



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO
PRÓ-REITORIA DE GRADUAÇÃO
DEPARTAMENTO DE CIÊNCIAS AGRONÔMICAS E FLORESTAIS
CURSO DE AGRONOMIA

MARCELO AUGUSTO COSTA LIMA

**POTENCIAL DO FUNGOS MICORRÍZICO ARBUSCULAR *Gigaspora albida* NA
MANUTENÇÃO DA HOMEOSTASE NUTRICIONAL FOLIAR DE MILHO
CRIOULO SOB ESTRESSE SALINO**

MOSSORÓ

2025

MARCELO AUGUSTO COSTA LIMA

**POTENCIAL DO FUNGOS MICORRÍZICO ARBUSCULAR *Gigaspora albida* NA
MANUTENÇÃO DA HOMEOSTASE NUTRICIONAL FOLIAR DE MILHO
CRIOULO SOB ESTRESSE SALINO**

Monografia apresentada a Universidade
Federal Rural do Semi-Árido como requisito
para obtenção do título de Bacharel em
Agronomia.

Orientador: Nildo da Silva Dias, Prof. Dr.

Coorientadora: Maria Valdiglêzia de Mesquita Arruda,
Prof. Dra.

MOSSORÓ

2025

©Todos os direitos estão reservados à Universidade Federal Rural do Semi-Árido. O conteúdo desta obra é de inteira responsabilidade do (a) autor (a), sendo o mesmo, passível de sanções administrativas ou penais, caso sejam infringidas as leis que regulamentam a Propriedade Intelectual, respectivamente, Patentes: Lei nº 9.279/1996, e Direitos Autorais: Lei nº 9.610/1998. O conteúdo desta obra tornar-se-á de domínio público após a data de defesa e homologação da sua respectiva ata, exceto as pesquisas que estejam vinculadas ao processo de patenteamento. Esta investigação será base literária para novas pesquisas, desde que a obra e seu (a) respectivo (a) autor (a) seja devidamente citado e mencionado os seus créditos bibliográficos.

C732p Costa Lima, Marcelo Augusto .
Potencial do fundo micorrizico do fungo micorrízico arbuscular Gigaspora albida na manutenção da homeostase nutricional foliar e milho crioulo sob estresse salino. / Marcelo Augusto Costa Lima. - 2025.
36 f. : il.

Orientador: Nildo da Silva Dias.
Coorientadora: Maria Valdiglêzia de Mesquita Arruda.
Monografia (graduação) - Universidade Federal Rural do Semi-árido, Curso de Agronomia, 2025.

1. Estresse Salino. 2. Nutrientes. 3. Seletividade Iônica. 4. Condutividade Elétrica. I. da Silva Dias, Nildo , orient. II. de Mesquita Arruda, Maria Valdiglêzia, co-orient. III. Título.

Ficha catalográfica elaborada por sistema gerador automático em conformidade com AACR2 e os dados fornecidos pelo(a) autor(a).
Biblioteca Campus Mossoró / Setor de Informação e Referência
Bibliotecária: Keina Cristina Santos Sousa e Silva
CRB: 15/120

O serviço de Geração Automática de Ficha Catalográfica para Trabalhos de Conclusão de Curso (TCC's) foi desenvolvido pelo Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação da Universidade de São Paulo (USP) e gentilmente cedido para o Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal Rural do Semi-Árido (SISBI-UFERSA), sendo customizado pela Superintendência de Tecnologia da Informação e Comunicação (SUTIC) sob orientação dos bibliotecários da instituição para ser adaptado às necessidades dos alunos dos Cursos de Graduação e Programas de Pós-Graduação da Universidade.

MARCELO AUGUSTO COSTA LIMA

Monografia apresentada a Universidade Federal Rural do Semi-Árido como requisito para obtenção do título de Bacharel em Agronomia.

Defendida em: 11 / 12 / 2025.

BANCA EXAMINADORA

Nildo da Silva Dias, Prof. Dr. (UFERSA)
Presidente

Maria Valdiglêzia de Mesquita Arruda, Pesquisadora Dra. (CNPq)
Coorientadora

Luiria Bento Ramalho, Me. (UFERSA)
Membro Examinador

Micharlyson Carlos de Moraes, Me.
Membro Examinador

AGRADECIMENTOS

Gostaria de expressar minha profunda gratidão a Deus por me dá a força e sabedoria necessárias para superar os desafios ao longo dessa jornada acadêmica.

À minha família, pelo apoio incondicional, compreensão nos momentos de dedicação exclusiva aos estudos e por sempre acreditarem no meu potencial. Em especial, aos meus pais José Augusto (Oliveira) e Maria Dalvaci (Dalva), aos meus irmãos Mayrla, Marília, Marcos, Andrea e Alexsandra, cujo incentivo foi fundamental para minha perseverança.

Um agradecimento especial à minha querida amiga Mércia, companheira de graduação e de tantas lutas acadêmicas. Sua amizade foi meu porto seguro nos momentos mais desafiadores desta jornada. Pelos cafés compartilhados entre uma aula e outra, pelas palavras de incentivo nos dias de desânimo, pela paciência em revisar conteúdos e, principalmente, por acreditar em mim mesmo quando eu duvidava. Você foi mais que uma colega de curso – foi uma irmã nessa caminhada. Obrigado por tornar essa trajetória não apenas possível, mas também memorável.

Ao meu orientador, Nildo da Silva Dias e minha coorientadora Maria Valdigleza de Mesquita Arruda, pela paciência.

À Banca Examinadora, Luiria Bento Ramalho e Micharlyson Carlos de Moraes, pela disponibilidade em avaliar este trabalho e pelas valiosas contribuições que certamente enriquecerão minha trajetória acadêmica.

Aos técnicos/as do LASAP.

Aos meus amigos, Maria Juliana, Clara, José Venizio, Marcos Gois, Josiele, Erasmo, Jeferson, Kaio Israel, pelo apoio incondicional, pelos momentos de descontração que aliviaram o estresse e por estarem presentes nessa jornada.

Por fim, a todas as pessoas que de forma direta ou indireta, contribuíram para a realização deste trabalho.

RESUMO

No semiárido, as condições climáticas são caracterizadas por baixos índices pluviométricos, chuvas irregulares e altas taxas de evaporação, fatores que resultam em balanço hídrico negativo e impõem constantes desafios para a agricultura. A escassez hídrica força os produtores a utilizarem água salina de poços subterrâneos para irrigação. Nesse sentido, este estudo teve como objetivo investigar os efeitos do fungo micorrízico arbuscular *Gigaspora albida* sobre os teores foliares e as interações iônicas de cálcio (Ca^{2+}), magnésio (Mg^{2+}), sódio (Na^+) e potássio (K^+) em plantas de milho submetidas a diferentes níveis de salinidade da água de irrigação. O estudo foi conduzido em casa de vegetação, em esquema fatorial 3×4 , combinando três condições de cultivo: M1 – plantas cultivadas em solo autoclavado; M2 – plantas cultivadas em solo autoclavado e inoculadas com o FMA *Gigaspora albida*; e M3 – plantas cultivadas com *G. albida* e com a microbiota original do solo, com quatro níveis salinos (CEa) de 0,5; 1,8; 3,1 e 4,4 dS m^{-1} , e seis repetições. Ao final do ciclo fenológico, foram determinados os teores foliares de Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ e Na^+ . Os dados foram submetidos à análise de variância (Anova), e as médias foram comparadas pelo teste de Scott-Knott a 5% de probabilidade ($p < 0,05$). Os resultados mostraram que a salinidade da água de irrigação influenciou de forma diferenciada os teores e as relações iônicas de Ca^{2+} , Mg^{2+} e Na^+ , assim como as razões entre esses elementos (Na/K, Na/Mg, Na/Ca e Ca/Mg) nas folhas das plantas submetidas aos tratamentos M1, M2 e M3. De modo geral, constatou-se que a resposta à salinidade variou conforme as condições específicas de manejo adotadas em cada tratamento. A salinidade da água de irrigação influenciou os teores e as relações iônicas de Na^+ , Ca^{2+} e Mg^{2+} nas folhas de milho crioulo aos 95 dias de cultivo. Os níveis de sódio foliar nas plantas sob efeito fúngico (M2 e M3) foram menos acentuados em níveis mais baixos (1,4 e 0,7 dS m^{-1}). O acúmulo de K^+ , Ca^{2+} e Mg^{2+} foliar aumentou em função dos níveis salinos. As plantas de milho sob efeito de *G. albida* e da microbiota do solo favoreceram a manutenção nutricional de potássio, cálcio e magnésio até o final do ciclo da cultura. As plantas de milho cultivadas em níveis intermediários de salinidade mantiveram melhor capacidade de homeostase na manutenção das relações Na/K, Ca/Mg e Na/Mg, com destaque para as condições de M2.

Palavras-chave: Estresse Salino. Nutrientes. Seletividade Iônica. Condutividade Elétrica.

ABSTRACT

The semiarid regions are characterized by low rainfall rates, irregular precipitation, and high evaporation rates factors that result in a negative water balance and impose constant challenges to agriculture. In this context, this study aimed to investigate the effects of the arbuscular mycorrhizal fungus *Gigaspora albida* on foliar contents and ionic interactions of Ca^{2+} , Mg^{2+} , and Na^+ in maize plants subjected to different salinity levels. The study was conducted in a greenhouse under a 3x4 factorial design, combining three cultivation conditions: M1 – plants grown in autoclaved soil; M2 – plants grown in autoclaved soil and inoculated with the AMF *Gigaspora albida*; and M3 – plants grown with *G. albida* and the original soil microbiota, with four salinity levels (ECw) of 0.5, 1.8, 3.1, and 4.4 dS m^{-1} , and six replications. At the end of the phenological cycle, the contents of Ca^{2+} , Mg^{2+} , and Na^+ were determined. Based on the data obtained, it was concluded that the salinity of the irrigation water differently influenced the contents and ionic relationships of calcium (Ca^{2+}), magnesium (Mg^{2+}), and sodium (Na^+), as well as the ratios among these elements (Na/K, Na/Mg, Na/Ca, and Ca/Mg) in the leaves of plants subjected to treatments M1, M2, and M3.

