



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PIAUÍ
CAMPUS PROFESSORA CINOBELINA ELVAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS AGRÁRIAS
MESTRADO EM CIÊNCIAS AGRÁRIAS

JOÃO ALVES CARVALHO

**GRANULOMETRIA DO FERTILIZANTE A BASE DE SÍLICA AMORFA NO
DESEMPENHO NUTRICIONAL, FISIOLÓGICO E PRODUTIVO DO MILHO
CULTIVADO NO CERRADO**

Bom Jesus – PI

2025

JOÃO ALVES CARVALHO

**GRANULOMETRIA DO FERTILIZANTE A BASE DE SÍLICA AMORFA NO
DESEMPENHO NUTRICIONAL, FISIOLÓGICO E PRODUTIVO DO MILHO
CULTIVADO NO CERRADO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Agrárias - PPGCA, Campus Professora Cinobelina Elvas - CPCE, da Universidade Federal do Piauí - UFPI, na área de concentração Ciência do Solo, como requisito para obtenção do título de Mestre em Ciências Agrárias.

Orientador: Prof. Dr. Cácio Luiz Boechat
Coorientador: Prof. Dr. Clistenes Williams Araújo do Nascimento

Bom Jesus – PI

2025

FICHA CATALOGRÁFICA
Universidade Federal do Piauí
Biblioteca Setorial Campus Professora Cinobelina Elvas
Setor de Processamento Técnico

C331g Carvalho, João Alves.

Granulometria do fertilizante a base de sílica amorfa no desempenho nutricional, fisiológico e pródutivo do milho cultivado no cerrado / João Alves Carvalho. -- 2025.

61 f.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Piauí. Programa de Pós Graduação em Ciências Agrárias, Bom Jesus, Piauí, 2025.

“Orientador: Prof. Dr. Cácio Luiz Boechat”.

“Coorientador: Prof. Dr. Clístenes Williams Araújo do Nascimento”.

1. Ciências agrárias. 2. Adubação silicatada. 3. Parâmetros produtivos. I. Boechat, Cácio Luiz. II. Nascimento, Clístenes Williams Araújo do. III. Título.

CDD 630

Bibliotecária: Nayra Fontinele Feijão – CRB3/1249

JOÃO ALVES CARVALHO

**GRANULOMETRIA DO FERTILIZANTE A BASE DE SÍLICA AMORFA NO
DESEMPENHO NUTRICIONAL, FISIOLÓGICO E PRODUTIVO DO MILHO
CULTIVADO NO CERRADO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Agrárias - PPGCA, do Campus Professora Cinobelina Elvas - CPCE, da Universidade Federal do Piauí - UFPI, como requisito à obtenção do título de Mestre em Ciências Agrárias.

Área de concentração: Ciência do Solo.

Linha de Pesquisa: Fertilidade, Biologia do Solo e Nutrição de Plantas.

Orientador: Prof. Dr. Cácio Luiz Boechat

Coorientador: Prof. Dr. Clístenes Williams Araújo do Nascimento

Aprovada em: 30 de julho de 2025.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Cácio Luiz Boechat (UFPI)
Orientador

Prof. Dr. Filipe Selau Carlos (UFPEL)
Examinador Externo ao Programa

Prof. Dr. Gabriel Barbosa da Silva Júnior (UFPI)
Examinador Interno ao Programa

In memoriam:

Aos meus queridos avós maternos, Antônia
Ricardo Alves e Domingos Manoel Alves.

Dedico.

AGRADECIMENTOS

A Deus, por toda proteção, pela força nos momentos difíceis e por ter me guiado nas melhores escolhas e caminhos até o atual momento.

À minha família, especialmente à minha mãe, Maria dos Navegantes Alves, por todo o amor, apoio e confiança depositada em mim. Aos meus irmãos Valdei, Thais e Carlos Eduardo pelo apoio e companheirismo.

Aos meus avós maternos, Antônia Ricardo Alves e Domingos Manoel Alves, por todo carinho, amor, valores e ensinamentos transmitidos até suas partidas. Mesmo sem entenderem os detalhes da jornada acadêmica, estiverem sempre presentes por meios de apoio, orações e gestos de cuidado.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Cácio Luiz Boechat por toda orientação, ensinamentos, dicas e suporte. Ao meu coorientador, Clístenes Williams Araújo do Nascimento pelo auxílio nas análises e pela constante disponibilidade em esclarecer as dúvidas que surgiram ao longo da condução experimento.

À Karolayne Ribeiro Caetano, por todo o companheirismo, amor e compreensão; por estar comigo nos bons momentos e ajudar a enfrentar os momentos difíceis, por acreditar em mim e entender os momentos que estive um pouco ausente.

Aos membros do grupo de pesquisa MARS, pela ajuda ao longo da condução do experimento de campo.

À Universidade Federal do Piauí - UFPI (CPCE) juntamente com o Programa de Pós-Graduação em Ciências Agrárias, pela oportunidade de realização deste curso.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Piauí (FAPEPI), pela concessão da bolsa de estudo.

Por fim, agradeço a todos que contribuíram de forma direta ou indireta na execução deste trabalho.

A mente que se abre a uma nova ideia jamais
volta ao seu tamanho original.

Albert Einstein.

RESUMO

A fertilização com silício na cultura do milho, garante benefícios, promovendo maiores produtividades, principalmente, quando o cultivo ocorre em ambientes estressantes, seja aqueles estresses bióticos (pragas e doenças) ou abióticos (altas temperaturas, salinidade e déficit hídrico). Diversas fontes de silício têm sido utilizadas, com diferenças relacionadas ao teor de silício solúvel e risco de contaminação ao solo. Nesse sentido, fontes alternativas como fertilizantes à base de sílica amorfa tem se destacado, promovendo maior eficiência das adubações e menor risco de contaminação dos solos. Entretanto, a granulometria ideal desses fertilizantes ainda não está estabelecida. Dessa forma, este trabalho propôs avaliar diferentes granulometrias de um fertilizante à base de sílica, quanto a sua solubilidade, influência sobre a absorção de silício, fósforo, micronutrientes, desempenho fotossintético e produtivo do milho cultivado no Cerrado. Assim, foi conduzido um experimento de campo na Fazenda Estrela, localizada na Serra do Quilombo, zona rural do município de Bom Jesus, Estado do Piauí, Brasil. Desse modo, o ensaio foi conduzido em delineamento de blocos casualizados em esquema fatorial $7 \times 2 + 1$, correspondente a 7 diferentes granulometrias, 2 doses (200 e 400 kg ha⁻¹) e o controle (sem o uso) de um fertilizante à base de sílica amorfa (AgrisilicaTM, Agripower Australia Limited), fabricados de terra natural de diatomáceas, com cinco repetições. No florescimento e na formação da espiga foram avaliados os teores foliares de Si, P e micronutrientes, assim como as trocas gasosas e no final do ciclo da cultura foi estimada a produtividade. Observou-se que os níveis de Si durante a formação de espigas foram quase o dobro em relação da fase de floração. Não observamos diferenças significativas na concentração foliar de micronutrientes. Além disso, os resultados demonstraram que a aplicação de diferentes granulometrias de sílica amorfa resultou em efeitos distintos na disponibilidade de silício, sendo que os tratamentos com menores tamanhos de partículas, promoveram maior eficácia no aumento da acumulação de Si, garantiram uma melhor regulação das taxas de trocas gasosas, absorção de fósforo e é uma forma de Si promissor para melhorar a produtividade do milho. A fertilização com Si pode ser uma estratégia importante para otimizar a produtividade do milho, particularmente em solos com deficiência de Si, embora a escolha da fonte de Si e da taxa de aplicação deva ser cuidadosamente considerada.

Palavras-chave: Adubação silicatada, Fertilidade do solo, Parâmetros produtivos, Trocas gasosas.

