenuantes do estresse salino em Neossolo Flúvico salino cultivado com sorgo em três cortes sucessivos

Tratamento	Atributos do solo							
	Fase solúvel				Complexo de troca			
	CE	K^+	Na^+	Cl^-	K^+	Na^+	PST	pH
	$dS\ m^{-1}$	----- mmol _c L ⁻¹ -----			---- cmol _c kg ⁻¹ ----		%	-
Ciclo 1								
Controle	7,08	0,79 c	124,37 a	64,58 a	1,14	6,23	38,67	6,79
Si	4,96	0,51 d	84,69 b	29,58 b	1,54	6,02	37,40	6,95
Si +MO	8,55	1,50 a	144,26 a	88,75 a	1,35	6,34	39,40	6,96
Si + T	7,69	0,97 b	90,22 b	44,58 b	1,11	5,52	34,30	6,80
Si +T+MO	7,94	1,53 a	119,69 a	73,75 a	1,38	6,96	43,23	6,76
Ciclo 2								
Controle	8,01 a	0,67 b	133,57 a	72,08 a	0,79 c	6,51 a	40,44 a	7,34 a
Si	3,49 c	0,67 b	72,07 c	20,00 b	1,23 a	5,93 b	36,83 b	6,93 b
Si +MO	5,70 b	0,76 b	107,30 b	41,25 b	1,01 b	6,02 b	37,37 b	7,20 a
Si + T	5,86 b	0,92 a	90,58 c	44,58 b	1,25 a	5,90 b	36,65 b	6,84 b
Si +T+MO	4,83 b	0,94 a	83,41 c	31,67 b	1,03 b	6,07 b	37,73 b	7,05 b
Ciclo 3								
Controle	3,62	0,36 c	60,27 c	13,33 c	0,58 b	5,63	34,95	7,71

Si	2,95	0,44 c	48,98 d	13,75 c	0.96 a	5.19	32.22	7,54
Si +MO	4,47	0,40 c	74,95 b	27,92 a	0.65 b	5.25	32.59	7,63
Si + T	3,65	0,56 a	86,12 a	22,08 b	0.74 b	5.39	33.49	7,58
Si +T+MO	4,39	0,49 b	76,61 b	32,08 a	0.63 b	5.39	33.49	7,63

CE – condutividade elétrica do extrato de saturação; PST – porcentagem de sódio trocável; pH – potencial hidrogeniônico; Si – Silício; T – *Trichoderma harzianum*; MO – matéria orgânica.

A concentração de K^+ trocável diferiu entre os tratamentos no 2ª e no 3ª ciclo (Tabela 4). No 2ª ciclo, os maiores valores foram observados no tratamento de Si aplicado isoladamente e na combinação Si+T, e no 3ª ciclo o Si promoveu o maior valor médio de K^+ trocável. O Na^+ trocável e a PST diferiram entre os tratamentos apenas no 2ª ciclo, no qual o controle se destacou em comparação aos demais tratamentos (Tabela 4). Isso mostra que os atenuantes foram eficientes para reduzir a PST apenas no 2ª ciclo. Por fim, o pH diferiu entre os tratamentos apenas no 2ª ciclo (Tabela 4), tendo o tratamento controle e a combinação Si+MO as maiores médias.

3.1.2 Camada 10-20 cm

Na fase solúvel, os tratamentos controle, Si, Si+MO e Si+T+MO apresentaram os maiores valores de CE no 1ª ciclo, no 2ª ciclo foi o controle, Si+MO, Si+T e Si+T+MO, e no 3ª ciclo a combinação Si+MO (Tabela 5). Novamente, a MO e o T foram os atenuantes que mais influenciaram na concentração de K^+ solúvel (Tabela 5). No 1ª ciclo, os maiores valores foram no Si+T+MO, 2ª ciclo no Si+T, e no 3ª ciclo no controle, Si+MO, Si+T e Si+T+MO. Para o Na^+ solúvel, no 1ª ciclo os maiores valores foram no Si, no 2ª ciclo no controle, Si+MO e Si+T+MO, e no 3ª ciclo no controle e na combinação Si+T+MO (Tabela 5). No 1ª ciclo o Cl^- apresentou a maior concentração no controle, no 2ª ciclo no controle e nas combinações Si+MO, Si+T e Si+T+MO, no 3ª ciclo não houve diferença significativa (Tabela 5).

Tabela 5. Atributos químicos do solo na camada de 10-20 cm em resposta à aplicação de atenuantes do estresse salino em Neossolo Flúvico salino cultivado com sorgo em três cortes sucessivos

Tratamento	Atributos do solo							
	Fase solúvel				Complexo de troca			
	CE	K^+	Na^+	Cl^-	K^+	Na^+	PST	pH
	$dS\ m^{-1}$	-----	$mmol_c\ L^{-1}$	-----	----	$cmol_c\ kg^{-1}$	----	(%)
Ciclo 1								

Controle	6,53 a	0,71 b	77,42 b	68,75 a	0,59 c	5,02	32,33	6,91
Si	6,39 a	0,64 b	111,44 a	56,25 b	0,60 c	6,02	38,75	6,74
Si +MO	6,98 a	0,80 b	95,03 b	59,58 b	0,85 b	4,76	30,63	6,68
Si + T	4,77 b	0,65 b	87,48 b	44,58 c	0,69 c	5,41	34,78	6,76
Si +T+MO	5,84 a	1,13 a	90,82 b	45,42 c	1,07 a	5,29	34,03	6,83
Ciclo 2								
Controle	6,20 a	0,31 b	122,82 a	53,75 a	0,45 b	6,86	43,58 b	6,71
Si	4,13 b	0,22 b	98,4 b	26,25 b	0,35 b	7,00	45,08 a	7,14
Si +MO	5,76 a	0,34 b	116,85 a	45,42 a	0,54 b	6,70	43,11 b	7,04
Si + T	6,63 a	0,47 a	94,76 b	52,08 a	0,77 a	6,66	42,83 b	6,97
Si +T+MO	5,70 a	0,31 b	114,46 a	52,92 a	0,69 a	7,22	46,47 a	7,09
Ciclo 3								
Controle	4,83 b	0,38 a	103,56 a	34,58	0,42	7,16 a	46,09 a	7,19 b
Si	2,93 c	0,24 b	68,97 b	20,63	0,29	5,16 b	33,19 b	7,60 a
Si +MO	5,43 a	0,31 a	80,24 b	25,63	0,41	6,83 a	43,94 a	7,70 a
Si + T	4,52 b	0,32 a	71,91 b	39,58	0,43	5,77 b	37,15 b	7,63 a
Si +T+MO	4,23 b	0,31 a	113,73 a	27,50	0,45	6,93 a	44,58 a	7,34 b

CE – condutividade elétrica do extrato de saturação; PST – porcentagem de sódio trocável; pH – potencial hidrogeniônico; Si – Silício; T – *Trichoderma harzianum*; MO – matéria orgânica.