In general, it was found that the response to salinity varied according to the specific management conditions adopted in each treatment. The salinity of the irrigation water influenced the contents and ionic ratios of Na^+ , Ca^{2+} , and Mg^{2+} in the leaves of creole maize plants at 95 days of cultivation. Foliar sodium levels in plants under fungal influence (M2 and M3) were less pronounced at lower levels (1.4 and 0.7 dS m^{-1}). The accumulation of foliar potassium, calcium, and magnesium increased as a function of salinity levels. The accumulation of foliar potassium, calcium, and magnesium increased as a function of salinity levels. Maize plants under the influence of *G. albida* and soil microbiota favored the nutritional maintenance of potassium, calcium, and magnesium under high salinity conditions (4.4 dS m^{-1}) until the end of the crop cycle. Maize plants cultivated under intermediate salinity levels maintained a better homeostatic capacity in the regulation of Na/K, Ca/Mg, and Na/Mg ratios, with greater prominence under M2 conditions.

Keywords: Salt Stress. Nutrients. Ionic Selectivity. Electrical Conductivity.

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1 – Teores de sódio (A), potássio (B) cálcio (C) e magnésio na folha de milho crioulo em função da CE_a ($dS\ m^{-1}$) e condição micorrízica (● M1- plantas testemunha sem inóculo fúngico, ■ M2- plantas com inóculo fúngico de *G. albida*, ▲ M3 plantas com inóculo fúngico de *G. albida*, mais a microbiota do solo). DP, n =3. Letras minúsculas semelhantes na coluna (FMA) não diferem estatisticamente pelo Teste Scott-Knott ($p<0.05$).....19
- Figura 2 – Relação de sódio e potássio (A), relação de sódio e magnésio (B) e relação de cálcio e magnésio (C) em folhas de milho crioulo cultivado em função da CE_a ($dS\ m^{-1}$) e condição micorrízica (● M1- plantas testemunha sem inóculo fúngico, ■ M2- plantas com inóculo fúngico de *G. albida*, ▲ M3 plantas com inóculo fúngico de *G. albida*, mais a microbiota do solo). DP, n =3. Letras minúsculas semelhantes na coluna (FMA) não diferem estatisticamente pelo Teste Scott-Knott ($p<0.05$)..... 23

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	–	Resumo da análise de variância para teor de sódio (Na^+), potássio (K^+), cálcio (Ca) e magnésio (Mg) na folha de plantas de milho crioulo em função da CE_a do rejeito salino e influência de FMA.....	18
Tabela 2	–	Análise de variância para relação sódio e potássio (Na/K), sódio e magnésio (Na/Mg), sódio e cálcio (Na/Ca) e relação cálcio e magnésio (Ca/Mg) em folhas de milho crioulo, cultivado em função da CE_a do rejeito salino e influência de FMA.....	22

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

FMA	Fungos Micorrízicos Arbusculares
CE	Condutividade Elétrica
ROS	Espécies Reativas De Oxigênio
SOD	Superóxido Dismutase
CAT	Catalase
ABA	Ácido Abscísico

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	10
2 REFERENCIAL TEORICO.....	12
2.1 A cultura do milho	12
2.2 Efeito da salinidade nas culturas	12
2.3 Micorrizas	14
2.4 Nutrição x Salinidade x Micorrizas	Erro! Indicador não definido. 5
3 MATERIAL E MÉTODOS	Erro! Indicador não definido. 7
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	Erro! Indicador não definido. 8
5 CONCLUSÃO.....	26
REFERÊNCIAS	27

1 INTRODUÇÃO

A agricultura é uma atividade essencial para a manutenção da segurança alimentar, sendo está uma prática condicionada às características ambientais e edafoclimáticas. Nesse contexto, o semiárido, enfrentam grandes desafios, devido aos baixos índices pluviométricos, chuvas irregulares e altas taxas de evaporação, o que resulta em baixa de disponibilidade hídrica (Uchoa, 2022). Como consequência, culturas tradicionais de sequeiro, como feijão, mandioca e milho, que são a base da segurança alimentar regional, sofrem perdas significativas de produtividade, agravando os desafios socioeconômicos das populações locais (Tanure *et al.*, 2024).

O cenário global de escassez hídrica torna ainda mais urgente a busca por soluções inovadoras. Segundo estimativas da Organização das Nações Unidas (ONU, 2022), a população mundial deverá atingir 9,7 bilhões até 2050, aumentando exponencialmente a demanda por água e energia. No semiáridas, onde os recursos hídricos já são limitados, essa pressão exige a adoção de estratégias alternativas para garantir a sustentabilidade agrícola. Diante da limitação das fontes de água doce, o aproveitamento de águas salobras ou salinas tem se mostrado uma alternativa viável, principalmente para a irrigação de culturas agrícolas (Arruda *et al.*, 2025).

Nesse cenário, muitas pesquisas têm estudado a viabilidade de fontes não convencionais, como efluentes de esgoto tratados, efluentes da piscicultura e salmouras residuais de dessalinização, como alternativas promissoras para reduzir a dependência de água doce (Arruda *et al.*, 2025; Cavalcante *et al.*, 2025). No entanto, o uso dessas fontes hídricas não está isento de desafios necessitando de manejo cuidadoso para evitar problemas com o estresse salino (Soni *et al.*, 2021).

Estudos recentes demonstram que a salinidade excessiva pode reduzir a produtividade agrícola em até 50%, dependendo da cultura e das condições edafoclimáticas (Ma *et al.*, 2023; Ahmed *et al.*, 2024). Todavia, a utilização de água com elevados teores de sais impõe riscos à qualidade do solo, à produtividade das plantas e à sustentabilidade dos sistemas agrícolas, sendo necessário compreender os efeitos da salinidade e adotar práticas que minimizem seus impactos negativos.

A presença de sais provoca diversas modificações no metabolismo celular, sendo o fechamento dos estômatos uma das primeiras respostas à deficiência hídrica. Essa reação limita as trocas gasosas e, conseqüentemente, reduz a atividade fotossintética. (Santos *et al.*, 2020). O acúmulo dos íons Na^+ e Cl^- , além de provocar desequilíbrio nutricional, também pode causar citotoxicidade nos tecidos (Sá *et al.*, 2021; Balasubramaniam *et al.*, 2023;), interfere

diretamente nas vias metabólicas, fisiológicas e bioquímicas (Shahid *et al.*, 2020), além de provocar um desequilíbrio redox.

Nesse contexto, o uso de atenuadores dos efeitos deletérios do estresse hídrico, como corretivos químicos (por exemplo, gesso agrícola), condicionadores de solo a base de microrganismos presentes na natureza como os fungos micorrízicos e escolha de espécies vegetais tolerantes ao sal, torna-se essencial para viabilizar o uso da água salina de forma segura e eficiente, visando contribuir significativamente para a convivência produtiva com a seca e para a sustentabilidade da agricultura em ambientes semiáridos (Bello *et al.*, 2021; Azeem *et al.*, 2025).

A associação entre plantas e fungos micorrízicos arbusculares (FMA) constitui uma estratégia eficiente para mitigar os efeitos do estresse salino, destacando-se espécies do gênero *Gigaspora* pela elevada capacidade de exploração do solo e transferência de nutrientes (Parvin *et al.*, 2020). Nesse gênero, a espécie *Gigaspora albida* se destaca por ser um fungo micorrízico arbuscular eficiente na colonização das raízes e na formação de hifas que ampliam a absorção de nutrientes, especialmente fósforo e potássio (Klinsukon *et al.*, 2021). Essa espécie ajuda as plantas a tolerarem a salinidade ao reduzir a toxidez do sódio, estimular a produção de osmoprotetores e antioxidantes e melhorar a estrutura do solo por meio da glomalina (Liu *et al.*, 2022). Como resultado, plantas associadas a *G. albida* apresentam maior resistência ao estresse salino e melhor crescimento.

Dessa forma, estudos tem investido em estratégias que viabilize o uso de água salina na irrigação sem comprometer a qualidade das culturas, utilizando associações simbióticas de plantas com FMAs, como forma de atenuar os efeitos da salinidade nas culturas (Arruda *et al.*, 2025).

Levando-se em consideração esses aspectos, este estudo teve como finalidade investigar os efeitos do fungo micorrízico arbuscular *Gigaspora albida* sobre os teores foliares e as interações iônicas de Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ e Na^+ em plantas de milho submetidas a diferentes níveis de salinidade da água de irrigação.

2 REFERENCIAL TEORICO

2.1 Aspectos gerais da cultura do milho crioulo

O milho (*Zea mays* L.) é uma das culturas agrícolas mais relevantes do mundo, desempenhando um papel crucial na segurança alimentar, na produção de ração animal e, mais recentemente, no setor de bioenergia. No Brasil, o milho destaca-se como um dos grãos mais produzidos, impulsionando a economia nacional e consolidando o país como um dos maiores exportadores globais (Erenstein *et al.*, 2022).