ABSTRACT

Silicon fertilization in maize cultivation provides benefits by promoting higher yields, especially when the crop is grown under stressful conditions, whether biotic stress (pests and diseases) or abiotic stress (high temperatures, salinity, and water deficit). Various sources of silicon have been used, differing in terms of soluble silicon content and risk of soil contamination. In this context, alternative sources such as amorphous silica-based fertilizers have stood out, offering greater fertilization efficiency and lower risk of soil contamination. However, the ideal particle size of these fertilizers has not yet been established. Therefore, this study aimed to evaluate different particle sizes of a silica-based fertilizer in terms of its solubility, influence on silicon, phosphorus, and micronutrient uptake, as well as on the photosynthetic performance and productivity of maize grown in the Brazilian Cerrado. A field experiment was conducted at Fazenda Estrela, located in Serra do Quilombo, rural area of the municipality of Bom Jesus, in the state of Piauí, Brazil. The trial was carried out in a randomized block design in a $7 \times 2 + 1$ factorial scheme, corresponding to 7 different particle sizes, 2 application rates (200 and 400 kg ha⁻¹), and a control (no application) of an amorphous silica based fertilizer (Agrisilica™, Agripower Australia Limited), produced from natural diatomaceous earth, with five replications. During flowering and ear formation stages, leaf contents of Si, P, and micronutrients were evaluated, as well as gas exchange measurements. At the end of the crop cycle, grain yield was estimated. It was observed that Si levels during ear formation were nearly twice as high as those during flowering. No significant differences were observed in foliar micronutrient concentrations. Furthermore, results showed that applying different particle sizes of amorphous silica led to varying effects on silicon availability, with treatments using smaller particle sizes being more effective in increasing Si accumulation, improving the regulation of gas exchange rates, phosphorus uptake, and proving to be a promising form of Si for enhancing maize productivity. Silicon fertilization can be an important strategy to optimize maize yield, particularly in Si deficient soils, although the choice of Si source and application rate should be carefully considered

Keywords: Soil fertility, Silicate fertilization, Gas exchange, Productive parameters.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 -	Dados de temperatura (°C), umidade relativa do ar (%) e precipitação (mm), no período de realização do experimento, com base em dados recuperados do Instituto Nacional de Meteorologia – INMET.....	34
Figura 2 -	Valores médios de silício solúvel em solução de carbonato de sódio (Na ₂ CO ₃) e nitrato de amônio (NH ₄ NO ₃) nas diferentes granulometrias do fertilizante à base de sílica amorfa utilizado.....	36
Figura 3 -	Concentração de silício nas folhas de milho nos dois estádios avaliados submetidas a diferentes granulometrias de fertilizante a base de sílica amorfa, incluindo o controle e duas doses do fertilizante (200 e 400 kg ha ⁻¹).....	40
Figura 4 -	Concentração de fósforo nas folhas de milho nos dois estádios avaliados submetidas a diferentes granulometrias de fertilizante a base de sílica amorfa, incluindo o controle e duas doses do fertilizante (200 e 400 kg ha ⁻¹).....	40
Figura 5 -	Taxa de fotossíntese líquida, transpiração, condutância estomática e concentração interna de CO ₂ de plantas de milho no estágio florescimento submetidas a diferentes granulometrias de fertilizante a base de sílica amorfa, incluindo o controle e a dose de silício (200 kg ha ⁻¹).....	44
Figura 6 -	Eficiência de carboxilação da Rubisco (A/Ci), eficiência intrínseca de uso da água (A/g _s) e eficiência instantânea de uso da água (A/E) em plantas de milho no estágio florescimento submetidas a diferentes granulometrias de fertilizante a base de sílica amorfa, incluindo o controle e uma dose de silício (200 kg ha ⁻¹).....	45
Figura 7 -	Taxa de fotossíntese líquida, transpiração, condutância estomática e concentração interna de CO ₂ de plantas de milho, no estágio formação da espiga, submetidas a diferentes granulometrias de fertilizante a base de sílica amorfa, incluindo o controle e a dose de silício (200 kg ha ⁻¹).....	46
Figura 8 -	Eficiência de carboxilação da Rubisco (A/Ci), eficiência intrínseca de uso da água (A/g _s) e eficiência instantânea de uso da água (A/E) em plantas de milho, no estágio formação da espiga, submetidas a diferentes granulometrias de fertilizante a base de sílica amorfa, incluindo o controle e uma dose de silício (200 kg ha ⁻¹).....	47
Figura 9 -	Produtividade de grãos de milho no controle e nos grupos de diferentes granulometrias de fertilizante a base de sílica amorfa com duas doses (200 e 400 kg ha ⁻¹).....	48
Figura 10 -	Gráfico biplot para os atributos nutricionais e fisiológicos no estágio de florescimento: teor de silício, fósforo, ferro, zinco, cobre, manganês, fotossíntese líquida, transpiração, condutância estomática, concentração interna de CO ₂ , eficiência de carboxilação da Rubisco, eficiência intrínseca e instantânea de uso da água.....	50
Figura 11 -	Gráfico biplot para os atributos nutricionais e fisiológicos no estágio formação da espiga: teor de silício, fósforo, ferro, zinco, cobre, manganês, fotossíntese	

líquida, transpiração, condutância estomática, concentração interna de CO₂,
eficiência de carboxilação da Rubisco, eficiência intrínseca e instantânea de
uso da água.....

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Características químicas e granulometria do solo na profundidade de 20 cm antes da implementação do experimento.....	35
Tabela 2 - Caracterização das diferentes granulometrias dos fertilizantes utilizados no experimento.....	37
Tabela 3 - Concentração de micronutrientes na folha diagnose de plantas de milho, no estágio de florescimento, submetidas a diferentes doses e granulometrias de fertilizantes a base de sílica amorfa.....	42
Tabela 4 - Concentração de micronutrientes na folha diagnose de plantas de milho, no estágio de formação da espiga, submetidas a diferentes doses e granulometrias de fertilizantes a base de sílica amorfa.....	43

LISTA DE ABREVIATURAS

Aw	Clima tropical com estação seca de inverno
CONAB	Companhia Nacional de Abastecimento
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
ASF	Amorphous Silica Fertilizer
UFPI	Universidade Federal do Piauí
FAO	Food and Agriculture Organization
PAS	Plant Available Silicon
COS	Carbono Orgânico do Solo
IRGA	Analisador de Gás por Infravermelho

LISTA DE SÍMBOLOS

Si	Silício
Al	Alumínio
Ca	Cálcio
Mg	Magnésio
Na	Sódio
K	Potássio
P	Fósforo
cmolc.dm ⁻³	Centimol de carga por decímetro cúbico
Mn	Manganês
Zn	Zinco
Cu	Cobre
Fe	Ferro

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO GERAL.....	16
2	ESTRATÉGIA EXPERIMENTAL.....	18
3	CAPÍTULO 1: REFERÊNCIAL TEÓRICO.....	19
3.1	Cultura do milho.....	19
3.2	Silício no solo.....	20
3.3	Benefícios do silício para as culturas.....	21
3.4	Uso do silício na cultura do milho.....	23
	REFERÊNCIAS.....	24
4	CAPÍTULO 2: DIFERENTES GRANULOMETRIAS DE FERTILIZANTE À BASE DE SÍLICA AMORFA MELHORAM A EFICIÊNCIA FOTOSSINTÉTICA, O DESEMPENHO NUTRICIONAL E PRODUTIVO DO MILHO CULTIVADO NO CERRADO.....	31
	RESUMO.....	31
4.1	Introdução.....	32
4.2	Material e Métodos.....	33
4.2.1	Área de estudo.....	33
4.2.2	Coleta e análise de solo da área do experimento.....	34
4.2.3	Descrição das granulometrias avaliadas.....	35
4.2.4	Instalação do experimento.....	35
4.2.5	Design experimental e tratamentos.....	36
4.2.6	Amostragem e análise foliar.....	37
4.2.7	Análises de trocas gasosas.....	38
4.2.8	Estimativa de produtividade.....	38
4.2.9	Análises estatísticas.....	39
4.3	Resultados.....	39
4.3.1	Teores de silício e nutrientes nas folhas de milho.....	39
4.3.2	Eficiência fotossintética.....	44
4.3.3	Desempenho produtivo.....	48
4.3.4	Análise de Componentes Principais.....	49
4.4	Discussão.....	51