O K⁺ trocável apresentou a maior concentração na combinação Si+T+MO no 1^a ciclo, no 2^a ciclo Si+T e Si+T+MO, e no 3^a não houve diferença significativa entre os tratamentos. O Na⁺ trocável diferiu apenas no 3^a ciclo, o controle, Si+MO e Si+T+MO apresentaram as maiores médias. A PST acompanhou o comportamento do Na⁺ trocável no 3^a ciclo, no 2^a ciclo o Si e Si+T+MO apresentaram a maior média, e no 1^a ciclo não houve diferença significativa. No 3^a ciclo, os atenuantes Si, Si+MO e Si+T apresentaram os maiores valores de pH.

3.1.3 Camada 20-40 cm

A CE diferiu estatisticamente apenas no 2^a ciclo, todos os atenuantes reduziram o valor da CE, em comparação com a testemunha (Tabela 6). Com relação ao K⁺ solúvel, no 1^a ciclo a maior concentração ocorreu na combinação Si+T+MO, e no 2^a ciclo no controle e no Si+T (Tabela 6). O Na⁺ e o Cl⁻ diferiram entre os tratamentos no 2^a e 3^a ciclo (Tabela 6). O controle, Si e Si+T apresentaram a maior concentração de Na⁺ solúvel no 2^a ciclo, e no 3^a ciclo foi o controle e as combinações Si+MO e Si+T+MO. Para o Cl⁻, os maiores valores foram observados no controle (2^a e 3^a ciclo) e na combinação Si+T (3^a ciclo) (Tabela 6).

Tabela 6. Atributos químicos do solo na camada de 20-40 cm em resposta à aplicação de atenuantes do estresse salino em Neossolo Flúvico salino cultivado com sorgo em três cortes sucessivos

Tratamento	Atributos do solo							
	Fase solúvel				Complexo de troca			
	CE dS m ⁻¹	K ⁺ ----- mmol _c L ⁻¹ -----	Na ⁺	Cl ⁻	K ⁺ ---- cmol _c kg ⁻¹ ----	Na ⁺	PST (%)	pH -
Ciclo 1								
Controle	4,44	0,42 b	43,62	41,25	0,35 a	3,44	21,93	6,95 b
Si	5,69	0,45 b	50,41	42,50	0,26 b	3,53	22,49	7,23 a
Si +MO	4,86	0,39 b	56,41	30,42	0,28 b	3,62	23,05	7,11 a
Si + T	4,27	0,49 b	42,21	36,25	0,24 b	3,29	20,99	6,91 b
Si +T+MO	5,33	0,60 a	67,62	42,08	0,33 a	3,94	25,11	7,15 a
Ciclo 2								
Controle	8,17 a	0,35 a	81,03 a	79,38 a	0,31	4,94	31,50	6,73
Si	5,94 b	0,24 b	80,43 a	37,92 c	0,26	5,12	32,61	6,72
Si +MO	6,78 b	0,29 b	62,52 b	57,92 b	0,26	5,03	32,06	6,68
Si + T	6,97 b	0,36 a	70,28 a	59,58 b	0,37	3,87	24,66	6,72
Si +T+MO	6,97 b	0,25 b	55,95 b	58,75 b	0,35	5,26	33,54	7,01
Ciclo 3								
Controle	6,32	0,34	93,08 a	50,42 a	0,22	6,15 a	39,22 a	6,92 c
Si	3,98	0,29	74,95 b	27,08 b	0,24	5,51 b	35,12 b	7,21 b
Si +MO	5,72	0,36	102,57 a	56,25 a	0,21	5,48 b	34,93 b	7,37 a
Si + T	5,29	0,30	63,46 b	40,42 b	0,21	5,63 b	35,86 b	7,22 b
Si +T+MO	4,64	0,23	88,76 a	29,17 b	0,21	6,21 a	39,60 a	7,46 a

CE – condutividade elétrica do extrato de saturação; PST – porcentagem de sódio trocável; pH – potencial hidrogeniônico; Si – Silício; T – *Trichoderma harzianum*; MO – matéria orgânica.

No complexo de troca, o K⁺ diferiu apenas no 1^a ciclo, o controle e a combinação Si+T+MO se destacaram (Tabela 6). O Na⁺ trocável diferiu apenas no 3^a ciclo, a maior concentração foi obtida no controle e com os atenuantes Si+T+MO (Tabela 6). A PST seguiu o mesmo comportamento do Na⁺ trocável (Tabela 6). As combinações Si+MO e Si+T+MO foram as que mais interferiam nos valores de pH (1^a e 3^a ciclo) (Tabela 6).

3.1.4 Camada 40-60 cm

Nessa camada, todos os atenuantes foram eficientes para reduzir a CE no 2^a e 3^a ciclo (Tabela 7). Houve diferença significativa para o K⁺ solúvel no 2^a e 3^a ciclo (Tabela 7). A maior concentração foi obtida com a combinação Si+T (2^a ciclo), e no controle e Si (3^a ciclo).

O K^+ trocável diferiu apenas no 2^a ciclo, o controle e Si+T apresentaram a maior concentração. O Na^+ trocável diferiu estatisticamente apenas no 2^a ciclo (Tabela 7), a menor concentração foi obtida com a combinação Si+T. A PST seguiu o mesmo comportamento do Na^+ trocável (Tabela 7). Os maiores valores de pH ocorrem no Si e Si+T no 1^a ciclo, Si e Si+MO no 2^a ciclo, e no 3^a ciclo não houve diferença significativa.

Tabela 7. Atributos químicos do solo na camada de 40-60 cm em resposta à aplicação de atenuantes do estresse salino em Neossolo Flúvico salino cultivado com sorgo em três cortes sucessivos