Segundo a Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB, 2024), a safra brasileira de milho no período 2023/2024 ultrapassou as 100 milhões de toneladas, o que reforça a importância estratégica desse cultivo. Além disso, o cereal é utilizado em diversas cadeias produtivas, desde a alimentação humana até a indústria de biocombustíveis, como no caso do etanol de milho, cuja produção tem se expandido no mercado nacional (Pereira Filho e Borghi, 2022). Acho que pode direcionar os dados para o milho crioulo – para a agricultura familiar.

No Brasil, a expansão da cultura do milho foi possível devido ao seu elevado potencial produtivo e à adaptabilidade fisiológica da planta (Couto *et al.*, 2023; Maranhão *et al.*, 2024). A diversidade genética observada é resultado de um longo processo de domesticação iniciado por povos da América Central, e ampliado por indígenas, agricultores familiares e instituições de pesquisa no Brasil (Rivas *et al.*, 2023).

O milho crioulo possui grande importância na agricultura familiar por representar um elemento fundamental na preservação da biodiversidade agrícola, na autonomia dos agricultores e na sustentabilidade dos sistemas produtivos (Avila *et al.*, 2024). Essas variedades tradicionais, mantidas e selecionadas ao longo de gerações, apresentam elevada adaptação às condições locais de solo e clima, garantindo maior estabilidade produtiva mesmo em ambientes adversos. Além disso, por serem sementes próprias, reduzem a dependência de insumos externos e fortalecem a soberania alimentar das famílias rurais (Janzen *et al.*, 2022).

O milho crioulo também tem destacado valor cultural e nutricional, mantendo tradições alimentares e contribuindo para a diversificação das dietas. Associado frequentemente a práticas agroecológicas, seu cultivo favorece a conservação ambiental, o manejo sustentável dos recursos naturais e o fortalecimento das comunidades rurais por meio da troca de saberes e sementes entre agricultores (Avila *et al.*, 2024).

2.2 Efeito da salinidade sobre as plantas

Após a seca, a salinidade representa um dos principais entraves à produtividade agrícola, especialmente em zonas áridas e semiáridas, sendo um problema mundial que pode ameaçar a segurança alimentar. A presença de sais afeta diretamente o solo, alterando suas propriedades físico-químicas e comprometendo sua capacidade de sustentar o crescimento vegetal (Demo *et al.*, 2025). Nas plantas, os efeitos negativos se manifestam por meio de alterações fisiológicas como desequilíbrio iônico, variações no potencial hídrico, deficiências nutricionais, fechamento dos estômatos, redução da fotossíntese e prejuízo na alocação de assimilados (Arruda *et al.*, 2025).

Em regiões onde a irrigação é intensiva, como o semiárido brasileiro, o acúmulo de sais nos solos irrigados tem se tornado uma preocupação crescente. O uso de águas salinas na agricultura surge como alternativa diante da escassez hídrica, porém, apresenta desafios, dada a ampla variabilidade na qualidade dessas águas tanto ao longo do ano quanto entre regiões (Lessa *et al.*, 2023).

A elevada concentração de sais pode provocar perda de água pelas plantas para o ambiente e induzir toxidez, interferindo diretamente em seu desenvolvimento. Esses efeitos refletem-se em distúrbios fisiológicos e bioquímicos, comprometendo funções como respiração, fotossíntese, síntese proteica e metabolismo lipídico (HAMEED *et al.*, 2021).

O estresse salino provoca uma diminuição no potencial osmótico, resultando em perturbações nas relações hídricas das plantas. Tal condição causa mudanças na assimilação e utilização de nutrientes fundamentais (SHAHID *et al.*, 2020), bem como em funções fisiológicas, o que acarreta o fechamento parcial dos estômatos. Consequentemente, a assimilação de CO₂ é limitada e a fotossíntese é reduzida, impactando negativamente a produtividade das culturas (Rodrigues *et al.*, 2020).

O milho é classificado como moderadamente sensível à salinidade da água, com limiar de tolerância em torno de 1,7 dS m⁻¹ no solo (Bem-Asher *et al.*, 2021). Abaixo desse valor, o desenvolvimento da planta não é prejudicado, mesmo em condições de estresse salino. Contudo, estudos realizados no semiárido brasileiro apontam que valores de condutividade elétrica superiores a esse limiar resultam em perdas significativas na produção, como demonstrado por Rodrigues *et al.* (2020), que observaram reduções em componentes como a massa de espigas e de grãos quando submetidos a águas com CE acima de 2,0 dS m⁻¹.

Para mitigar esses efeitos, diferentes práticas de manejo têm sido adotadas. Estratégias tradicionais, como a aplicação de matéria orgânica e o uso de coberturas vegetais, auxiliam na redução do impacto dos sais no solo (Wang *et al.*, 2023; Li *et al.*, 2025).

Além disso, avanços no melhoramento genético, incluindo a seleção de genótipos tolerantes (Atta *et al.*, 2023), uso de técnicas modernas como a edição gênica (Shen e Hao *et al.*, 2025), têm contribuído significativamente para o desenvolvimento de cultivares mais adaptadas a ambientes salinos. Outras tecnologias inovadoras, como sensores para monitoramento da salinidade do solo, o uso de nanopartículas com função protetora, e uso de atenuadores biológicos, como uso de bactéria promotoras do crescimento, associações simbióticas com fungos micorrízicos, representam novas alternativas no enfrentamento desse desafio (Corwin, 2021; Arruda *et al.*, 2025).

Nesse contexto, a avaliação da qualidade da água para irrigação torna-se essencial, sobretudo em regiões onde o regime de chuvas é insuficiente e a irrigação com águas de menor qualidade se torna necessária (Holanda *et al.*, 2016; Araújo *et al.*, 2025).

2.3 Fungos Micorrizas como atenuador do estresse salino

As micorrizas, associações simbióticas entre fungos do solo e raízes de plantas, representam uma das interações biológicas mais importantes para a sustentabilidade dos ecossistemas terrestres. Essas associações mutualísticas formada com a maioria das plantas terrestres, contribuem para a absorção de nutrientes, para a estruturação do solo, para o desenvolvimento vegetal e o equilíbrio dos ecossistemas (Reddy *et al.*, 2024).

Diante da crescente escassez de água doce, torna-se cada vez mais necessário desenvolver estratégias que possibilitem o uso de água salina na irrigação sem comprometer o desenvolvimento e a qualidade das culturas (Toumi *et al.*, 2024). A importância da associação simbiótica entre plantas e fungos micorrízicos arbusculares (FMAs), é reconhecida por minimizar os efeitos do estresse salino. A micorriza arbuscular representa uma das interações mutualísticas mais relevantes, favorecendo não apenas a absorção de água e nutrientes, mas também influenciando positivamente diversos processos fisiológicos como fotossíntese, atividade enzimática, respiração e metabolismo, resultando em maior resistência das plantas a estresses ambientais e patógenos (Etesami *et al.*, 2022).

Além da melhoria na nutrição vegetal, os FMAs desempenham papel essencial na adaptação das plantas ao estresse salino por meio de mecanismos como aumento da

condutividade hidráulica das raízes, manutenção do equilíbrio osmótico e alteração na composição de carboidratos. Tais adaptações resultam em crescimento vegetal mais vigoroso e maior tolerância à presença de íons tóxicos (Boorboori *et al.* 2024; Dad *et al.*, 2025). De acordo com Dastogeer *et al.* (2020), os fungos também ativam enzimas antioxidantes que reduzem os danos causados pelas espécies reativas de oxigênio (ROS), além de regularem os níveis hormonais e promoverem o acúmulo de prolina, importante osmólito relacionado à tolerância salina.

A associação micorrízica ainda contribui significativamente para a melhoria dos atributos físicos e químicos do solo. A liberação de glomalina, uma glicoproteína produzida pelos FMAs, atua melhorando a estabilidade e agregação do solo, favorecendo a disponibilidade de nutrientes e reduzindo perdas por lixiviação (Silva *et al.*, 2022; Barbosa *et al.*, 2019). Isso amplia a área efetiva de absorção, aumentando a eficiência do sistema radicular.

A funcionalidade dos FMAs pode variar conforme a espécie fúngica e o ambiente em que estão inseridos. Essa diversidade funcional influencia diretamente o desempenho vegetal e pode ser expressa por diferentes graus de colonização, absorção de nutrientes e estímulo ao crescimento (Umer *et al.*, 2025). Estudos têm buscado compreender se as plantas são capazes de selecionar fungos mais eficientes ou combinações complementares entre eles. Para isso, a inoculação com misturas de FMAs tem sido explorada como uma forma de simular comunidades naturais e avaliar seu impacto sobre o desenvolvimento vegetal (Wu *et al.*, 2024).

Apesar das evidências dos benefícios dos FMAs em ambientes salinos, a salinidade pode afetar negativamente a estrutura e o funcionamento da simbiose, reduzindo a colonização das raízes em presença de sais, especialmente cloreto de sódio (Xu *et al.*, 2024). Ainda assim, essa associação se mantém como uma estratégia promissora para a agricultura em áreas afetadas por estresse salino, dada sua capacidade de melhorar a absorção de nutrientes, manter o equilíbrio iônico e proteger a atividade enzimática essencial para o metabolismo vegetal (Khaliq *et al.*, 2022). A relação entre nutrição mineral, salinidade e fungos micorrízicos tem ganhado destaque na fisiologia vegetal e na agricultura contemporânea, especialmente em regiões sujeitas ao estresse salino. As associações simbióticas entre fungos do solo e raízes de plantas, exercem papel fundamental na melhoria da nutrição vegetal e na tolerância a ambientes adversos, como aqueles com altos teores de sais (Khaliq *et al.*, 2022).