4.4.1	Teores de silício e nutrientes nas folhas de milho.....	51
4.4.2	Eficiência fotossintética.....	53
4.4.3	Desempenho produtivo.....	53
4.5	Conclusões.....	54
	REFERÊNCIAS.....	54
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS E PERSPECTIVAS FUTURAS.....	61

1 INTRODUÇÃO GERAL

O milho (*Zea mays* L.) está entre os três cereais mais cultivados no mundo, o Brasil apresenta destaque na produção, sendo o terceiro maior produtor mundial com cerca de 132 milhões de toneladas na safra 2023/2024, segundo maior exportador mundial do grão com 50 milhões de toneladas exportadas na mesma safra (CONAB, 2024). Os grãos de milho apresentam uma vasta utilização, com destaque para a alimentação humana e como ingrediente para a elaboração de rações para consumo animal, além de ser matéria-prima industrial para fabricação de diversos produtos, demonstrando assim, a versatilidade do produto e sua importância socioeconômica mundial (Wang *et al.*, 2023).

Diversos fatores bióticos e abióticos têm contribuído para a redução da produtividade de plantas de milho, entre eles, pragas, doenças e estresse hídrico tem uma participação efetiva nesses aspectos. Nesse sentido, algumas estratégias vêm sendo traçadas com o intuito de minimizar os efeitos negativos desses agentes, como o uso de elementos benéficos para o desenvolvimento vegetal, capazes de atenuarem os efeitos deletérios destes fatores.

Apesar do silício (Si) não ser dito como um nutriente para o crescimento das plantas superiores (Sharma *et al.*, 2023), pesquisas demonstraram seus efeitos benéficos, aumentando a tolerância ao tombamento e a ocorrência de estresse biótico, contribuindo para a maior eficiência fotossintética das plantas, maior resistência a déficit hídrico, seu uso está associado a tolerância a metais pesados e aumento da biomassa (Teodoro *et al.*, 2014; Alvarenga *et al.*, 2017; Pang *et al.*, 2023; Jhorar *et al.*, 2024; Chen *et al.*, 2024; Saja-Garbarz; Libik-Konieczny; Janowiak, 2024). Entretanto, alguns efeitos positivos inerentes a utilização da adubação silicatada ainda não foram evidenciados, visto que, o acúmulo do silício varia entre as espécies vegetais e até mesmo entre os diferentes genótipos da mesma espécie (Wani *et al.*, 2024; Malik *et al.*, 2025).

As adubações com silício têm proporcionado vários benefícios para uma grande quantidade de espécies vegetais, na cultura do milho, o uso do Si tem apresentado resultados positivos sobre o aumento da fotossíntese, diminuição das taxas de transpiração, redução do estresse oxidativo, manutenção do teor ideal de água e ajuste da síntese de hormônios e solutos (Alayafi *et al.*, 2022). Além de promover, maior absorção e acúmulo de macro e micronutrientes nos tecidos das plantas quando estas são sujeitas a condições de restrição hídrica (Kaya; Atum; Higgs, 2006).

Algumas fontes de silício estão sendo utilizadas e se diferenciam pela solubilidade, concentração total de Si e disponibilidade para as plantas (Keeping, 2017). A principal fonte de silício para a agricultura é o silicato de cálcio, no entanto, outras fontes tem ganhado destaque, como silicato de sódio e potássio que apresentam limitações de uso, pois polimerizam facilmente em soluções com variação de pH, fontes alternativas como nanopartículas de silício e a sílica amorfa tem promovidos melhores respostas devido não apresentarem problemas relacionados a polimerização (Souza-Junior *et al.*, 2021; Valizadeh-Rad *et al.*, 2023; Leite *et al.*, 2024). O uso de adubos silicatados à base de sílica amorfa vem se destacando, pois, sua aplicação promove uma melhoria na eficiência das fertilizações e diminui os riscos de contaminações dos solos dos sistemas produtivos por metais pesados provenientes de fontes industriais que contêm silício em sua constituição (Sandhya; Prakash, 2019).

A sílica amorfa natural é proveniente de rochas sedimentares, formada por meio da deposição de algas diatomáceas que apresentam em sua constituição maior proporção de sílica amorfa, possui uma maior solubilidade o que proporciona maior presença de silício na solução do solo e ainda, devido sua constituição pode reter mais água e cátions na solução do solo (Pati *et al.*, 2016; Nascimento *et al.*, 2020).

Entretanto, a granulometria dos fertilizantes à base de sílica amorfa que apresentam maior solubilidade e consequentemente maior concentração de silício disponível para as plantas ainda não está estabelecida. Diante do exposto, a pesquisa em questão teve como objetivo estudar como é o comportamento do silício solúvel em função de diferentes granulometrias de sílica amorfa, avaliando a solubilidade dessas granulometrias, e sua influência sobre a concentração de silício, fósforo, micronutrientes, respostas fotossintéticas e produtividade do milho cultivado em solo arenoso no Cerrado.

2 ESTRATÉGIA EXPERIMENTAL

Este trabalho ressalta o potencial do uso de sílica amorfa com granulometria mais fina como estratégia eficiente para melhorar a nutrição e o desempenho fisiológico do milho no Cerrado piauiense. A maior disponibilidade de silício contribuiu para a otimização das funções metabólicas das plantas, proporcionando respostas fisiológicas satisfatórias, garantindo maior desempenho produtivo.

Nesse sentido, o experimento de campo foi instalado em uma área comercial da Fazenda Estrela, pertencente ao Grupo Piovesan, localizada na Serra do Quilombo, zona rural do município de Bom Jesus, Estado do Piauí, Brasil. Sendo assim, o ensaio foi conduzido em delineamento de blocos ao acaso em esquema fatorial $7 \times 2 + 1$, correspondente a 16 formatos, 2 doses (200 e 400 kg ha⁻¹, proporcionais a 50 e 100 kg ha⁻¹ de Si, respectivamente) e o controle (sem a aplicação) do fertilizante à base de sílica amorfa (Agrisilica™, Agripower Australia Limited), fabricados de terra natural de diatomáceas da espécie *Melosira granulata*, com cinco repetições.

Durante o experimento (no florescimento e na formação da espiga) foram avaliadas as concentrações de Si nas folhas e nutrientes (P, Fe, Cu, Zn e Mn), assim como as trocas gasosas. Antes da implementação do experimento avaliou-se a concentração de silício disponível para as plantas (PAS) no solo e no final do ciclo da cultura foi estimada a produtividade. Os dados foram submetidos a análises estatísticas a fim de se determinar a melhor dose e forma dos fertilizantes a base de sílica amorfa.

3 CAPÍTULO 1

REFERÊNCIAL TEÓRICO

3.1 Cultura do milho

O milho (*Zea mays* L.) pertence à ordem Gramineae, família Poaceae, tribo Maydeae e gênero *Zea*, com características de uma planta monóica, de crescimento ereto com altura variando entre as diferentes cultivares utilizadas na agricultura, sendo considerada uma das gramíneas mais eficientes no que diz respeito ao armazenamento de energia na forma de amido em suas sementes (Magalhães *et al.*, 2002).