Tratamneto	Atributos do solo							
	Fase solúvel				Complexo de troca			
	CE	K^+	Na^+	Cl^-	K^+	Na^+	PST	pH
	$dS\ m^{-1}$	----- mmol _c L ⁻¹ -----	----- mmol _c L ⁻¹ -----	----- mmol _c L ⁻¹ -----	---- cmol _c kg ⁻¹ ----	---- cmol _c kg ⁻¹ ----	(%)	-
Ciclo 1								
Controle	5,22	0,39	46,34 c	42,08	0,21	3,65	21,35	6,80 b
Si	5,29	0,47	75,67 b	42,92	0,22	4,35	25,47	7,13 a
Si +MO	6,76	0,52	57,83 c	37,92	0,19	3,62	21,17	6,83 b
Si + T	4,58	0,36	52,01 c	31,25	0,21	3,50	20,49	7,29 a
Si +T+MO	5,73	0,36	99,85 a	43,75	0,26	4,12	24,09	6,87 b
Ciclo 2								
Controle	11,31 a	0,30 b	121,33 a	98,33 a	0,33 a	4,80 a	28,09 a	6,72 b
Si	5,91 b	0,28 b	63,12 b	47,08 b	0,23 b	4,88 a	28,60 a	7,15 a
Si +MO	8,02 b	0,34 b	72,07 b	52,08 b	0,26 b	4,33 a	25,37 a	7,06 a
Si + T	7,12 b	0,64 a	61,32 b	58,75 b	0,37 a	3,38 b	19,76 b	6,56 b
Si +T+MO	5,83 b	0,33 b	63,71 b	46,25 b	0,23 b	4,62 a	27,07 a	6,73 b
Ciclo 3								
Controle	9,02 a	0,40 a	51,22 b	84,17 a	0,21	4,25	24,88	7,31
Si	6,63 b	0,43 a	82,59 a	44,17 b	0,22	4,10	24,03	7,04
Si +MO	5,88 b	0,33 b	52,51 b	50,42 b	0,14	3,64	21,28	7,06
Si + T	3,95 c	0,30 b	43,57 b	27,08 c	0,21	3,75	21,97	7,01
Si +T+MO	5,70 b	0,29 b	57,58 b	44,58 b	0,24	4,19	24,54	6,97

CE – condutividade elétrica do extrato de saturação; PST – porcentagem de sódio trocável; pH – potencial hidrogeniônico; Si – Silício; T – *Trichoderma harzianum*; MO – matéria orgânica.

3.2 Avaliação nutricional das plantas

O conteúdo de Na^+ na parte aérea da planta diferiu apenas no 2^a ciclo (Tabela 8). Para essa variável, a combinação Si+T se destacou em comparação aos demais tratamentos, esse resultado foi influenciado pelo maior conteúdo de Na^+ presente nos colmos nesse tratamento

(Tabela 8). As combinações Si+MO, Si+T e Si+T+MO interferiram positivamente no conteúdo de K^+ nos colmos, panículas e parte aérea das plantas, nos três ciclos. Os tratamentos com a presença de MO ou T em associação com o Si, também aumentaram o conteúdo de Cl^- nos colmos e na parte aérea das plantas (Figura 8). A ordem que melhor representa a predominância dos elementos nas frações e na parte aérea das plantas de sorgo é: $K^+ > Cl^- > Na^+$.

Tabela 8. Conteúdo de Na, K e Cl nas frações e parte aérea da planta de sorgo em função dos atenuantes do estresse salino em três ciclos de cultivos sucessivos

Fração da planta/ Tratamento	Na ⁺	K ⁺	Cl ⁻	Na ⁺	K ⁺	Cl ⁻	Na ⁺	K ⁺	Cl ⁻
	Ciclo 1			Ciclo 2			Ciclo 3		
Folha									
Controle	0,05	0,78 b	0,41	0,15 a	0,67	0,32	0,06	0,36	0,31 a
Si	0,07	0,90 b	0,44	0,06 b	0,48	0,24	0,04	0,30	0,24 b
Si +MO	0,06	0,85 b	0,38	0,08 b	0,57	0,30	0,05	0,41	0,22 b
Si + T	0,06	0,84 b	0,36	0,10 b	0,64	0,37	0,07	0,38	0,23 b
Si +T+MO	0,06	1,06 a	0,52	0,10 b	0,63	0,34	0,05	0,39	0,30 a
Colmo									
Controle	0,16 b	2,65 b	2,07 a	0,22 b	2,11	1,14	0,07	0,86 c	0,82 b
Si	0,11 b	2,72 b	1,47 b	0,19 b	2,19	1,32	0,14	1,46 b	1,06 b
Si +MO	0,21 b	3,75 a	2,07 a	0,30 b	2,93	1,19	0,17	1,82 a	1,32 a
Si + T	0,32 a	4,16 a	2,21 a	0,80 a	2,35	1,73	0,15	1,92 a	1,27 a
Si +T+MO	0,17 b	3,22 b	2,14 a	0,39 b	2,82	1,46	0,12	1,79 a	1,30 a
Panícula									
Controle	0,02	0,15 b	0,05	0,02	0,14	0,02	0,01 b	0,05 c	0,03
Si	0,03	0,19 b	0,10	0,03	0,13	0,04	0,01 b	0,04 c	0,03
Si +MO	0,05	0,42 a	0,11	0,02	0,14	0,04	0,02 a	0,10 a	0,06
Si + T	0,05	0,27 b	0,11	0,03	0,13	0,02	0,01 b	0,04 c	0,04
Si +T+MO	0,06	0,35 a	0,10	0,02	0,14	0,03	0,01 a	0,07 b	0,07
Parte aérea									
Controle	0,61	8,51 b	4,84 b	0,98 b	7,06 b	3,22 b	0,37	3,07 c	2,56 b
Si	0,60	8,73 b	4,58 b	0,72 b	6,29 b	3,35 b	0,48	4,03 b	2,65 b
Si +MO	0,83	11,81 a	6,29 a	0,95 b	8,13 a	3,37 b	0,68	5,50 a	3,54 a
Si + T	0,90	10,25 a	4,99 b	2,29 a	8,91 a	5,13 a	0,61	5,04 a	3,42 a
Si +T+MO	0,82	11,46 a	6,30 a	1,20 b	8,38 a	3,98 b	0,49	4,65 a	3,51 a

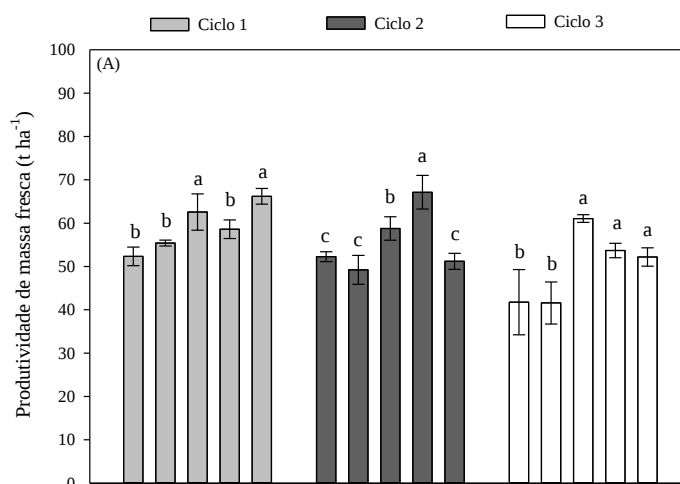
Si – Silício; T – *Trichoderma harzianum*; MO – matéria orgânica.

3.3 Produtividade de biomassa pelo sorgo

Não houve diferença de produtividade de massa fresca e seca entre as plantas cultivadas sob aplicação de Si isoladamente e as do controle, em todos os ciclos e no acumulado dos ciclos (Figura 3 A e B, Figura 4 A e B).