O excesso de sais no solo, particularmente os íons sódio (Na^+) e cloreto (Cl^-), reduz a biodisponibilidade de nutrientes essenciais como potássio (K^+) e cálcio (Ca^{2+}), comprometendo o desenvolvimento das plantas (Dastogeer *et al.*, 2020). Além disso, a concentração elevada

desses íons pode causar toxicidade iônica, interferindo no balanço osmótico e gerando danos celulares. A salinidade também estimula a formação de espécies reativas de oxigênio (EROs), provocando estresse oxidativo e afetando negativamente o metabolismo das plantas (Wahab *et al.*, 2023).

Os fungos micorrízicos arbusculares (FMAs) otimizam a absorção de nutrientes como fósforo, nitrogênio, potássio e zinco, mesmo em condições de salinidade elevada (Pooja *et al.*, 2025). Além disso, auxiliam na regulação dos níveis de íons, promovendo a exclusão de Na^+ e facilitando a absorção de K^+ , o que contribui para o equilíbrio iônico nas células (Klinsukon *et al.*, 2021; Wang *et al.*, 2025). As micorrizas também favorecem o sistema antioxidante da planta por meio da ativação de enzimas como SOD e CAT e do acúmulo de compostos osmoprotetores, como a prolina e a glicina betaína (Heydari & Pirzad, 2020; Dar *et al.*, 2023).

A presença de FMAs em plantas cultivadas sob salinidade pode melhorar a eficiência do uso de nutrientes, atuando de maneira sinérgica com o manejo nutricional (Ma *et al.*, 2022). Essas associações também influenciam a síntese de fitormônios, como o ácido abscísico (ABA) e as auxinas, os quais regulam respostas adaptativas ao estresse salino (Gupta *et al.*, 2020). Além disso, as hifas fúngicas favorecem a agregação das partículas do solo, o que melhora sua estrutura e reduz a concentração de sais nas zonas radiculares (Diagne *et al.*, 2020).

3 MATERIAL E MÉTODOS

A pesquisa foi conduzida na Universidade Federal Rural do Semi-Árido (UFERSA), localizada em Mossoró, no estado do Rio Grande do Norte (5°12'2.03" S e 37°19'36.32" O). O experimento foi realizado em casa de vegetação no período de abril a junho de 2025 em ambiente protegido com 126 m², com pé direito de 4,0 metros de altura, estrutura metálica, cobertura de plástico transparente e laterais compostas por tela de sombreamento (sombrite) com 50% de retenção de luz.

Foi utilizado o delineamento inteiramente casualizado, em esquema fatorial 3 × 4, com seis repetições, totalizando 72 unidades experimentais. Os tratamentos consistiram em três condições micorrízicas: M1 – plantas controle, em solo autoclavado, sem inoculação fúngica; M2 – plantas inoculadas com *G. albida* em solo autoclavado; e M3 – plantas inoculadas com *G. albida* associada à microbiota do solo. Essas condições foram dispostas em conjunto com quatro níveis de condutividade elétrica da água de irrigação (CEa): 0,5 – controle; 1,8; 3,1; e 4,4 dS m⁻¹. As diferentes salinidades da água de irrigação foram obtidas por meio da diluição

do rejeito salino proveniente de sistema de osmose reversa com água de abastecimento fornecida pela Companhia de Águas e Esgotos do Rio Grande do Norte (CAERN).

O solo utilizado é de textura arenosa, coletado na camada superficial (0–30 cm de profundidade) da Fazenda Experimental Rafael Fernandes, pertencente à UFRSA, situada na zona rural do município de Mossoró/RN. A coleta do rejeito salino ocorreu na estação de tratamento de água do Assentamento Rural Jurema, situado às margens da rodovia RN-012, que conecta os municípios de Mossoró e Tibau, no estado do Rio Grande do Norte.

As sementes de milho crioulo da variedade Ibra, colhidas na safra de 2021 no município de Umarizal, passaram por um processo de esterilização antes da semeadura. O processo deu-se a partir da imersão em uma solução de hipoclorito de sódio a 5% (v/v) por cinco minutos, seguida de lavagem com água destilada. Cada vaso foi semeado com seis sementes, e o desbaste realizado uma semana após a emergência das plântulas, mantendo-se duas plantas por vaso.

A irrigação foi realizada diariamente para manter a umidade do solo próxima à capacidade de campo. A aplicação de água salina iniciou 20 dias após o desbaste, com o ajuste da condutividade elétrica (CEa), conforme o nível estabelecido para cada tratamento. O estresse salino foi induzido de forma gradual, até alcançar a concentração desejada, sendo monitorado diariamente com o auxílio de um condutivímetro portátil. As lâminas diárias de irrigação foram calculadas em lisimetria de drenagem, levando em consideração a diferença entre o volume de água aplicado e o volume drenado, dividida pelo número de vasos.

O material analisado da folha, foi coletado aos 95 dias, final de maturação dos grãos. O material foi desidratado em estufa de circulação forçada de ar a 70 °C, até a obtenção do peso constante. Em seguida, triturado, identificado e armazenado em sacos plásticos para serem analisados.

A determinação do íon Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} na folha foi realizada por meio de digestão seca de 0,5g de biomassa seca em solução nítrica (ácido nítrico e HCL 1 mol). Da solução ácida, foram determinados Na^+ e K^+ , por espectrofotometria de chama.

Os teores de Ca^{2+} e Mg^{2+} , foram determinados por meio da espectrofotometria de absorção atômica (EAA). Para Ca^{2+} e Mg^{2+} , foi pipetado 1 ml da solução ácida e 4 ml de solução de lantânio e em seguida será realizada a leitura no equipamento.

Os dados foram submetidos à análise de variância (Anova), e as médias foram comparadas pelo teste de Scott-Knott a 5% de probabilidade ($p < 0,05$).

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

De acordo com a ANOVA, registraram-se diferenças significativas ($p < 0,001$) para todos os fatores de variação de forma isolada e combinado (Tabela 1).

Tabela 1. Resumo da análise de variância para teor de sódio (Na^+), potássio (K^+), cálcio (Ca^{2+}) e magnésio (Mg^{2+}) na folha de plantas de milho crioulo em função da CE_a do rejeito salino e influência de FMA.

FV	GL	Teste F			
		Na^+	K^+	Ca^{2+}	Mg^{2+}
SAL	3	190.685***	60.173***	24.106***	19.100***
CM	2	22.525***	14.908***	8.690***	64.494***
SAL x CM	6	25.684***	7.765***	9.813***	11.435***

FV- Fonte de variação, GL- Graus de liberdade, FMA- Fungo micorrízico arbuscular, (CE_a) – Condutividade elétrica da água de irrigação, ***Significativo ao nível de probabilidade de 0,1% ($p < 0,001$); ** Significativo ao nível de probabilidade de 1% ($p < 0,01$) * Significativo ao nível de probabilidade de 5% ($p < 0,05$).

O acúmulo de sódio (Na^+) nas folhas, é um dos principais fatores que limitam o crescimento e a produtividade das plantas em solos salino (Calone *et al.*, 2020).

Para o teor de sódio foliar, nota-se padrão de comportamento quadrático em todos os tratamentos micorrizos. Para as plantas M1, a menor concentração de sódio ocorreu no nível $2,3 \text{ dS m}^{-1}$, correspondendo a uma redução de 61,31 e 68,7 % em relação níveis salinos 0,5 e $4,4 \text{ dS m}^{-1}$ respectivamente (Figura 1A). Em M2 e M3 os menores acúmulos observados foram nos níveis mais baixos, 1,4 e $0,7 \text{ dS m}^{-1}$ respectivamente, enquanto as maiores concentrações observadas, 2,3 e 2,9 g kg, coincidiram com o nível mais alto de salinidade, um acúmulo de 412 e 382% em relação aos níveis de menor acúmulo (Figura 1A).