O milho apresenta crescimento herbácea com ciclo de desenvolvimento anual, normalmente apresenta ciclo variado de 3 a 5 meses, dependendo da cultivar e dos fatores ambientais do local de cultivo, suas flores femininas se desenvolvem nas axilas das folhas na forma de espigas, enquanto as flores masculinas surgem no ápice da planta na forma de panícula conhecida popularmente como pendão, apresenta raízes fasciculadas, o qual é responsável pela fixação, sustentação da planta e absorção de nutrientes (Pereira-Filho *et al.*, 2021).

É umas das culturas de maior importância socioeconômica mundial, sendo cultivado em várias regiões do mundo devido seus grãos apresentarem uma alta capacidade de armazenamento de energia após a colheita, sendo fundamental para a produtividade e desempenho nutricional da cultura, sua importância está vinculada a suas várias formas de usos, variando desde a alimentação por animais até o uso industrial, como matéria-prima para a produção de biocombustíveis, os grãos de milho são utilizados em sua maioria na alimentação animal, sendo que cerca de 70% do consumo mundial é para este fim (Orhun, 2013; Toscano *et al.*, 2016; EMBRAPA, 2021; Li *et al.*, 2025).

Nas últimas safras, no mundo cerca de 200 milhões de hectares foram destinadas à produção de milho, representando cerca de 40% da produção mundial de cereais, sendo o continente americano o de maior expressividade (Pérez *et al.*, 2024; González *et al.*, 2024). Os dez principais países produtores, são os Estados Unidos, China, Brasil, Argentina, Índia, Ucrânia, México, Indonésia, Rússia e África do Sul (FAO, 2023).

O milho é a segunda *commodity* mais produzida no Brasil ficando atrás apenas da soja, de acordo com o levantamento da Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB) o Brasil ocupa a terceira posição no *ranking* dos maiores produtores de milho, os Estados Unidos ocupam a primeira posição e a China a segunda, produzindo 132 milhões de toneladas na safra 2023/2024 com um aumento de 16,6% em relação à safra anterior e ainda é considerado o segundo maior exportador do grão (CONAB, 2024).

Apesar das limitações encontradas na região Nordeste, principalmente no que diz respeito ao déficit hídrico e baixo nível tecnológico de alguns produtores, o cultivo de milho vem ganhando cada vez mais importância (Artuzo *et al.*, 2019). Na região, o Estado do Piauí, apresenta uma relevância acentuada na produção, onde o mesmo apresentou uma produção estimada de aproximadamente 3,0 milhões de toneladas na safra de 2024/2025 de acordo com levantamentos da CONAB, com destaque para os municípios de Uruçuí e Baixa Grande do Ribeiro com uma produção de 572 e 521 mil toneladas, respectivamente (IBGE, 2023; CONAB, 2025).

3.2 Silício no solo

O silício fica atrás apenas do oxigênio no solo e crosta terrestre de um modo abrangente em termos de abundância, os solos de um modo geral apresentam cerca 30% de silício em sua constituição natural associado a rochas e minerais (Bakhat *et al.*, 2018). No solo, o elemento encontra-se disponível para as plantas na forma de monômero H_4SiO_4 na faixa de pH variando de 4 a 9, sendo absorvido por estas tanto de forma passiva ou ativa por proteínas específicas presentes na membrana celular (Lima *et al.*, 2011).

A maioria dos solos das regiões tropicais, apresentam baixas concentrações de minerais primários facilmente intemperizáveis que contêm em sua constituição o silício, dessa forma, a maioria desses solos tem baixos teores de silício no seu extrato saturado com cerca de 2 mg kg^{-1} (Pereira; Vitti; Korndorfer, 2003). A maior concentração de silício presente no solo encontra-se na forma insolúvel (SiO_2), na constituição dos minerais de areia, silte e argila (quartzo, feldspato, mica e augita), de forma que a intemperização do quartzo é o principal responsável pela liberação do elemento na solução do solo (Heckman, 2013).

Dessa forma, no processo de intemperismo o silício é liberado para a solução do solo, sendo facilmente perdido por meio da lixiviação, devido sua molécula estrutural apresentar

carga neutra, esse processo é bastante comum em solos muitos intemperizados de regiões tropicais (Teixeira *et al.*, 2016). Nesse sentido, diversos fatores afetam diretamente a biodisponibilidade de silício, com maior expressividade o material de origem, propriedades físicas e químicas do solo (pH e presença de agregados), a intensidade de da lixiviação e a formação e desagregação dos minerais (Xia *et al.*, 2023).

De modo que, a fertilização com silício é necessária para a produção adequadas das culturas agrícolas, interagindo favoravelmente com outros nutrientes, melhorando o desempenho e a eficiência agrônômica das culturas (Pooniyan *et al.*, 2023; Saentho *et al.*, 2023). As plantas absorvem o ácido monossilícico presente no solo e o transportam por meio de proteínas especializadas semelhantes as aquaporinas, incluindo Lsi1, Lsi2, Lsi3 e Lsi6 que estão associadas a absorção de silício pelas raízes e parte aérea das culturas (Khan *et al.*, 2023; Shanmugaiah *et al.*, 2023). Depois de ser absorvido o silício é acumulado na parede das células na forma de sílica amorfa, conhecida como opalas vegetais ou fitólitos (Yang *et al.*, 2024; Suji *et al.*, 2025), proporcionando maior rigidez aos tecidos vegetais, garantindo maior resistência aos estresses bióticos e abióticos, levando a maiores produtividades agrícolas (Miao *et al.*, 2023).

3.3 Benefícios do silício para as culturas

Mesmo não sendo um nutriente para o desenvolvimento dos vegetais, diversos estudos tem demonstrado que o uso de adubações silicatadas traz inúmeros benefícios para as culturas agrícolas, como a proteção mecânica na proteção do ataque de insetos e patógenos, diminuição do estresse hídrico, promove uma melhor eficiência das adubações, garante tolerância a metais pesados, além de promover uma melhor arquitetura da planta, garantindo uma maior absorção da radiação solar e maior eficiência fotossintética (Bhat *et al.*, 2019; Oliva *et al.*, 2021; Khan *et al.*, 2021).

As plantas absorvem o silício na forma de ácido monossilícico (H_4SiO_4), em seus tecidos o convertem para a forma polimerizada (sílica amorfa) ($\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$) e a depositam em sua epiderme, formando uma dupla camada de sílica, além de estar associado a lignina, proporcionando uma barreira mecânica contra o ataque de pragas e doenças, por meio da não preferência dos insetos aos tecidos vegetais com maiores concentrações do elemento ou por meio de antibiose (Hassan *et al.*, 2024; Samal *et al.*, 2024).

O silício aumenta a resistência mecânica e a abrasividade das estruturas das plantas, reduzindo a digestão e ingestão pelos insetos (Boer *et al.*, 2018; Ali; Singh, 2025). Garantindo, a maior defesa das plantas pela rejeição dos insetos, reduzindo sua incidência, ou ainda ocasiona antibiose, diminuindo a fecundidade ou até mesmo aumentando as taxas de mortalidade dos insetos que podem comprometer as culturas (Bokor *et al.*, 2021).

As adubações silicatadas podem reduzir os impactos negativos da seca para as plantas, garantindo um melhor uso da água pelos tecidos vegetais, pois o elemento está associado a estabilidade da fotossíntese e regulação do funcionamento dos estômatos, melhorando a condutância estomática, reduzindo consideravelmente as perdas de água pelas plantas e ainda pode garantir diferentes mecanismos fisiológicos, incluindo o crescimento e processos de diferenciação dos tecidos vegetais, assegurando uma melhor resposta ao déficit hídrico (Marques *et al.*, 2021; Ahsan *et al.*, 2023; Cheraghi *et al.*, 2023). Dessa forma, a deposição de silício nos estômatos forma uma camada dupla de sílica na cutícula, responsável por minimizar a transpiração aumentando a resistência ao déficit hídrico nos vegetais (Atta *et al.*, 2022).