Em todos os ciclos, a combinação do Si com o T e/ou MO se destacou para produção de massa fresca e seca da parte aérea (i. e. 1º ciclo - Si+MO e Si+T+MO; 2ª ciclo – Si+T; 3ª ciclo - Si+MO, Si+T e Si+T+MO) (Figura 3 A e B). No entanto, no acumulado dos ciclos não houve diferença entre as combinações Si+MO, Si+T e Si+T+MO (Figura 4 A e B). No acumulado dos ciclos, a produtividade média de massa fresca obtida com as plantas do controle e do tratamento de Si aplicado isoladamente foi 146,31 t ha⁻¹, enquanto com os atenuantes Si+MO, Si+T e Si+T+MO foram alcançadas produtividade de 182,43, 179,45 e 169,62 t ha⁻¹, respectivamente (Figura 4 A). Isso corresponde a ganhos de 24,69, 22,65 e 15,93% com as combinações Si+MO, Si+T e Si+T+MO, respectivamente, em comparação com a testemunha e o Si (Figura 4).

Para a produtividade de massa seca acumulada, os atenuantes Si+MO, Si+T e Si+T+MO promoveram ganhos de 32,06, 33,13 e 25,72%, respectivamente, a mais que o tratamento controle e o Si aplicado isoladamente (Figura 4 B). Isso deve ser melhor avaliado para definir o manejo de cultivo de sorgo em solo salino, considerando os custos e benefícios da aplicação destes produtos.



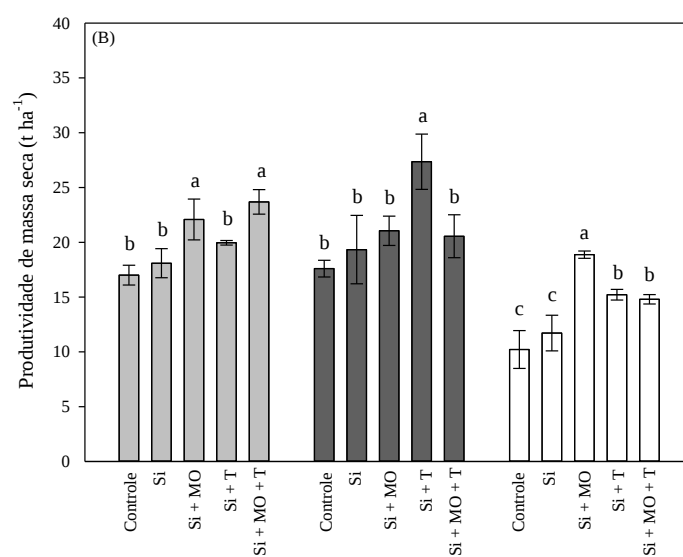
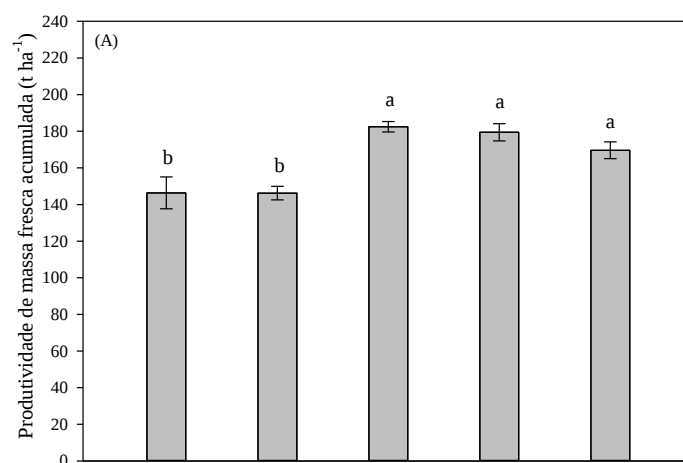


Figura 3. Produtividade de massa fresca (A), produtividade de massa seca (B) do sorgo sob estresse salino em função do uso de atenuantes. Si – Silício; T – *Trichoderma harzianum*; MO – matéria orgânica.



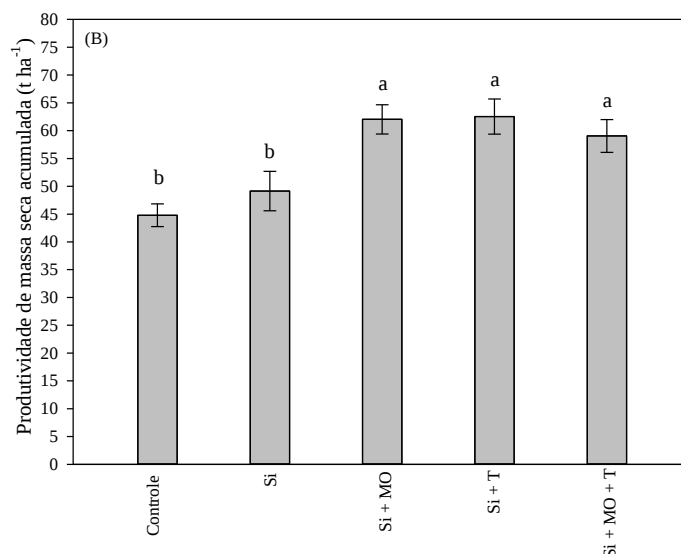


Figura 4. Produtividade de massa fresca acumulada (A), produtividade de massa seca acumulada (B) do sorgo sob estresse salino em função do uso de atenuantes. Si – Silício; T – *Trichoderma harzianum*; MO – matéria orgânica.

4 DISCUSSÃO

Em geral, o solo do tratamento testemunha se manteve com a maior CE em todas as camadas ao longo dos ciclos de sorgo, em comparação com aqueles onde houve aplicação dos atenuantes. Na camada 10-20 cm, o solo sob as combinações Si+MO e Si+T+MO não diferiram da testemunha, em todos os ciclos (Tabela 5). Isso pode ter ocorrido devido à maior capacidade de retenção de água no solo promovido pela MO, visto que, a água utilizada para irrigação possui alta concentração de cátions (Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+}) e ânions (Cl^-) (Tabela 2). Além disso, a MO utilizada nesse experimento também é fonte desses elementos (Tabela 3). Ao longo dos três ciclos, a CE se manteve com valores próximos aos verificados antes da implantação do experimento (Tabela 1), em todos os tratamentos, no entanto, no controle a CE apresenta uma maior tendência de crescimento a longo prazo.