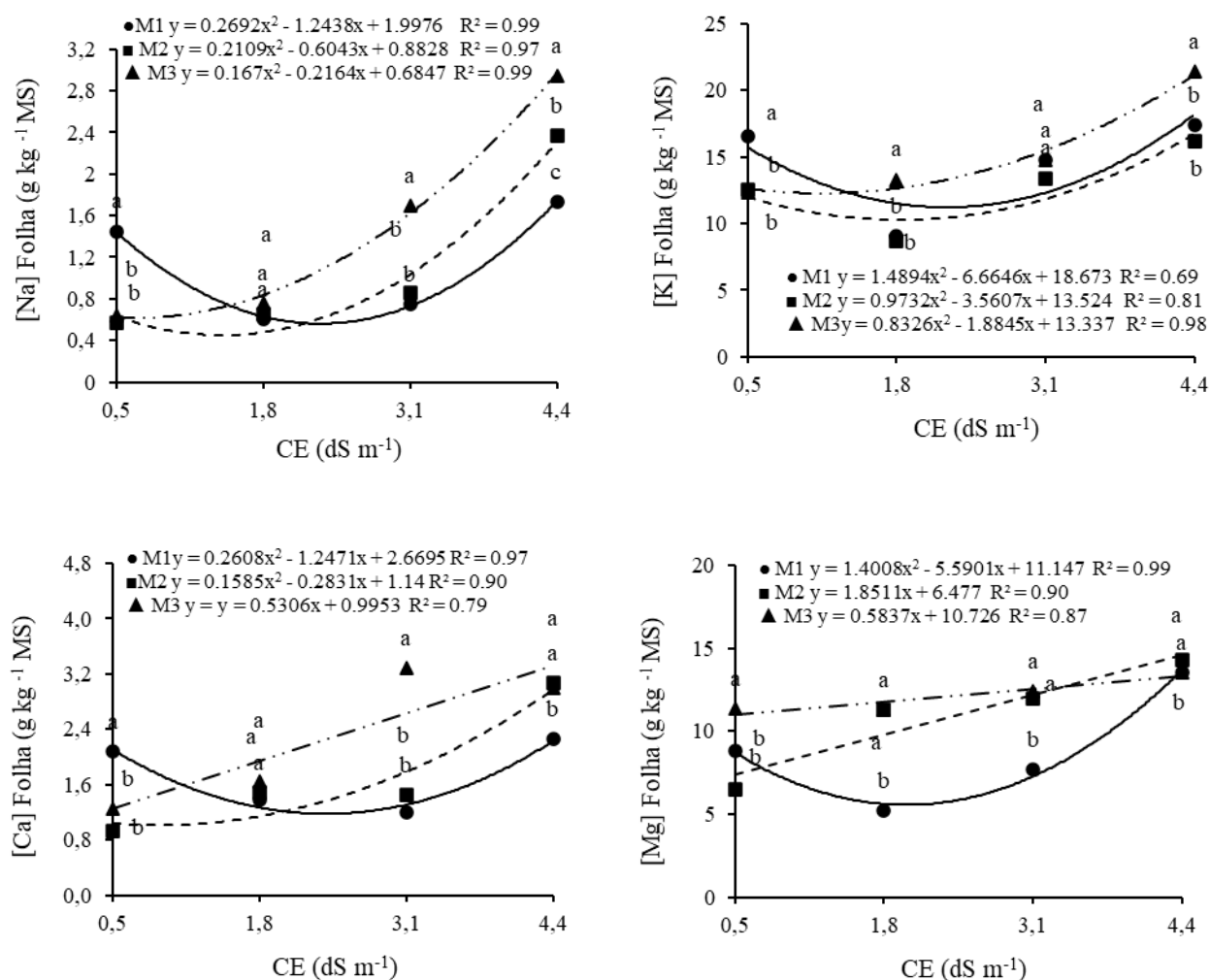


Figura 1. Teores de sódio (A), potássio (B) cálcio (C) e magnésio na folha de milho crioulo em função da CE_a (dS m⁻¹) e condição micorrízica (● M1- plantas testemunha sem inóculo fúngico, ■ M2- plantas com inóculo fúngico de *G. albida*, ▲ M3 plantas com inóculo fúngico de *G. albida*, mais a microbiota do solo). DP, n =3. Letras minúsculas semelhantes na coluna (FMA) não diferem estatisticamente pelo Teste Scott-Knott (p<0.05).

Comparando entre os tratamentos micorrízicos no menor nível de salinidade, as plantas de M1 (testemunha) apresentaram maior concentração de sódio foliar em relação a M2 e M3, uma diferença de 0,88 e 0,81 g kg MS. No entanto, nos níveis mais elevados (3.1 e 4.4 dS m⁻¹) os tratamentos de M3, acumularam mais sódio no tecido foliar, expressando aumento de 163,4 e 356,1% respectivamente em relação a testemunha (Figura 1A).

Os teores de potássio aumentaram em função dos níveis salinos. Houve comportamento quadrático em todos os tratamentos micorrízicos. Em M1, a concentração de potássio na folha,

reduziu inicialmente registrando o menor teor, 28.59%, em 2,2 dS m⁻¹. A partir desse ponto a concentração aumentou chegando a, 17,38 g kg⁻¹MS, o que representa um acréscimo de 15,7% comparando o ponto mínimo e máximo (Figura 1B). Em M2, o ponto mínimo observado foi em 1.8 dS m⁻¹, uma redução de 14,34% em relação ao nível 0.5 dS m⁻¹, obtendo teor mínimo de 10,26 g kg⁻¹MS de potássio foliar. Já as maiores concentrações foram observadas no maior nível de salinidade, resultando em um acréscimo de 39,3% em relação ao nível 0.5 dS m⁻¹ (Figura 1B).

Para as plantas M3, houve redução inicial de 2,62%, na CE 1,1 dS m⁻¹ comparado a 0.5 dSm⁻¹. Após isso, a concentração voltou a subir atingindo o maior teor, 21,39 g kg⁻¹MS de potássio, no maior nível salino aplicado. Comparando os tratamentos micorrízicos, as plantas de M3 apresentou maior potencialidade na captação de potássio foliar, preferencialmente nos níveis 1.8 e 4.4 dS m⁻¹, acumulando 53,28 e 32,27% respectivamente, em relação a M2 e 46,65 e 23,09 % em relação a M1. O potássio (K) é um macronutriente essencial para as plantas, desempenhando um papel crucial no desenvolvimento foliar. Ele atua em diversas funções fisiológicas, desde o controle do crescimento celular, a formação de madeira, o conteúdo e o movimento de nos vasos condutores (xilema e floema), o transporte de nutrientes e metabólitos e as respostas ao estresse (Sardans e Penuelas, 2021).

Sob esse viés, a presença do inóculo fúngico de *G. albida*, especialmente quando combinado com a microbiota do solo (M3), promoveu uma maior capacidade das plantas em absorver e/ou manter potássio sob condições de aumento da condutividade elétrica do solo. O grupo M3 demonstrou a melhor resposta em termos de acúmulo de potássio sob estresse salino crescente, sugerindo um papel benéfico da interação fungo-microbiota na mitigação dos efeitos negativos da salinidade na absorção de potássio.

Para os teores de cálcio, no tratamento M1 e M2, o acúmulo seguiu um comportamento quadrático, obtendo as menores concentrações, 1,21 e 0,93 g kg⁻¹ MS, nos níveis 2.4 e 0.9 dS m⁻¹ respectivamente. Por outro lado, os maiores acúmulos, 2,27 e de 3,08 g kg⁻¹ MS, em ambos os tratamentos foram nos níveis de 4.4 dS m⁻¹, correspondendo aumento de 5,69 e 185% (Figura 1C). Esse padrão sugere que, inicialmente, a salinidade exerce efeito inibitório, mas em níveis mais elevados haver compensações fisiológicas ou adaptativas que favoreçam a absorção de cálcio. Já no tratamento M3, observou-se uma relação linear crescente, com os teores de cálcio aumentando proporcionalmente à elevação da salinidade, partindo de 1,25 g kg⁻¹ MS em 0,5 dS m⁻¹ até 3,28 g kg⁻¹ MS em 3,1 dS m⁻¹. Isso indica uma relação direta e positiva entre a condutividade elétrica do solo e a absorção de cálcio neste tratamento, sugerindo uma possível

adaptação mais eficaz das plantas às condições salinas progressivas. Considerando os resultados entre os tratamentos micorrízicos, nota-se que as melhores concentrações de cálcio foliar deu-se nos tratamentos com a presença do *G. Albida*, sendo mais pronunciado em M3. Nos níveis 3.1 e 44 dS m⁻¹ (Figura 1C).

O cálcio é um nutriente essencial para as plantas, atuando na formação da parede celular, na estabilidade das membranas e na sinalização celular, especialmente em situações de estresse. Sua presença é fundamental para o crescimento de raízes, folhas e frutos. Como possui baixa mobilidade no floema, sua deficiência afeta tecidos jovens, causando problemas como necrose e queda de folhas. A absorção de cálcio pode ser prejudicada por salinidade, pH do solo e competição com outros íons (Xu *et al.*, 2022). Contudo, a relação simbiótica com FMAs, podem melhorar a captação de cálcio, ao aumentar o acúmulo e a translocação de cálcio nas plantas, por meio da regulação genica de genes relacionados ao transporte e à sinalização de Ca²⁺, o que melhora a absorção desse nutriente mesmo sob condições de estresse, como a salinidade (Fu *et al.*, 2023).

O magnésio (Mg) é um nutriente essencial para as plantas, pois atua como um componente estrutural da clorofila (Ahmed *et al.*, 2023), é um componente dos ribossomos que sintetizam proteínas, estabiliza estruturas dos ácidos nucleicos e ativa enzimas necessárias para reações químicas vitais. Além disso, o Mg é crucial para a geração de ATP, a "bateria" que armazena energia, e garante a exportação de carboidratos produzidos nas folhas para outros órgãos da planta, sendo fundamental para o crescimento e desenvolvimento saudável (Adekiya *et al.*, 2019).

Nesse estudo, o teor de magnésio, no tratamento M1, seguiu uma tendência quadrática, com os menores teores observados na faixa intermediária de 2.1 dS m⁻¹, aproximadamente 4,932 g kg⁻¹ de MS, enquanto os maiores valores foram registrados nos extremos da salinidade, alcançando cerca de 13,5 g kg⁻¹ MS em 4,4 dS m⁻¹ (Figura 1D). Esses resultados indicam que níveis moderados de salinidade inicialmente, reduziu a absorção de Mg²⁺, mas as plantas podem apresentar mecanismos de adaptação que elevam sua absorção em níveis mais altos e favoreceu a retomada do acúmulo deste nutriente nas folhas (Boorboori *et al.*, 2024). Em M2 e M3, o acúmulo de magnésio apresentou uma relação linear crescente com os níveis salinos. Os menores teores foram registrados em 0,5 dS m⁻¹, com cerca de 6,49 e 11,38 g kg⁻¹ MS, respectivamente, enquanto os maiores, 14,3 e 13,5 g kg⁻¹ MS, ocorreram na salinidade de 4,4 dS m⁻¹, incrementando e, 120,1 e 18,99% respectivamente (Figura 1D). Isso indica que, sob as condições de salinidade em M2 e M3, favorece a absorção de Mg²⁺. Comparando os resultados

entre os tratamentos micorrízicos, no mesmo nível salino, 4.4 dS m⁻¹, observa-se que as maiores concentrações de magnésio foliar ocorreram nos tratamentos de M3, contendo fungos micorrízicos e a microbiota do solo, evidenciando que a simbiose e a relação fungo e microbiota do solo pode contribuir positivamente para a manutenção da absorção de Mg²⁺ sob condições salinas.