A utilização do silício pode ainda amenizar os efeitos da contaminação do solo com metais pesados, pois o silício por meio de processos internos e externos aos vegetais, faz com que os metais pesados sejam imobilizados no solo, diminui a absorção pelas raízes e a translocação destes dentro do tecido vegetal, diminuindo o acúmulo nas plantas (Emamverdian *et al.*, 2018; Mousavi, 2022).

O silício garante uma melhor relação entre o solo e as plantas por meio da melhoria das propriedades físicas e características químicas, garantindo uma melhor estrutura das folhas e maior desenvolvimento do sistema radicular, possibilitando uma maior absorção de outros nutrientes, seja por mudanças no próprio solo como o aumento do pH e aumento da disponibilidade de alguns nutrientes como é o caso do cálcio e potássio ou mudanças bioquímicas e fisiológicas nos tecidos da planta (Oliva *et al.*, 2021; Nascimento *et al.*, 2022).

Diante do exposto, a adubação silicatada surge como uma alternativa viável para ser utilizada na implementação e no desenvolvimento de culturas agrícolas em associação com condições de estresse, visto que alguns estudos têm demonstrado que tal prática tem garantido ganhos significativos de produtividade (Rodrigues *et al.*, 2019).

3.4 Uso do silício na cultura do milho

Dependendo da concentração de silício em seus tecidos, existem plantas que são definidas como acumuladoras ou não acumuladoras de silício, sendo que plantas que apresentam 1,5% ou mais de silício em sua massa seca são classificadas como acumuladoras já aquelas que apresentam 0,5% ou menos de silício na sua massa seca são classificadas como não acumuladoras, o milho é classificado como acumulador de silício (Bakhat *et al.*, 2018).

Estudos vêm sendo desenvolvidos com intuito de avaliar a comportamento do silício e seus efeitos sobre o aumento da produtividade, tolerância ao estresse biótico, aclimação a condições de restrição hídrica, resistência ao estresse salino entre outros aspectos na cultura do milho (Marques *et al.*, 2021; Lamlom *et al.*, 2024; Nadeem *et al.*, 2025). Como o silício é definido como elemento potencialmente benéfico para as plantas, está associado ao fortalecimento estrutural das plantas, estímulo a absorção de nutrientes, que resulta em incrementos de produtividade do milho (Haque *et al.*, 2024; Mahmood *et al.*, 2024).

Naggar *et al.* (2020) ao estudaram o impacto da aplicação de nanosílica no solo e seus efeitos sobre o desenvolvimento e produtividade do milho, no Egito, observaram dentre os tratamentos (0, 2,5, 5, 10 gramas de nano sílica por quilo de solo) que ao se depositar no solo as partículas de nanosílica até 10 g kg⁻¹ as plantas de milho obtiveram um melhor crescimento e rendimento com maior incremento dos caracteres agrônômicos avaliados (componentes de rendimento, porte das plantas, teor de pigmentos fotossintéticos e concentração de proteína).

A utilização do silício como indutor de tolerância ao déficit hídrico para as plantas foi investigado por Marques *et al.* (2021) em Minas Gerais, Brasil, sob condições de casa de vegetação, utilizando um solo classificado como Latossolo Vermelho distroférrico, tendo como fonte de silício o CaSiO₃, utilizou-se reagente puro (CaO = 12%, SiO₂ = 78%) nas concentrações de 0%, 25%, 50%, 75% e 100% de silicato recomendadas para correção do solo, os autores perceberam que o uso do elemento proporcionou o aumento do crescimento das plantas, densidade estomática, estimulando a um maior equilíbrio em relação ao uso da água e das taxas fotossintéticas, promovendo maior translocação e absorção do elemento e aumento da produção de grãos pelo milho.

Gou *et al.* (2023) detectaram que o uso de silício na concentração 6 mM na forma de silicato de potássio, conduzido em casa de vegetação, aplicado ao milho doce, na universidade de Yibin, China, aumentou significativamente o crescimento em 23% em relação ao controle, pigmentos (clorofila a, clorofila b e carotenoides), açúcares livres totais, teor relativo de água,

estabilidade da membrana, atividades das enzimas antioxidantes, promovendo uma melhor aclimação de plantas de milho doce cultivadas sob condições de estresse salino, demonstrado o potencial do elemento como um atenuador dos efeitos deletérios do estresse por salinidade nestas plantas

REFERÊNCIAS

ALAYAFI, A. H.; AL-SOLAIMANI, S. G. M.; EL-WAHED, M. H. A.; ALGHABARI, F. M.; EL-SABAGH, A. Silicon supplementation enhances productivity, water use efficiency and salinity tolerance in maize. **Frontiers in Plant Science**, v. 13, p. 953451, 2022.

ALI, A. M.; SINGH, B. Silicon: a crucial element for enhancing plant resilience in challenging environments. **Journal of Plant Nutrition**, v. 48, n. 3, p. 486-521, 2025.

AHSAN, M.; VALIPOUR, M.; NAWAZ, F.; RAHEEL, M.; ABBAS, H. T.; SAJID, M.; MANAN, A.; KANWAL, S.; MAHMOUD, E.A.; CASSINI, R.; ELANSARY, H.O.; RADICETTI, E.; ZULFIQAR, H. Evaluation of silicon supplementation for drought stress under water-deficit conditions: an application of sustainable agriculture. **Agronomy**, v. 13, n. 2, p. 599, 2023.

ALVARENGA, R. MORAES, J.C.; AUAD, A. M.; COELHO, M.; NASCIMENTO, A. M. Induction of resistance of corn plants to *Spodoptera frugiperda* (JE Smith, 1797) (Lepidoptera: Noctuidae) by application of silicon and gibberellic acid. **Bulletin of Entomological Research**, v. 107, n. 4, p. 527-533, 2017.

ARTUZO, F. D.; FOGUESATTO, C. R.; MACHADO, J. A. D.; OLIVEIRA, L.; SOUZA, A. R. L. O potencial produtivo brasileiro: uma análise histórica da produção de milho. **Revista em Agronegócio e Meio Ambiente**, v. 12, n. 2, p. 515-540, 2019.

ATTA, M. M. M.; ABD-EL-SALAM, R. M.; ABDEL-LATTIF, H. M.; GARANG, M. A. Effect of silicon on maize under water deficit conditions at flowering stage. **SABRAO Journal of Breeding and Genetics**, v. 54, p. 948-962, 2022.

BAKHAT, H. F.; BIBI, N.; ZIA, Z.; ABBAS, S.; HAMMAD, H. M.; FAHAD, S.; ASHRAF, G. M.; RABBANI, F.; SAEED, S. Silicon mitigates biotic stresses in crop plants: A review. **Crop Protection**, v. 104, p. 21-34, 2018.

BHAT, J. A.; SHIVARAJ, S. M.; SINGH, P.; NAVADAGI, D. B.; TRIPATHI, D. K.; DASH, P. K.; SOLANQUE, A. U.; SONAH, H.; DESHMUKH, R. Role of silicon in mitigation of heavy metal stresses in crop plants. **Plants**, v. 8, n. 3, p. 71, 2019.

BOER, C. A.; SAMPAIO, M. V.; PEREIRA, H. S. Constructive and silicon-mediated resistance to *Rhopalosiphum maidis* (Hemiptera: Aphididae) in maize hybrids. **Entomological Research Bulletin**, v. 109, p. 356-364, 2018.

BOKOR, B.; SANTOS, C. S.; KOSTOLÁNI, D.; MACHADO, J.; SILVA, M. N.; CARVALHO, M.; VAKULÍK, M.; VASCONCELOS, M. W. Mitigation of climate change and environmental hazards in plants: Potential role of the beneficial metalloid silicon. **Journal of Hazardous Materials**, v. 416, p. 126193, 2021.

CHERAGHI, M.; MOTESHAREZADEH, B.; MOUSAVI, S. M.; MA, Q.; AHMADABADI, Z. Silicon (Si): a regulator nutrient for optimum growth of wheat under salinity and drought stresses-a review. **Journal of Plant Growth Regulation**, v. 42, n. 9, p. 5354-5378, 2023.