O aumento da salinidade no controle foi influenciado, principalmente, pela predominância do Cl^- e Na^+ na solução do solo nesse tratamento, reflexo da baixa qualidade da água utilizada neste experimento, que contém alta concentração desses íons em sua composição (Tabela 2). Segundo Fernandes et al. (2009) e Pessoa et al. (2022), é comum na região a predominância de Na^+ e Cl^- na solução do solo em áreas irrigadas, devido à baixa qualidade da água subterrânea na região. A grande concentração desses elementos na solução do solo contribui para aumentar a força iônica da solução do solo e, conseqüentemente, a sua condutividade elétrica (BLACK; CAMPBELL, 1982).

A maior concentração de Na^+ solúvel observada no solo do tratamento testemunha, em todas as profundidades, mostra uma tendência dos atenuantes em reduzir o teor desse elemento no solo. A combinação Si+T+MO também se destacou para a concentração de Na^+ solúvel nas camadas do solo estudadas. Nesse caso, o T atua como decompositor da MO, liberando o Na^+ mais rapidamente da composição da MO para o solo (SHARMA; SINGH; SHARMA, 2012; ZIN; BADALUDDIN, 2020). A concentração de Na^+ solúvel nas camadas do solo seguiu a ordem: controle > Si+T+MO > Si+MO > Si+T > Si.

A maior concentração de Cl^- ocorreu no solo da testemunha, independentemente da profundidade. Na camada de 0-10 cm, as combinações Si+MO e Si+T+MO também elevaram a concentração de Cl^- na solução do solo. Isso ocorreu devido à maior retenção de água no solo com o uso da MO (LAL, 2020). O Si isolado e a combinação Si+T promoveram a menor concentração no solo, independentemente da profundidade. Isso mostra que os atenuantes reduziram a concentração do Cl^- no perfil do solo, em comparação com a testemunha. Ainda não está claro na literatura sobre como o Si reduz a concentração de Na^+ e Cl^- no solo. Os poucos relatos mostraram que o Si promove a imobilização do Na^+ , impedindo que participe das reações químicas do solo (KHAN et al., 2021; ZHANG et al., 2023). A grande maioria dos estudos concentram esforços em entender como o Si age para atenuar o efeito dos estresses abióticos sobre as plantas.

As combinações Si+T e Si+T+MO foram as que mais influenciaram positivamente na concentração de K^+ solúvel, principalmente nas camadas 0-10, 10-20 e 20-40 cm, em todos os ciclos. Isso ocorreu pelo fato da MO ser fonte de K^+ e o T atuar com mineralizador da MO e solubilizador do K^+ já presente no solo (AISHWARYA et al., 2020; IKRAM et al., 2019; KUSUMAWATI et al., 2021; PRATIWI et al., 2021). O Si isolado e a combinação Si+MO foram os tratamentos que levaram à menor concentração de K^+ solúvel no solo. Em comparação com a amostra de solo inicial (Tabela 1), houve uma redução do K^+ solúvel e o Na^+ solúvel aumentou em, aproximadamente, 10 vezes nas camadas do solo ao longo dos ciclos. Os componentes da fração solúvel do solo são rapidamente alterados em áreas com uso da irrigação com água salinas (PESSOA et al., 2022; YU et al., 2018).

O K^+ trocável teve grande variação entre os tratamentos, nas camadas e nos ciclos. Pelo fato do K ser um íon de carga menor (+1), o Ca e Mg (presentes na água de irrigação), que possuem maior carga (+2), são mais facilmente retidos no complexo de troca do solo em relação ao K^+ (CARNEIRO et al., 2006). Além disso, devido à predominância do Na^+ solúvel

na solução do solo, era esperada uma maior concentração de Na^+ no complexo de troca, em comparação ao K^+ .

O Na^+ trocável aumentou ao longo dos ciclos em todas as camadas, independentemente do tratamento, em comparação com a análise de solo inicial. Nas profundidades em que os tratamentos apresentaram diferença significativa (i.e. 0-10 cm – 1ª ciclo, 10-20 cm – 3ª ciclo, 20-40 cm – 3ª ciclo, 40-60 cm – 2ª ciclo), a testemunha e a combinação Si+T+MO foram os tratamentos que promoveram os maiores valores de Na^+ trocável, repetindo o mesmo comportamento observado para o Na^+ solúvel. A maior concentração de Na^+ na solução do solo nesses tratamentos também aumenta a presença do Na^+ no complexo de troca, pelo equilíbrio químico entre os íons da fração solúvel e trocável dos solos.

A PST seguiu o mesmo comportamento do Na^+ trocável. Em comparação com a amostra de solo inicial (Tabela 1), a PST saltou entre 200 e 400% nas camadas do solo ao longo dos três ciclos de sorgo. Segundo USSL (1954), o solo passou a ser classificado como salino sódico, com $\text{CE} > 4 \text{ dS m}^{-1}$ e $\text{PST} > 15\%$. O aumento da sodicidade promove a deterioração física do solo, afetando principalmente a infiltração de água no solo e penetração das raízes (FREIRE et al., 2003; MINHAS; QADIR; YADAV, 2019). O solo utilizado nesse estudo é, especialmente, mais susceptível a salinização e sodificação, devido a sua textura mais fina (Tabela 1) (PESSOA et al., 2019; SILVA et al., 2007).

O pH apresentou elevada variabilidade entre os tratamentos, em todas as camadas do solo. Variou de 6,68 a 7,75, valor acima da faixa ideal para a cultura do sorgo, que é de 5,5 a 6,5 (RAMÍREZ-JARAMILLO; LOZANO-CONTRERAS; RAMÍREZ-SILVA, 2020). Em todas as profundidades, o pH foi superior ao observado na amostra de solo inicial (Tabela 1). É possível que este aumento se deva ao desequilíbrio na composição iônica decorrente do excesso de Na^+ ou presença de carbonatos e bicarbonatos, que também estão presentes na água utilizada para irrigação (Tabela 2) (WHALEN et al., 2000; ZHANG et al., 2020).

Nas plantas, foi observado um maior conteúdo de K^+ em relação ao Na^+ . Isso pode ter ocorrido devido à capacidade do Si em aumentar a absorção de K^+ , equilibrando assim a razão Na^+/K^+ (DHIMAN et al., 2021; HURTADO et al., 2021; YIN et al., 2016). Além disso, o Si forma barreira sílica nas raízes que reduz a passagem de Na^+ para parte aérea (DHIMAN et al., 2021; YIN et al., 2013). No entanto, não houve diferença significativa para o conteúdo de Na^+ nas plantas cultivadas com os atenuantes e no tratamento controle, exceto para a combinação Si+T no 2ª ciclo. Mesmo com o aumento da biomassa das plantas com o uso dos

atenuantes, o conteúdo de Na^+ não foi alterado. O conteúdo dos elementos leva em consideração a biomassa das plantas ou das frações, nesse sentido, a concentração do Na^+ pode ser superior no controle, mas por apresentar menor biomassa, o conteúdo acumulado nas plantas não diferiu dos demais tratamentos.