A relação Na/K é frequentemente empregada em pesquisas sobre estresse salino por refletir a habilidade das plantas em selecionar íons. O potássio (K⁺) é um elemento vital, atuando em funções como equilíbrio osmótico, ativação de enzimas e fotossíntese. Em contrapartida, o sódio (Na⁺), quando acumulado em excesso, torna-se prejudicial e disputa os mesmos canais de absorção e transporte com o K⁺ (Fathalli *et al.*, 2025)

Conforme análise de variância a salinidade afetou a relação de Na/K (p<0,01), Na/Mg (p<0,001) e a relação Ca/Mg (p<0,05). A condição micorrízica afetou significativamente a Na/Mg (p<0,001) e a relação Ca/Mg (p<0,01). A interação dos fatores afetou todas as variáveis de relação, com exceção da relação Na/Ca. Não houve efeito isolado para a a relação Na/Ca (Tabela 2).

Tabela 2. Análise de variância para relação sódio e potássio (Na/K), sódio e magnésio (Na/Mg), sódio e cálcio (Na/Ca) e relação cálcio e magnésio (Ca/Mg) em folhas de milho crioulo, cultivado em função da CE_a do rejeito salino e influência de FMA.

FV	GL	Teste F			
		Na/k	Na/Mg	Na/Ca	Ca/Mg
SAL	3	45,23 ***	38,579***	10,87ns	3,270 *
CM	2	2,52 ns	12,681***	0,082 ns	5,347**
SAL x CM	6	11,100***	6,227**	1.265 ns	4.823**

FV- Fonte de variação, GL- Graus de liberdade, FMA- Fungo micorrízico arbuscular, (CE_a) – Condutividade elétrica da água de irrigação, ***Significativo ao nível de probabilidade de 0,1% (p<0,001); ** Significativo ao nível de probabilidade de 1% (p<0,01) * Significativo ao nível de probabilidade de 5% (p<0,05).

A figura 2, mostra como diferentes níveis salinos influenciam a razão entre sódio (Na/K) nas folhas sob três tratamentos (M1, M2 e M3). EM M1, observou-se um padrão quadrático, em que, a menor razão Na/K (0,05), observada, foi registrada em 2.4 dS m⁻¹, enquanto os maiores valores, 0,09 a 0,10, deram-se nos níveis extremos de 0,5 e 4,4 dS m⁻¹ (Figura 2A). que em a salinidade intermediária houve maior o equilíbrio entre a absorção iônica de sódio e potássio, contudo, o aumento na condutividade favoreceu a perda de seletividade da cultura, havendo maior captação de sódio nos tecidos foliares em relação potássio. Apesar disso, as

plantas de M1, foram as que apresentaram menor relação Na/K, no nível 4.4 dS m⁻¹ quando comparado a M2 e M3.

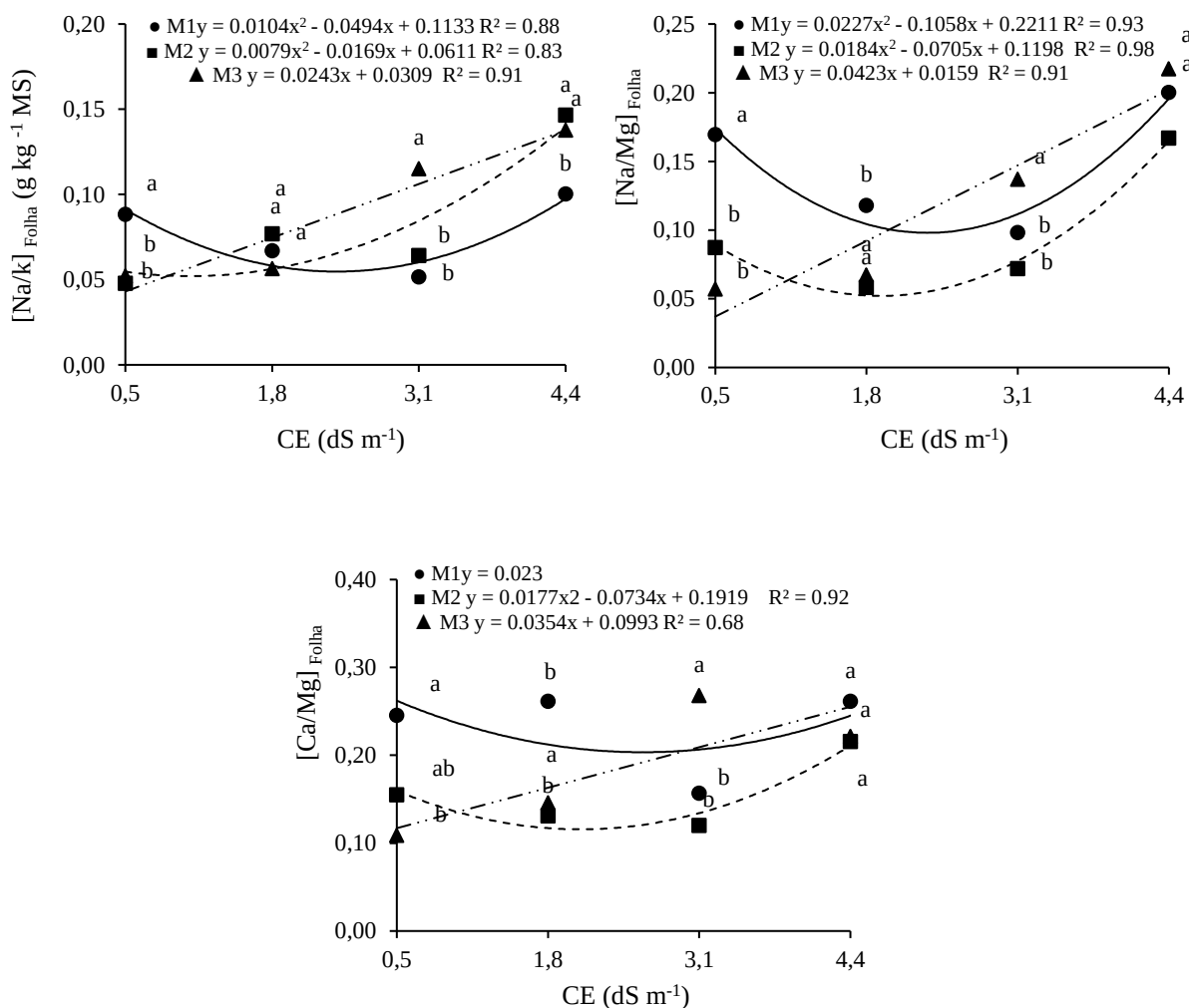


Figura 2. Relação de sódio e potássio (A), relação de sódio e magnésio (B) e relação de cálcio e magnésio (C) em folhas de milho crioulo cultivado em função da CE_a (dS m⁻¹) e condição micorrízica (● M1- plantas testemunha sem inóculo fúngico, ■ M2- plantas com inóculo fúngico de *G. albida*, ▲ M3 plantas com inóculo fúngico de *G. albida*, mais a microbiota do solo). DP, n =3. Letras minúsculas semelhantes na coluna (FMA) não diferem estatisticamente pelo Teste Scott-Knott (p<0.05).

Para M2, houve resposta com tendência quadrática, a menor razão (0.05), ocorreu sob 0,5 dS m⁻¹, e a maior (0.15), em 4,4 dS m⁻¹ (Figura 2A). Esse padrão demonstra que a elevação da salinidade intensificou a absorção relativa de sódio, comprometendo o equilíbrio iônico em

níveis salinos elevados. Já em M3, a resposta foi linear crescente, com aumento constante da razão Na/K de 0.05 para 0.14 entre 0,5 e 4,4 dS m⁻¹. Isso sugere uma perda gradual da seletividade iônica, com maior acúmulo de Na⁺ em detrimento de K⁺, evidenciando uma menor eficiência na discriminação de íons sob estresse salino crescente (Figura 2A).

Valores elevados da razão Na/K indicam um desbalanço iônico induzido pela salinidade. Em exposição prolongado, pode comprometer o funcionamento fisiológico das plantas, assim como, também dos fungos micorrízicos que vivem em associação simbiótica (Dastorgeer *et al.*, 2020). Nesse estudo, as plantas cultivadas com a presença do fungo, apresentaram maior capacidade de equilíbrio em níveis salinos intermediário, demonstrando maior capacidade de seletiva de absorção de potássio mesmo em ambientes com salinidade moderada.

A relação de sódio e magnésio (Na/Mg) é frequentemente utilizada como um indicativo de desequilíbrios iônicos provocados pelo estresse salino. O magnésio é um macronutriente vital, pois participa da formação da clorofila, da fotossíntese e da ativação de diversas enzimas. Já o sódio, quando acumulado em excesso, pode interferir negativamente na absorção desse nutriente (Zhao *et al.*, 2021).