CHEN, H.; HUANG, X.; CHEN, H.; ZHANG, S.; CHENGWU, V.; FU, T.; ELE, T.; GAO, Z. Effect of silicon spraying on rice photosynthesis and antioxidant defense system on cadmium accumulation. **Scientific Reports**, v. 14, n. 1, p. 15265, 2024.

CONAB. Companhia Nacional de Abastecimento. 2024. **Acompanhamento da safra brasileira de grãos 2023/2024**. Disponível em: <https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/graos>. Acesso em: 11 out. 2023.

CONAB. Companhia Nacional de Abastecimento. 2025. **Acompanhamento da safra brasileira de grãos 2024/2025**. Disponível em: <https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/graos>. Acesso em: 04 mai. 2025.

EMBRAPA. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Agência Embrapa de informação tecnológica**. Milho: Importância socioeconômica. 2021. Disponível em: <https://www.embrapa.br/en/agencia-de-informacao-tecnologica/cultivos/milho/pre-producao/socioeconomia/importancia-socioeconomica>. Acesso em: 03 nov. 2023.

EMAMVERDIAN, A.; DING, Y.; XIE, Y.; SANGARI, S. Silicon mechanisms to ameliorate heavy metal stress in plants. **BioMed Research International**, v. 2018, n. 1, p. 8492898, 2018.

FAO. Food and Agriculture Organization of the United Nations. **FAOSTAT-Countries by commodity**. Disponível em: https://www.fao.org/faostat/en/#rankings/countries_by_commodity. Acesso em: 10 fev. 2025.

GONZÁLEZ, A. C.; RAMÍREZ, R. A.; COHEN, I. S.; RUIZ, J. S.; RIVAS, A. I. M. Impactos del cambio climático en la producción de maíz en México. **Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas**, v. 15, n. 1, 2024.

GOU, C.; HUANG, Q.; RADY, M. M.; WANG, L.; IHTISHAM, M.; EL-AWADY, H.H.; SEIF, M.; ALAZIZI, E. M. Y.; EID, R. S. M.; YAN, K.; TAHRI, W.; LI, J.; DESOKY, E. S. M.; EL-SAPPAH, A. H. Integrated application of silicon and/or proline improves the production of sweet corn (*Zea mays* L. *saccharata*) and the antioxidant defense system under saline stress conditions. **Scientific Reports**, v. 13, p. 18315, 2023.

HAQUE, M. A.; MOBASWERA, A.; SUME, M. A.; PRANTO, S.; JAHIRUDDIN, M.; HOQUE, M. F.; BELL, R. W. Silicon supplementation improves yield and silicon uptake in maize at eastern Ganges delta coastal soils. **Journal of Plant Nutrition**, v. 47, n. 2, p. 190-204, 2024.

HASSAN, K. M.; AJAJ, R.; ABDELHAMID, A. N.; EBRAHIM, M.; HASSAN, I. F.; HASSAN, F. A.; ALAM-ELDEIN, S. M.; ALI, M. A. Silicon: a powerful aid for medicinal and aromatic plants against abiotic and biotic stresses for sustainable agriculture. **Horticulturae**, v. 10, n. 8, p. 806, 2024.

HECKMAN, J. Silicon: a beneficial substance. **Best harvests**, v. 97, p. 14-16, 2013.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Produção agrícola – lavoura temporária**. 2022. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/pi/pesquisa/14/10193>. Acesso em: 03 nov. 2023.

JHORAR, P.; CHOUDHARY, R.; JINGER, D.; SAMAL, I.; PARAMESH, V.; KUMAR, D.; NEPALI, A.; KUMAWATR.; JAT, R. A.; BHOI, T. K.; SINGH, S. Foliar application of silicon influences crop productivity, dry matter accumulation, water use efficiency, lodging score, and aphid density in wheat (*Triticum aestivum* L.). **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v. 55, n. 19, p. 2894-2908, 2024.

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

KEEPING, M. G.; Silicon uptake by sugarcane from applied sources may not reflect the silicon available in the soil for plants and the total silicon content of the sources. **Frontiers in Plant Science**, v. 8, p. 760, 2017.

KHAN, I.; AWAN, S. A.; RIZWAN, M.; ALI, S.; HASSAN, M. J.; BRESTIC, M.; ZHANG, X.; HUANG, L. Effects of silicon on heavy metal uptake at the soil-plant interphase: A review. **Ecotoxicology and environmental safety**, v. 222, p. 112510, 2021.

KHAN, I.; AWAN, S. A.; RIZWAN, M.; BRESTIC, M.; XIE, W. Silicon: an essential element for plant nutrition and phytohormones signaling mechanism under stressful conditions. **Plant Growth Regulation**, v. 100, n. 2, p. 301-319, 2023.

LAMLAM, S. F.; ABDELGHANY, A. M.; REN, H.; ALI, H. M.; USMAN, M.; SHAGHALEH, H.; HAMOUD, Y. A.; EL-SORADY, G. A. Revitalizing maize growth and yield in water-limited environments through silicon and zinc foliar applications. **Heliyon**, v. 10, n. 15, 2024.

LEITE, M. R. L.; ALCÂNTARA, F. N.; DUTRA, A. F.; MENDES, L. W.; SOUZA, R. M.; MELO, V. M. M.; OLIVEIRA, F. A. S.; SOUSA, T. K. S. A.; COSTA, R. M.; ROCHA, S. M. B.; PERREIRA, A. P. A.; PRADO, R. M.; ARAUJO, A. S. F. Distinct sources of silicon shape differently the rhizospheric microbial community in sugarcane. **Applied Soil Ecology**, v. 193, p. 105131, 2024.

LI, D.; HAO, A.; SHAO, W.; ZHANG, W.; JIAO, F.; ZHANG, H.; DONG, X.; ZHAN, Y.; LIU, X.; MU, C.; DING, Z.; XUE, D.; CHEN, J.; WANG, M. Maize kernel nutritional quality-an old challenge for modern breeders. **Planta**, v. 261, n. 2, p. 43, 2025.

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

MAGALHÃES, P. C.; DURÃES, F. O. M.; CARNEIRO, N. P.; PAIVA, E. **Fisiologia do milho**. Minas Gerais: Embrapa milho e sorgo. 2002. 23p. (Embrapa milho e sorgo. Documentos, 22).

MAHMOOD, S.; AL-SOLAIMANI, S. G.; SHAMS, S.; NAVEED, S.; HAIDER, B.; NAVEED, M.; ALI, R.; WAQAS, M. Silicon and biochar synergistically stimulate nutrients uptake, photosynthetic pigments, gaseous exchange and oxidative defense to improve maize growth under salinity. **Water, Air, & Soil Pollution**, v. 235, n. 7, p. 413, 2024.

MALIK, M. A.; HASSAN, S.; RASHID, I.; TAHIR, I. Wheat genotypes vary in efficiently using silicon to enhance growth and yield—a physiological perspective. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, v. 25, p. 3498–3507, 2025.

MARQUES, D. J.; BIANCHINI, H. C.; MACIEL, G. M.; MENDONÇA, T. F. N.; SILVA, M. F. Morphophysiological changes resulting from the application of silicon in corn plants under water stress. **Journal of Plant Growth Regulation**, v. 41, p. 569-584, 2021.

MIAO, W.; LI, F.; LU, J.; WANG, D.; CHEN, M.; TANG, L.; CHEN, W. Biochar application enhanced rice biomass production and lodging resistance via promoting co-deposition of silica with hemicellulose and lignin. **Science of the Total Environment**, v. 855, p. 158818, 2023.