As combinações Si+MO, Si+T e Si+T+MO interferiram positivamente no conteúdo de K^+ na parte aérea das plantas. O Si isolado não diferiu da testemunha, mas, quando associado ao T ou a MO, houve incremento no conteúdo de K^+ na parte aérea das plantas. Isso ocorreu graças à capacidade da MO em melhorar a fertilidade do solo, e o T solubilizar e fornecer K^+ às plantas (IKRAM et al., 2019; WANG et al., 2014). Em outras culturas foi comprovada a eficiência isolada do Si, MO e T em melhorar a absorção de K^+ em detrimento do Na^+ , como no espinafre (KONG et al., 2021), feijão-fava (EL-BAKI; MOSTAFA, 2014), trigo (TUNA et al., 2008), e no próprio sorgo (HURTADO et al., 2020; CHEN et al., 2016; HURTADO et al., 2019).

O maior conteúdo de Cl^- nas combinações Si+MO, Si+T e Si+T+MO foi influenciado pela maior produção de biomassa pelo sorgo nessas combinações. O Cl^- está presente em maior quantidade na água utilizada para irrigação (Tabela 2). Devido a sua grande solubilidade, o Cl^- pode rapidamente atingir concentrações tóxicas às plantas (PESSOA et al., 2022; XU et al., 1999). Neste estudo, foi observado que mais Cl^- se acumulou no sorgo em comparação com o Na^+ (Tabela 8). Ainda não é bem compreendido como o Si alivia o estresse iônico promovido pelo excesso de Cl^- no tecido vegetal. O principal mecanismo relatado na literatura é a redução da entrada do Cl^- no xilema da raiz e consequente redução no transporte desse elemento para parte aérea (SHI et al., 2013). No arroz, o Si reduziu a absorção de Cl^- e melhorou a relação K^+/Cl^- , enquanto a concentração de Cl^- nas raízes não foi alterada (SHI et al., 2013). Resultados semelhantes foram encontrados no quiabo (ABBAS et al., 2015) e na videira (SOYLEMEZOGLU et al., 2009).

O Si aplicado de forma isolada não diferiu do controle para produção de massa fresca e seca da parte aérea, e no acumulado dos ciclos (Figura 3 A e B, Figura 4 A e B). Isso pode ter ocorrido porque a salinidade do solo durante os três ciclos não ultrapassou a salinidade limiar do sorgo sudão, que é 10 dS m^{-1} (IPA, 2007). Sob condições de maior estresse salino o efeito benéfico do Si em plantas é mais acentuado (GREGER; LANDBERG; VACULÍK, 2018). O ganho na produtividade com as combinações Si+MO, Si+T e Si+T+MO está associado a melhorias nos atributos químicos, fertilidade do solo e nutrição das plantas (AISHWARYA et al., 2020; NAVEED et al., 2020; SOUSA et al., 2018; YIN et al., 2016). A

produtividade obtida neste estudo é compatível a encontrada quando o sorgo sudão é irrigado com água de boa qualidade (CUNHA; LIMA, 2010; OLIVEIRA et al., 2010; RODRIGUES et al., 2020).

5 CONCLUSÕES

A qualidade química do solo foi melhorada com o uso dos atenuantes do estresse salino, principalmente pela redução na condutividade elétrica, Na^+ solúvel, Cl^- , Na^+ trocável e porcentagem de sódio trocável, em comparação com o tratamento controle. Dessa forma, o risco de degradação e perda da capacidade produtiva do solo é reduzido pelos atenuantes, independentemente da combinação adotada. A associação do silício com a matéria orgânica e/ou *Trichoderma harzianum* aumenta a concentração de K^+ solúvel no solo e o conteúdo desse elemento nas plantas. Nesse sentido, a tolerância das plantas a salinidade é aumentada, uma vez que o K^+ compete com a absorção de Cl^- e Na^+ e participa de diversos processos metabólicos nas plantas. A determinação de P, Ca^{2+} e Mg^{2+} poderia comprovar que a combinação desses atenuantes melhora a nutrição das plantas e a tolerância do sorgo sudão ao estresse salino. O uso combinado do Si com a matéria orgânica ou *Trichoderma harzianum* incrementa a produtividade do sorgo irrigado com água salina. Estudos de longa duração podem ser realizados para testar a eficiência dos atenuantes a longo prazo. Os autores também recomendam que em novos estudos seja acrescentado uma fonte com maior concentração de Ca^{2+} e Mg^{2+} , como gesso, para conter a sodicidade do solo.

REFERÊNCIAS

- ABBAS, T. et al. Silicon-induced alleviation of NaCl toxicity in okra (*Abelmoschus esculentus*) is associated with enhanced photosynthesis, osmoprotectants and antioxidant metabolism. **Acta Physiologiae Plantarum**, v. 37, n. 2, p. 6, 10 fev. 2015.
- ABDOLZADEH, A. et al. Effect of silicon and nano silicon application on wheat (C3) and sorghum (C4) under salinity stress. **Journal of Plant Production Research**, v. 29, n. 1, p. 173–190, 2022.
- AHMED, B. A. O.; INOUE, M.; MORITANI, S. Effect of saline water irrigation and manure application on the available water content, soil salinity, and growth of wheat. **Agricultural Water Management**, v. 97, n. 1, p. 165–170, 2010.
- AISHWARYA, S. et al. Biosolubilization of different nutrients by *Trichoderma* spp. and their mechanisms involved: A review. **International Journal of Advances in Agricultural Science and Technology**, v. 7, n. 6, p. 34–39, 2020.
- ALLEN, R. G. et al. Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop requirements. **Irrigation and Drainage Paper No. 56**, FAO, n. 56, p. 300, 1998.