Nesse estudo, a razão de Na/Mg seguiu o mesmo padrão de Na/K. Em M1 e M2, observou-se resposta quadrática. Os menores valores observados (0,09 e 0,05) foram registrados nos níveis 2.3 e 1.9 dS m⁻¹, enquanto os mais elevados, 0,19 e 0,16, ocorreram nas salinidades mais altas, 4,4 dS m⁻¹. Esse padrão indica que uma salinidade intermediária favoreceu o equilíbrio iônico, ao passo que os extremos interferiram na seletividade da planta, promovendo maior absorção de Na⁺ em comparação ao Mg²⁺ (Figura 2B).

Por fim, no tratamento M3, a relação Na/Mg aumentou de forma linear, passando de 0,06 para 0,22 ao longo do gradiente de salinidade. Isso demonstra que o sódio foi acumulado progressivamente em relação ao magnésio, revelando uma baixa eficiência da planta em limitar a absorção de Na⁺ em detrimento de Mg²⁺ sob condições salinas (Figura 2B).

A alta razão de Na/Mg revela uma competição entre íons, com o sódio sendo preferencialmente absorvido, o que compromete a assimilação de magnésio e, conseqüentemente, prejudica o funcionamento metabólico da planta. A análise dessa razão permite avaliar tanto o grau de toxicidade salina quanto a eficiência da planta em manter o equilíbrio de cátions essenciais, sendo, portanto, um parâmetro útil para identificar a tolerância ao estresse salino. Cabe ressaltar, ainda, que em nível 1.8 dS m⁻¹ a relação microbiota, planta e

G. albida, foram benéficas para as folhas do milho promovendo melhor homeostase foliar (Balasubramaniam *et al.*, 2023).

A relação entre cálcio ($\text{Ca}^{2+}/\text{Mg}^{2+}$) é utilizada como um indicativo do equilíbrio nutricional entre dois cátions essenciais que frequentemente disputam a absorção pelas raízes. O cálcio é importante para a estabilidade das paredes celulares, sinalização intracelular e desenvolvimento das plantas, enquanto o magnésio compõe a estrutura da clorofila, sendo indispensável à fotossíntese (Reid *et al.*, 2025).

Em ambientes com salinidade elevada, o acúmulo de íons como o sódio (Na^+) pode comprometer a absorção de Ca^{2+} e Mg^{2+} , interferindo nas funções metabólicas e no crescimento vegetal. Monitorar a razão Ca/Mg auxilia na identificação de possíveis desequilíbrios iônicos e na compreensão da capacidade da planta em manter a absorção adequada de nutrientes sob estresse salino. Quando essa proporção se encontra desajustada, as funções fisiológicas desses nutrientes são comprometidas, o que pode reduzir o desenvolvimento e a produtividade das plantas (Song *et al.*, 2022).

Conforme Figura 2C, a relação Ca/Mg não foi afetada pela salinidade em M1. Porém, observou-se resposta quadrática em M2 e linear em M3. As plantas M2 apresentaram maior equilíbrio no ponto mínimo da curva, 2,2 dS m^{-1} , registrando uma relação de Ca/Mg de 0,11, comparada a observada no maior nível salino (Figura 2C). Esse resultado reforça a hipótese que, em salinidades intermediárias, favorecer a absorção de Ca e Mg principalmente na presença do *G. albida* contribuindo para melhor estado nutricional da cultura

Já o tratamento M3 apresentou um padrão linear crescente, com elevação contínua da razão Ca/Mg de 0,11 para até 0,27 conforme o aumento da salinidade. Esse resultado aponta que, mesmo sob estresse salino, as plantas desse grupo mantiveram o incremento de Ca^{2+} em relação ao magnésio.

5 CONCLUSÃO

Os conteúdos médios de sódio foliar em plantas colonizadas com *G. albida* foram menos acentuados em níveis salinos mais baixos. Enquanto em níveis mais altos ocorreu um incremento 163,4% e 356,1% no sódio foliar para M2 e M3 em relação a testemunha, respectivamente.

O acúmulo de potássio, cálcio e magnésio foliar aumentou com o incremento da salinidade da água de irrigação. As plantas de milho sob efeito do *G. albida* e a microbiota do solo manteve a nutricional de potássio, cálcio e magnésio até o final do ciclo da cultura podendo fortalecer.

As plantas de milho cultivada em níveis de salinidade intermediária mantiveram melhor capacidade homeostase na manutenção das relações de Na/K, Ca/Mg e Na/Mg.

REFERÊNCIAS

Adekiya, A., et al. Green manures and NPK fertilizer effects on soil properties, growth, yield, mineral and vitamin C composition of okra (*Abelmoschus esculentus* (L.) Moench). **Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences**, v. 18, p. 218-223, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jssas.2017.05.005>.

Araújo, Y. A., et al. Assessment of water and sediment quality in intermittent streams across different land uses in the Brazilian semiarid region: implications for sustainable irrigation and resource management. **Environ Sci Pollut Res.** v. 32, p. 8873–8892, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11356-025-36251-4>.

Ahmed, M., et al. The Impact of Salinity on Crop Yields and the Confrontational Behavior of Transcriptional Regulators, Nanoparticles, and Antioxidant Defensive Mechanisms under Stressful Conditions: A Review. **International Journal of Molecular Science**, v. 25, 2024. DOI: <https://doi.org/10.3390/ijms25052654>.

AHMED, N., et al. The power of magnesium: unlocking the potential for increased yield, quality, and stress tolerance of horticultural crops. **Frontiers in Plant Science**, v. 14, p. 1285512, 2023.

ARRUDA, M. V., et al. Effects of the Arbuscular Mycorrhizal Fungus *Gigaspora albida* (Gigasporaceae) on the Physiology, Growth, and Na/K Balance of Creole Corn (*Poaceae*) Under Different Salinity Levels. **Agriculture**, Basel, v. 15, n. 6, art. 660, 2025.

ATTA, K., et al. Impacts of salinity stress on crop plants: improving salt tolerance through genetic and molecular dissection. **Frontiers in Plant Science**, v.14, 2023.

Avila, J. E. T., et al. Conservação in situ da agrobiodiversidade realizada por agricultores familiares tradicionais em uma região montanhosa do Brasil. *Agroecologia e Sistemas Alimentares Sustentáveis*, 6º ed. 2024. <https://doi.org/10.1080/21683565.2024.2445729>.

Azeem, A., et al. Influence of Soil Amendment Application on Growth and Yield of *Hedysarum scoparium* Fisch. et Mey and *Avena sativa* L. Under Saline Conditions in Dry-Land Regions. **Plants**, v. 14, 2025. DOI: <https://doi.org/10.3390/plants14060855>.

BALASUBRAMANIAM, T., et al. Plants' Response Mechanisms to Salinity Stress. **Plants**, v. 12, n. 12, 2023. DOI: [10.3390/plants12122253](https://doi.org/10.3390/plants12122253).

BARBOSA, M. V., et al. Do different arbuscular mycorrhizal fungi affect the formation and stability of soil aggregates?. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 43, p. e003519, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1590/1413-7054201943003519>.

Bello, S. K., et al. Mitigating Soil Salinity Stress with Gypsum and Bio-Organic Amendments: A Review. **Agronomy**, v. 11, 2021. DOI: <https://doi.org/10.3390/agronomy11091735>.

BEN-ASHER, J. et al. Crop Response to Combined Availability of Soil Water and Its Salinity Level: Theory, Experiments and Validation on Golf Courses. **Agronomy**, v. 11, n. 10, art. 2012, 2021. DOI: [10.3390/agronomy11102012](https://doi.org/10.3390/agronomy11102012).

Boorboori, M. R., & Lackóová, L. (2025). Arbuscular mycorrhizal fungi and salinity stress mitigation in plants. **Frontiers in Plant Science**, 15, 2025. DOI: <https://doi.org/10.3389/fpls.2024.1504970>

Calone, R. *et al.* Salt Tolerance and Na Allocation in *Sorghum bicolor* under Variable Soil and Water Salinity. **Plants**, v. 9, p. 561, 2020. DOI: <https://doi.org/10.3390/plants9050561>

CAVALCANTE, J. S. J. Analysis on Salinity Tolerance of Lettuce Cultivars Under Saline Irrigation and Application of Organic Acids. **Plants (Basel)**. 2025.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO (Conab). **Boletim da safra de grãos: 12º levantamento – Safra 2023/24**. Brasília, DF: Conab, 27 set. 2024.

CONAB - COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Acompanhamento da Safra Brasileira de Grãos**, Brasília, DF, v. 11, safra 2023/24, n. 12 décimo segundo levantamento, 2024.

CORWIN, D. L. Soil salinity assessment: methods and interpretation of electrical conductivity measurements. *European Journal of Soil Science*, [S.l.], v. 72, n. 3, p. 1070–1091, 2021.

COUTO, D. P., et al. Analysis of the Effect of the Interaction of Genotype and Environment on the Yield Stability of Maize Varieties; Genetic Resources for Breeding, *Agronomy*, MPDI, v. 13, 2023.

Dad, K., et al. Arbuscular Mycorrhizal Fungi (AMF) Helps in Mitigating the Growth and Enzymatic Changes in Potato (*Solanum tuberosum*) Seedlings under Salinity Stress Conditions. *Indus Journal of Bioscience*. v. 3, 2025.

Dar, M. H, et al. Arbuscular Mycorrhizal Fungi—alleviator for salinity stress: A review. *Pedosphere*. v. 13, p 212-224, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.pedsph.2022.06.027>.

DASTOGEER, Khondoker M.G., et al. Plant salinity tolerance conferred by arbuscular mycorrhizal fungi and associated mechanisms: a meta-analysis. *Frontiers in plant science*, v. 11, p. 588550, 2020. DOI: <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.588550>.