MOUSAVI, S. M. Silicon and nano-silicon mediated heavy metal stress tolerance in plants. In: ETESAMI, H.; AL SAEEDI, A. H.; EL-RAMADY, H.; FUJITA, M.; PESSARAKLI, M.; HOSSAIN, M. A. **Silicon and nano-silicon in environmental stress management and crop quality improvement**. Academic Press, 2022. p. 181-191.

NADEEM, M.; ANWAR-UL-HAQ, M.; XIN, X.; SHOHAG, M. J. I.; AYUB, M. A.; AHMAD, W.; ELE, Z. Exogenous application of silica and nano silica particles improves nutrient acquisition and growth of maize (*Zea Mays* L.) under saline and water deficit conditions. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v. 56, n. 12, p. 1872–1888, 2025.

NAGGAR, M. E. E.; ABDELSALAM, N. R.; FOUDA, M. M. G.; MACKLED, M. I.; JADDADI, M. A. M. A.; ALI, H. M.; SIDDIQUI, M.H.; KANDIL, E. E. Application of nanosilica in the soil on corn productivity and its insecticidal activity against some post-harvest insects. **Nanomaterials**, v. 10, p. 739, 2020.

NASCIMENTO, C. W. A.; SOUZA, N. G. H.; PRESTON, H. A. F.; SILVA, F. B. V.; PRESTON, W.; LOUREIRO, F. L. C. Influence of silicate fertilizer on nutrient accumulation, productivity and quality of melon fruits grown in Northeast Brazil. **Silicon**, v. 12, p. 937-942, 2020.

NASCIMENTO, C. W. A.; SILVA, F. B. V. LIMA, L. H. V.; SILVA, J. R.; VELOSO, V. L.; SILVA, F. L.; FREITAS, S. T.; SANTOS, L. F.; SANTOS, M. A. Application of silicon to

the soil increases the productivity and quality of table grapes (*Vitis vinifera* L.) grown in Brazil semi-arid climate. **Silicon**, v. 15, p. 1647-1658, 2022.

OLIVA, K. M. E.; SILVA, F. B. V.; ARAÚJO, P. R. M.; OLIVEIRA, E. C. A.; NASCIMENTO, C. W. A. Amorphous silica-based fertilizer increases stalk productivity, sugar and stalk borer resistance in sugarcane grown under field conditions. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, v. 21, p. 2518-2529, 2021.

ORHUN, G. E. Corn for life. **International Journal of Food Science and Nutrition Engineering**, v. 3, p. 13-16, 2013.

PANG, Z.; YIN, W.; WANG, Y.; ZENG, W.; PENG, H.; LIANG, Y. Silicon-phosphorus pathway mitigates heavy metal stress by buffering rhizosphere acidification. **Science of the Total Environment**, v. 904, p. 166887, 2023.

PATI, S.; PAL, B.; BADOLE, S.; HAZRA, G. C.; MANDAL, B. Effect of silicon fertilization on growth, productivity and nutrient absorption by rice. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v. 47, p. 284-290, 2016.

PEREIRA, H. S.; VITTI, G. C.; KORNDORFER, G. H. Comportamento de diferentes fontes de silício no solo e na cultura do tomateiro. **Revista Brasileira de Ciência do solo**, v. 27, p. 0101-108, 2003.

PEREIRA-FILHO, I. A.; GUIMARÃES, D. P.; LANDAU, E. C.; MAGALHÃES, P. C.; SANTANA, D. P. Agência Embrapa de informação tecnológica. **Milho**: Características da espécie e relações com o ambiente. 2021. Disponível em: <https://www.embrapa.br/en/agencia-de-informacao-tecnologica/cultivos/milho/pre-producao/socioeconomia/importancia-socioeconomica>. Acesso em: 03 nov. 2023.

PÉREZ, J. J. R.; RAMOS, L. T. L.; RODRÍGUEZ, J. A. T.; ESPINOZA, F. H. R.; GARCÍA, J. C.; CALDERÓN, M. J. L.; ARELLANO, J. L. C. Agronomic analysis of two maize hybrids under the influence of a biofertilizer. **Tropical and Subtropical Agroecosystems**, v. 27, n. 3, 2024.

POONIYAN, S.; KOUR, S.; YADAV, K. K.; GORA, R.; CHADHA, D.; CHOUDHARY, S. Silicon status in soils and their benefits in crop production. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v. 54, n. 13, p. 1887-1895, 2023.

RODRIGUES, L. A.; OLIVEIRA, I. C.; NOGUEIRA, G. A.; SILVA, T. R.B.; CANDIDO, A. C. S.; ALVES, C. Z. Coating seeds with silicon enhances the corn yield of the second crop. **Revista Caatinga**, v. 32, p. 897-903, 2019.

SAENTHO, A.; SJÖSTEDT, C.; PRAKONGKEP, N.; KLYSUBUN, W.; GUSTAFSSON, J. P.; WISAWAPIPAT, W. Fate of silicon in tropical agricultural soil clays using XANES spectroscopy. **Applied Clay Science**, v. 245, p. 107145, 2023.

SAJA-GARBARZ, D.; LIBIK-KONIECZNY, M.; JANOWIAK, F. Silicon improves root functioning and water management as well as alleviates oxidative stress in oilseed rape under drought conditions. **Frontiers in Plant Science**, v. 15, p. 1359747, 2024.

SAMAL, I.; BHOI, T. K.; MAHANTA, D. K.; KOMAL, J. Establishing the role of silicon (Si) in plant resistance to insects: a bibliometric approach. **Silicon**, v. 16, n. 5, p. 2119-2128, 2024.

SANDHYA, K.; PRAKASH, N. B. Bioavailability of silicon from different sources and its effect on rice productivity in acidic, neutral and alkaline soils of Karnataka, South India. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v. 50, p. 295-306, 2019.

SHARMA, B.; KUMAWAT, K. C.; TIWARI, S.; KUMAR, A.; DAR, R. A.; SINGH, U.; CARDINALE, M. Silicon and plant nutrition-dynamics, mechanisms of transport and role of silicon solubilizer microbiomes in sustainable agriculture: a review. **Pedosphere**, v. 33, n. 4, p. 534-555, 2023.

SHANMUGAIAH, V.; GAUBA, A.; HARI, S. K.; PRASAD, R.; RAMAMOORTHY, V.; SHARMA, M. P. Effect of silicon micronutrient on plant's cellular signaling cascades in stimulating plant growth by mitigating the environmental stressors. **Plant Growth Regulation**, v. 100, n. 2, p. 391-408, 2023.

SOUZA-JUNIOR, J. P.; PRADO, R. M. SOARES, M. B.; SILVA, J. L. F.; GUEDES, V. H. F.; SARAH, M. M. S.; CAZETTA, J. O. Effect of different foliar silicon sources on cotton plants. **Plant Nutrition**, v. 21, p. 95-103, 2021.

SUJI, M.; DAVAMANI, V.; PERIYASAMY, D.; THAMBIYANNAN, S.; SUBRAMANIAN, S.; PARAMESWARI, E.; RAMASAMY, S. P.; MURUGAN, P. Silicon fertilization for carbon sequestration through PhytOC production in plants. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v. 56, n. 2, p. 292-318, 2025.

TEIXEIRA, R. S.; VENDRAME, P. R. S.; CHRISTONI, A. R. F.; SILVA, P. R. C. Química e mineralogia de um solo desenvolvido de basalto, coletado através de sondagem SPT. **Boletim de Geografia**, v. 34, p. 116-126, 2016.

TEODORO, P. E.; RIBEIRO, L. P.; CORRÊA, C. C. G.; TORRES, F. E. Desempenho de híbridos de milho sob aplicação foliar de silício no cerrado sul-mato-grossense. **Bioscience Journal**, v. 30, p. 224-231, 2014.

TOSCANO, L. C.; FERNANDES, M. A.; ROTA, M.; MARUYAMA, W. I.; ANDRADE, J. V. Híbridos de milho frente ao ataque de *Spodopera frugiperda* em associação com adubação silicatada e o efeito sobre o predador *Doru luteipes*. **Revista de Agricultura Neotropical**, v. 3, n. 1, p. 51-55, 2016.