- AQUINO, A. J. S. et al. Crescimento, partição de matéria seca e retenção de Na⁺, K⁺ e Cl⁻ em dois genótipos de sorgo irrigados com águas salinas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 31, n. 5, p. 961–971, 2007.
- BELLO, S. K. et al. Mitigating soil salinity stress with gypsum and bio-organic amendments: a review. **Agronomy**, v. 11, n. 9, p. 1735, 29, 2021.
- BLACK, A. S.; CAMPBELL, A. S. Ionic strength of soil solution and its effect on charge properties of some New Zealand soils. **Journal of Soil Science**, v. 33, n. 2, p. 249–262, 1982.
- CARNEIRO, C. E. A. et al. Calcário, potássio, fosfato e silício na produtividade do solo. **Acta Scientiarum. Agronomy**, v. 28, n. 4, p. 465–470, 2006.
- CARVALHO, A. A. et al. Coupling water resources and agricultural practices for sorghum in a semiarid environment. **Water**, v. 13, n. 16, 2021.
- CHAKMA, R. et al. Effects of silicon and organic manure on growth, fruit yield, and quality of grape tomato under water-deficit stress. **Silicon**, 2022.
- CHEN, D. et al. Silicon moderated the K deficiency by improving the plant-water status in sorghum. **Scientific Reports**, v. 6, n. 1, 2016.
- CUNHA, E. E.; LIMA, J. M. P. Caracterização de genótipos e estimativa de parâmetros genéticos de características produtivas de sorgo forrageiro. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v. 39, n. 4, p. 701–706, 2010.
- DHIMAN, P. et al. Fascinating role of silicon to combat salinity stress in plants: An updated overview. **Plant Physiology and Biochemistry**, v. 162, p. 110–123, 2021.
- EL-BAKI, G. A.; MOSTAFA, D. The potentiality of *Trichoderma harzianum* in alleviation the adverse effects of salinity in faba bean plants. **Acta Biologica Hungarica**, v. 65, n. 4, p. 451–468, 2014.
- EMBRAPA. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. Centro Nacional de Pesquisa de Solos: Rio de Janeiro, v. 3, 2013.
- FAZELI-NASAB, B. et al. *Trichoderma*: Improving growth and tolerance to biotic and abiotic stresses in plants. **Trends of Applied Microbiology for Sustainable Economy**, p. 525–564, 2022.
- FERNANDES, J. G. et al. Qualidade físico-química das águas utilizadas no Perímetro Irrigado Cachoeira II, Serra Talhada, Pernambuco. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias - Brazilian Journal of Agricultural Sciences**, v. 4, n. 1, p. 27–34, 3, 2009.
- FERREIRA-SILVA, S. L. et al. Changes in physiological indicators associated with salt tolerance in two contrasting cashew rootstocks. **Brazilian Journal of Plant Physiology**, v. 20, n. 1, p. 51–59, 2008.
- FITA, A. et al. Breeding and domesticating crops adapted to drought and salinity: a new paradigm for increasing food production. **Frontiers in Plant Science**, v. 6, 12, 2015.
- FREIRE, M. B. G. S. et al. Estimativa do risco de sodificação de solos de Pernambuco pelo uso de águas salinas. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 7, n. 2, p. 227–232, 2003.

- FREITAS, G. A. et al. Adubação orgânica no sulco de plantio e sua influência no desenvolvimento do sorgo. **Journal of Biotechnology and Biodiversity**, v. 3, n. 1, p. 61–67, 2012.
- GARDNER, W. K. Sodium, calcium and magnesium ratios in soils of NW Victoria, Australia may restrict root growth and crop production. **Journal of Plant Nutrition**, v. 39, n. 9, p. 1205–1215, 2016.
- GOLDBERG, N. et al. Short term effects of livestock manures on soil structure stability, runoff and soil erosion in semi-Arid soils under simulated rainfall. **Geosciences**, v. 10, n. 6, p. 213, 2020.
- GREGER, M.; LANDBERG, T.; VACULÍK, M. Silicon influences soil availability and accumulation of mineral nutrients in various plant species. **Plants**, v. 7, n. 2, p. 41, 2018.
- HARMAN, G. E. et al. Trichoderma species-opportunistic, avirulent plant symbionts. **Nature reviews microbiology**, v. 2, n. 1, p. 43–56, 2004.
- HERMOSA, R. et al. Plant-beneficial effects of Trichoderma and of its genes. **Microbiology**, v. 158, n. 1, p. 17–25, 2012.
- HURTADO, A. C. et al. Silicon attenuates sodium toxicity by improving nutritional efficiency in sorghum and sunflower plants. **Plant Physiology and Biochemistry**, v. 142, p. 224–233, 2019.
- HURTADO, A. et al. Different methods of silicon application attenuate salt stress in sorghum and sunflower by modifying the antioxidative defense mechanism. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, v. 203, 2020.
- HURTADO, A. C. et al. Silicon alleviates sodium toxicity in sorghum and sunflower plants by enhancing ionic homeostasis in roots and shoots and increasing dry matter accumulation. **Silicon**, v. 13, n. 2, p. 475–486, 2021.
- IKRAM, M. et al. *Trichoderma reesei* improved the nutrition status of wheat crop under salt stress. **Journal of Plant Interactions**, v. 14, n. 1, p. 590–602, 2019.
- IPA, Instituto Agrônomo de Pernambuco. Sorgo sudão: Sudan 4202. Cultivar tolerante a salinidade e com aptidão para feno (2007). Disponível online: <http://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/487334> (acesso em 03 de agosto de 2023).
- JARDIM, A. M. R. F. et al. Intercropping forage cactus and sorghum in a semi-arid environment improves biological efficiency and competitive ability through interspecific complementarity. **Journal of Arid Environments**, v. 188, 2021.
- KALOTERAKIS, N. et al. Silicon application and plant growth promoting rhizobacteria consisting of six pure *Bacillus* species alleviate salinity stress in cucumber (*Cucumis sativus* L.). **Scientia Horticulturae**, v. 288, 2021.
- KHAN, I. et al. Effects of silicon on heavy metal uptake at the soil-plant interphase: A review. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, v. 222, 2021.
- KHARE, T. et al. Individual and additive stress impacts of Na⁺ and Cl⁻ on proline metabolism and nitrosative responses in rice. **Plant Physiology and Biochemistry**, v. 152, p. 44–52, 2020.