Demo, A. et al. Impact of soil salinity, sodicity, and irrigation water salinity on crop production and coping mechanism in areas of dryland farming. *Agrosystems, Geosciences e Environment*, v. 8 ed. 1., 2025.

Diagne, N. et al. Roles of Arbuscular Mycorrhizal Fungi on Plant Growth and Performance: Importance in Biotic and Abiotic Stressed Regulation. *Diversity* 2020. <https://doi.org/10.3390/d12100370>.

Erenstein, O., et al. Produção, consumo e comércio global de milho: tendências e implicações para P&D. **Food Sec.** v. 14, p. 1295–1319, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12571-022-01288-7>.

ETESAMI, H., *et al.* The combined use of silicon and arbuscular mycorrhizas to mitigate salinity and drought stress in rice. **Environmental and experimental botany**, v. 201, p. 104955, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2022.104955>.

Fathalli, N., *et al.* Effect of salt stress on K⁺/Na⁺ homeostasis, osmotic adjustment, and expression profiles of high-affinity potassium transporter (*HKT*) genes. **Protoplasma**, v. 262, p. 1419–1432, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00709-025-02070-0>

FU, W.; et al. Inoculation with arbuscular mycorrhizal fungi increase calcium uptake in *Malus robusta*. **Scientia Horticulturae**, v. 321, p. 112295, 2023.

Gupta, S. *et al.* Alívio do estresse salino em plantas por simbiose endofítica planta-fungo: conhecimento atual, perspectivas e direções futuras. **Plant and Soil**, v. 461, p. 219–244, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11104-020-04618-w>.

HAMEED, A. et al. Effects of Salinity Stress on Chloroplast Structure and Function. **Cells**, v. 10, n. 8, art. 2023, 2021. DOI: 10.3390/cells10082023.

Heydari, S., & Pirzad, A. Mycorrhizal Fungi and Thiobacillus Co-inoculation Improve the Physiological Indices of *Lallemantia iberica* Under Salinity Stress. **Current Microbiology**, v. 77, p. 2523 – 2534, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00284-020-02034-y>.

JANZEN, G. M. et al. Demonstration of local adaptation in maize landraces by reciprocal transplantation. **Evolutionary Applications** , v. 15 , p. 817–837, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1111/eva.13372>.

Khaliq, A., et al. Arbuscular Mycorrhizal Fungi Symbiosis to Enhance Plant–Soil Interaction. **Sustainability**, v. 14, 2022. <https://doi.org/10.3390/su14137840>.

Klinsukon, C., et al. Colonization by arbuscular mycorrhizal fungi improves salinity tolerance of eucalyptus (*Eucalyptus camaldulensis*) seedlings. *Scientific Reports*, v. 11, p. 4362, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-021-84002-5>.

LESSA, C. I. N. et al. Potential of Brackish Groundwater for Different Biosaline Agriculture Systems in the Brazilian Semi-Arid Region. *Agriculture*, v.10, n. 2, 2023.

Li, T., et al. Trade-offs of organic amendment input on soil quality and crop productivity in saline-alkali land globally: A meta-analysis. *European Journal of Agronomy*. v. 164, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.eja.2024.127471>.

Liu, Y., et al. Rhizosphere microbes enhance plant salt tolerance: Toward crop production in saline soil. *Computational and Structural Biotechnology Journal*, v. 20, p. 6543 – 6551, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.csbj.2022.11.046>.

Ma, S., et al. Arbuscular Mycorrhizal Fungi Promote *Gleditsia sinensis* Root Growth under Salt Stress by Regulating Nutrient Uptake and Physiology. *Forests*, v. 13, p. 668, 2022. <https://doi.org/10.3390/f13050688>.

MA, Y. et al. 2023. Effects of soil salinity on foxtail millet osmoregulation, grain yield, and soil water utilization under varying water conditions. *Elsevier*, v. 248, 2023.

Maranhão, R. L. A, et al. Análise do crescimento e aceleração da produção de soja, cana-de-açúcar, milho e gado no Brasil. *Environ Dev Sustain*, v. 27, p. 11697–11742, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10668-023-04377-5>.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS (ONU). Departamento de Assuntos Econômicos e Sociais (DESA). Divisão de População. *World Population Prospects 2022: Summary of Results*. Nova York: ONU, 2022.

Parvin, S., et al. Effects of single and multiple species inocula of arbuscular mycorrhizal fungi on the salinity tolerance of a Bangladeshi rice (*Oryza sativa* L.) cultivar. ***Mycorrhiza***, v. 30, p. 431–444, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00572-020-00957-9>.

Pooja, P., et al. Role played by arbuscular mycorrhizal fungi in amelioration of salinity stress: a review. ***Plant Soil***, v. 511, p. 27–42, 2025. <https://doi.org/10.1007/s11104-024-06976-1>.

REDDY, G.S.V. et. al. Mutualistic Relationships between Plants and Mycorrhizal Fungi Impacts on Ecosystem Functioning: A Review. ***UTTAR PRADESH JOURNAL OF ZOOLOGY***. v. 45, n. 13, p. 242–261, 2024.

Reid, J. B. et al. "Control of Magnesium Uptake in a Hybrid Brassica." ***Communications in Soil Science and Plant Analysis***, v. 56, p. 1709 – 1733, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1080/00103624.2025.2472881>.

Rivas, M. et al. Diversity of vegetable landraces in the Pampa biome of Brazil and Uruguay: utilization and conservation strategies. ***Frontiers in Plant Science***, v. 14, 2023. <https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1232589>.

Rodrigues, V. dos S. et al. Produtividade da cultura do milho irrigado com águas salinas. ***Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental***, v.24, p.101-105, 2020.

SÁ, F. V. D. S et al. Phosphorus doses alter the ionic homeostasis of cowpea irrigated with saline water. ***Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental***, v. 25, p. 372-379, 2021.

SANTOS, S. T et al. Photochemical efficiency of basil cultivars fertigated with salinized nutrient solutions. ***Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental***, v. 24, n. 5, p. 320-325, 2020.

SARDANS, J; e PEÑUELAS, J. Potassium control of plant functions: Ecological and agricultural implications. ***Plants***, v. 10, n. 2, p. 419, 2021.

Shahid, M. A. et al. Insights into the Physiological and Biochemical Impacts of Salt Stress on Plant Growth and Development. *Agronomy*, MPDI. v. 10, 2020.

Shen, L. e Hao Y. et al. RNA m6A modification meets plant hormones. *Nature plants*, v. 11, p. 686-695, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41477-025-01947-5>.

SILVA, H. D. D. e MONTTOYA, L. V. G. Hongos micorrizas arbusculares: la simbiosis de los múltiples beneficios. *Revista Ciencia y Tecnología El Higo*, v. 12, n. 2, p. 2-14, 2022.

Song, X. et al. Study on the Effects of Salt Tolerance Type, Soil Salinity and Soil Characteristics on the Element Composition of Chenopodiaceae Halophytes. *Plants*, v. 11, p.1288,2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/plants11101288>

Soni, P., 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, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-020-80364-4>.

TANURE, T. M. do P et al. Impactos da expansão agrícola no Cerrado brasileiro: uma análise socioeconômica e ambiental. *Revista de Economia e Sociologia Rural*, Piracicaba, v. 61, n. 3, e0264873, 2024.

Toumi, I., et al. Impact of Deficit Irrigation Strategies Using Saline Water on Soil and Peach Tree Yield in an Arid Region of Tunisia. *Agriculture*, v. 14, 2024. DOI: <https://doi.org/10.3390/agriculture14030377>.

UCHOA, João Luiz da Costa. Relações entre as instabilidades pluviométricas e as produções de lavouras de sequeiro no Ceará, Piauí e Rio Grande do Norte. Dissertação (Mestrado em Economia Rural) – Centro de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2022.

Umer, M. et al. Roles of arbuscular mycorrhizal fungi in plant growth and disease management for sustainable agriculture. *Frontiers: In Microbiology*, v. 16, 2025. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2025.1616273>.

Wahab, A., et al. Role of Arbuscular Mycorrhizal Fungi in Regulating Growth, Enhancing Productivity, and Potentially Influencing Ecosystems under Abiotic and Biotic Stresses. *Plants*, v. 12, 2023. <https://doi.org/10.3390/plants12173102>.

Wang, B., et al. Earthworms and arbuscular mycorrhizal fungi improve salt tolerance in maize through symplastic pathways. *Journal of Experimental Botany* , v. 76, p. 2373–2386, 2025. <https://doi.org/10.1093/jxb/eraf057>.

Wang, Y., et al. Organic Amendments promote saline-alkali soil desalinization and enhance maize growth. *Frontiers in Plant Science*, v. 14, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1177209>.

Wu, Y. et al. Inoculation with arbuscular mycorrhizal fungi improves plant biomass and nitrogen and phosphorus nutrients: a meta-analysis. *BMC Plant Biology*. v. 24, p. 960. 2024. <https://doi.org/10.1186/s12870-024-05638-9>.

Xu, T et al. Sensing mechanisms: Calcium signaling mediates abiotic stress in plants. *Frontiers in Plant Science*, v. 13, 2022. DOI: <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.925863> .

Xu, W., (2024). Arbuscular mycorrhizal fungi communities and promoting the growth of alfalfa in saline ecosystems of northern China. *Frontiers in Plant Science*, v. 15, 2024. <https://doi.org/10.3389/fpls.2024.1438771>.

Zhao, D. et al. Impact of saline stress on the uptake of various macro and micronutrients and their associations with plant biomass and root traits in wheat. *Plants Soil Environ*. v. 67, p.61-70, 2021. DOI: 10.17221/467/2020-PSE.