- KONG, F. et al. Integrated usage of *Trichoderma harzianum* and biochar to ameliorate salt stress on spinach plants. **Archives of Agronomy and Soil Science**, p. 1–22, 2021.
- KUSUMAWATI, R. et al. Effect of *Trichoderma* Addition on Sargassum Organic Fertilizer. **IOP Conference Series: Earth and Environmental Science**, v. 715, n. 1, p. 012059, 2021.
- LAL, R. Soil organic matter and water retention. **Agronomy Journal**, v. 112, n. 5, p. 3265–3277, 2020.
- LEMO NETO, H. S. et al. Silicon Supplementation Induces Physiological and Biochemical Changes That Assist Lettuce Salinity Tolerance. **Silicon**, v. 13, n. 11, p. 4075–4089, 2021.
- LIU, B.; SOUNDARARAJAN, P.; MANIVANNAN, A. Mechanisms of silicon-mediated amelioration of salt stress in plants. **Plants**, v. 8, n. 9, 2019.
- MINHAS, P. S.; QADIR, M.; YADAV, R. K. Groundwater irrigation induced soil sodification and response options. **Agricultural Water Management**, v. 215, p. 74–85, 2019.
- NAVEED, M. et al. Alleviation of salinity-induced oxidative stress, improvement in growth, physiology and mineral nutrition of canola (*Brassica napus* L.) through calcium-fortified composted animal manure. **Sustainability (Switzerland)**, v. 12, n. 3, 2020.
- OLIVEIRA, L. B. DE et al. Produtividade, composição química e características agronômicas de diferentes forrageiras. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v. 39, n. 12, p. 2604–2610, 2010.
- PESSOA, L. G. M. et al. Assessment of soil salinity status under different land-use conditions in the semiarid region of Northeastern Brazil. **Ecological Indicators**, v. 141, 2022.
- PESSOA, L. G. MEDEIROS et al. Characterization and classification of halomorphic soils in the semiarid region of northeastern Brazil. **Journal of Agricultural Science**, v. 11, n. 4, p. 405, 2019.
- PRATIWI, V. et al. The potential of *Trichoderma* spp. and *Pseudomonas auregenosa* as patchouli waste decomposer. **IOP Conference Series: Earth and Environmental Science**, v. 667, n. 1, 2021.
- RAMÍREZ-JARAMILLO, G.; LOZANO-CONTRERAS, M. G.; RAMÍREZ-SILVA, J. H. Agroclimatic conditions for growing *Sorghum bicolor* L. Moench, under irrigation conditions in Mexico. **OALib**, v. 07, n. 06, p. 1–14, 2020.
- RAWAT, L. et al. Alleviation of the adverse effects of salinity stress in wheat (*Triticum aestivum* L.) by seed biopriming with salinity tolerant isolates of *Trichoderma harzianum*. **Plant and Soil**, v. 347, n. 1, p. 387–400, 2011.
- RIZWAN, M. et al. Mechanisms of silicon-mediated alleviation of drought and salt stress in plants: a review. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 22, n. 20, p. 15416–15431, 2015.
- RODRIGUES, A. C. F. et al. Classificação da precipitação pluviométrica anual para o município de Parnamirim – PE utilizando Índice de Anomalia de Chuva (IAC). **Revista Semiárido de Visu**, v. 7, n. 3, p. 275–284, 2019.
- RODRIGUES, C. R. et al. Produção, composição bromatológica e fenológica de forrageiras estivais na Região Sul do Brasil. **Agrarian**, v. 13, n. 47, p. 82–92, 2020.
- RODRIGUES, C. R. F. et al. High K⁺ supply avoids Na⁺ toxicity and improves photosynthesis by allowing favorable K⁺: Na⁺ ratios through the inhibition of Na⁺ uptake

and transport to the shoots of *Jatropha curcas* plants. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science**, v. 176, n. 2, p. 157–164, 2013.

SHARMA, B. L.; SINGH, S. P.; SHARMA, M. L. Bio-degradation of Crop Residues by *Trichoderma* Species vis-à-vis Nutrient Quality of the Prepared Compost. **Sugar Tech**, v. 14, n. 2, p. 174–180, 2012.

SHI, Y. et al. Silicon decreases chloride transport in rice (*Oryza sativa* L.) in saline conditions. **Journal of Plant Physiology**, v. 170, n. 9, p. 847–853, 2013.

SILVA, M. O. et al. Risco de salinização em quatro solos do Rio Grande do Norte sob irrigação com águas salinas. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias - Brazilian Journal of Agricultural Sciences**, v. 2, n. 1, p. 8–14, 2007.

SCHMILDT, E. R. et al. Avaliação de métodos de correção do estande para estimar a produtividade em milho. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 36, p. 1011-1018, 2001.

SOUSA, R. A. et al. Crescimento do sorgo em função da irrigação com água salobra e aplicação de compostos orgânicos. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, v. 12, n. 1, p. 2315–2326, 2018.

SOYLEMEZOGLU, G. et al. Effect of silicon on antioxidant and stomatal response of two grapevine (*Vitis vinifera* L.) rootstocks grown in boron toxic, saline and boron toxic-saline soil. **Scientia Horticulturae**, v. 123, n. 2, p. 240–246, 2009.

TUNA, A. L. et al. Silicon improves salinity tolerance in wheat plants. **Environmental and Experimental Botany**, v. 62, n. 1, p. 10–16, 2008.

USSL, U. S. S. L. S.-. **Diagnosis and Improvement of Saline and Alkali Soils**. U.S. Dept. of Agriculture, Washington, 1954

WALKER, D. J.; BERNAL, M. P. The effects of olive mill waste compost and poultry manure on the availability and plant uptake of nutrients in a highly saline soil. **Bioresource Technology**, v. 99, n. 2, p. 396–403, 2008.

WANG, L. et al. Application of organic amendments to a coastal saline soil in north China: effects on soil physical and chemical properties and tree growth. **PLoS ONE**, v. 9, n. 2, p. e89185, 18 fev. 2014.

WERLE, R.; GARCIA, R. A.; ROSOLEM, C. A. Lixiviação de potássio em função da textura e da disponibilidade do nutriente no solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, n. 6, p. 2297–2305, 2008.

WHALEN, J. K. et al. Cattle manure amendments can increase the pH of acid soils. **Soil Science Society of America Journal**, v. 64, n. 3, p. 962–966, 2000.

XIE, Z. et al. Silicon improves maize photosynthesis in saline-alkaline soils. **The Scientific World Journal**, v. 2015, p. 1–6, 2015.

XU, G. et al. Advances in chloride nutrition of plants. **Advances in agronomy**, v. 68, p. 97-150, 1999.

YANG, T. et al. Assessing salinity leaching efficiency in three soils by the HYDRUS-1D and -2D simulations. **Soil and Tillage Research**, v. 194, p. 104342, 2019.

YASMEEN, R.; SIDDIQUI, Z. S. Ameliorative effects of *Trichoderma harzianum* on monocot crops under hydroponic saline environment. **Acta Physiologiae Plantarum**, v. 40, n. 1, 2018.

YIN, L. et al. 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. et al. Silicon-mediated changes in polyamines participate in silicon-induced salt tolerance in *Sorghum bicolor* L. **Plant Cell and Environment**, v. 39, n. 2, p. 245–258, 2016.

YU, P. et al. Short-term land use conversions influence the profile distribution of soil salinity and sodicity in northeastern China. **Ecological Indicators**, v. 88, p. 79–87, 2018.

ZHANG, F. et al. *Trichoderma harzianum* mitigates salt stress in cucumber via multiple responses. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, v. 170, p. 436–445, 2019.

ZHANG, Y. et al. Short-term effects of biochar and gypsum on soil hydraulic properties and sodicity in a saline-alkali soil. **Pedosphere**, v. 30, n. 5, p. 694–702, 2020.

ZHANG, Y. et al. Self-regulated immobilization behavior of multiple heavy metals via zeolitization towards a novel hydrothermal technology for soil remediation. **Environmental Research**, v. 216, 2023.

ZIN, N. A.; BADALUDDIN, N. A. Biological functions of *Trichoderma* spp. for agriculture applications. **Annals of Agricultural Sciences**, v. 65, n. 2, p. 168–178, 2020.