VALIZADEH-RAD, K.; MOTESHAREZADEH, B.; ALIKHANI, H. A.; JALALI, M.; ETESAMI, H.; JAVADZARIN, I. Morphophysiological and nutritional responses of canola and wheat to water deficit stress by the application of plant growth-promoting bacteria, nano-silicon, and silicon. **Journal of Plant Growth Regulation**, v. 42, n. 6, p. 3615-3631, 2023.

WANG, B.; LIN, Z.; GAO, M.; ZHANG, G.; GENG, D.; SHI, Z. Statistical analysis of fatigue damage life of corn kernels. **INMATEH-Agricultural Engineering**, v. 69, n. 1, 2023.

WANI, A. H.; RASHID, I.; RATHER, R. A.; JOHN, R. Transporters regulate silicon uptake to make stripe rust resistant wheat genotypes more effective. **Plant Physiology and Biochemistry**, v. 217, p. 109217, 2024.

XIA, S.; SONG, Z.; FAN, Y.; LI, Z.; YU, B.; SINGH, B. P.; WANG, H. Spatial distribution patterns and controls of bioavailable silicon in coastal wetlands of China. **Plant and Soil**, v. 493, n. 1, p. 187-205, 2023.

YANG, X.; NI, Y.; LI, Z.; YUE, K.; WANG, J.; LI, Z.; YANG, X.; SONG, Z. Silicon in paddy fields: Benefits for rice production and the potential of rice phytoliths for biogeochemical carbon sequestration. **Science of the Total Environment**, v. 929, p. 172497, 2024.

4 CAPÍTULO 2

DIFERENTES GRANULOMETRIAS DE FERTILIZANTE À BASE DE SÍLICA AMORFA MELHORAM A EFICIÊNCIA FOTOSSINTÉTICA, O DESEMPENHO NUTRICIONAL E PRODUTIVO DO MILHO CULTIVADO NO CERRADO

RESUMO

Diversas fontes de silício estão sendo utilizadas na agricultura. Fertilizantes à base de sílica amorfa tem se destacado devido sua capacidade de aumentar a eficiência das adubações e baixo risco de contaminação do solo. Entretanto, a granulometria mais eficiente desses fertilizantes ainda não foi determinada. Nesse sentido, este estudo teve como objetivo avaliar diferentes formatos de sílica amorfa sobre a absorção de silício disponível pelas plantas, acúmulo de nutrientes, trocas gasosas e rendimento do milho. O ensaio foi conduzido em campo em delineamento de blocos casualizados em esquema fatorial $7 \times 2 + 1$, correspondente a 7 granulometrias, 2 doses (200 e 400 kg ha⁻¹, proporcionais a 50 e 100 kg ha⁻¹ de Si, respectivamente) e o controle (sem o uso) de um fertilizante à base de sílica amorfa, com cinco repetições. Durante o florescimento e formação da espiga foram avaliados os teores foliares de Si, P e micronutrientes, assim como as trocas gasosas e no final do ciclo da cultura foi estimada a produtividade. Os resultados demonstraram uma variação entre os dois estádios avaliados, sendo que a concentração de silício e micronutrientes quase que dobraram na fase de formação da espiga em relação a fase de florescimento em todos os tratamentos. Os tratamentos com menores tamanhos de partículas, devido à sua maior solubilidade e eficácia no aumento da acumulação de Si, garantiram uma melhor regulação das taxas de trocas gasosas, absorção de fósforo e é uma forma de Si promissor para melhorar a produtividade do milho. A fertilização com silício pode ser uma estratégia importante para otimizar a produtividade do milho embora a escolha da fonte de Si e da taxa de aplicação deva ser cuidadosamente considerada.

Palavras chave - Acúmulo de nutrientes, Desempenho fotossintético, Fontes de silício, Nutrição de plantas.

4.1 Introdução

O milho é umas das culturas de maior importância socioeconômica mundial, sendo cultivado principalmente no continente americano (Li *et al.*, 2025). No Brasil, seu cultivo tem enfrentado desafios relacionados as mudanças climáticas, principalmente, associado ao aumento de temperaturas e variações na frequência e intensidade das chuvas (Vieira *et al.*, 2021; Araújo *et al.*, 2024; CONAB, 2025).

Além disso, as áreas de produção de milho situadas nas novas fronteiras agrícolas do país apresentam solos com limitações químicas como baixa fertilidade, alto nível de acidez e baixa capacidade de troca catiônica que associados a eventos de déficit hídrico e estresses bióticos que são comuns nestas áreas, afetam diretamente o crescimento, produtividade e o desenvolvimento das plantas (Aparecido *et al.*, 2023; Ferreira *et al.*, 2024; Santos *et al.*, 2024). Estas condições estressantes podem afetar o estabelecimento da cultura quando ocorrem após o plantio e quando ocorrem nos estádios de florescimento e enchimento dos grãos, diminuem significativamente a produtividade (Zilli *et al.*, 2020; Wang *et al.*, 2020).

Dessa forma, a busca por estratégias de manejo alternativos vêm sendo traçadas com o intuito de minimizar os efeitos negativos desses agentes, como o uso de elementos benéficos para o desenvolvimento vegetal, capazes de atenuarem os efeitos deletérios destes fatores (Singhal *et al.*, 2023; Kaur *et al.*, 2023). Nesse sentido, ganha destaque o silício, que apesar de não ser definido como nutriente, tem seu papel como um elemento responsável por diminuir os danos dos estresses bióticos e abióticos bem estabelecido (Irfan *et al.*, 2023; Hassan *et al.*, 2024).

A aplicação de silício traz efeitos positivos contra os danos provocados pelo déficit hídrico (Leite *et al.*, 2023; Teixeira; Prado, 2023), aumenta a resistência das plantas contra pragas e doenças (Islam *et al.*, 2023a; Oliveira *et al.*, 2023a; Chen *et al.*, 2024), impactando em maior acúmulo de nutrientes (Rizwan *et al.*, 2023; Raza *et al.*, 2023; Thakral *et al.*, 2024), atua na indução de tolerância a toxidade por metais pesados em plantas (Alatawi *et al.*, 2023; Feng *et al.*, 2023; Oliveira *et al.*, 2023b) e por alumínio (Dar *et al.*, 2024; Wang; Cheng; Wei, 2024; Yoshida *et al.*, 2025), culminando em ganhos significativos de produtividade (Gou *et al.*, 2023; Islam *et al.*, 2023b; Karvar *et al.*, 2023).

A suplementação com Si promove melhoria em diversos processos fisiológicos, aumentando a biossíntese de pigmentos fotossintéticos, fortalecendo o sistema de defesa antioxidante das plantas, aumentando a integridade estrutural das células e aprimorando o

metabolismo fotossintético, por meio da melhoria na absorção e no transporte de água, regulação da abertura estomática e perda de água por transpiração, (Shi *et al.*, 2016; Verma *et al.*, 2020; Silva *et al.*, 2023a; Queiroz *et al.*, 2025).

Fertilizantes à base de sílica amorfa (ASF) são produzidos a partir de rochas sedimentares formadas pelo acúmulo de organismos conhecidos como diatomáceas ricas em sílica amorfa (Nascimento *et al.*, 2021; Nascimento *et al.*, 2023). Estes fertilizantes apresentam maior solubilidade que outras fontes de silício, proporcionando acréscimos no potencial de retenção de água e nutrientes quando aplicado no solo (Silva *et al.*, 2023b; Hernández *et al.*, 2025). No entanto, estudos visando determinar quais as granulometrias dos fertilizantes diatomáceos que são mais eficientes em promover maior absorção de silício e nutrientes pelas plantas ainda são incipientes. Nesse sentido, é necessário compreender melhor as diferenças na composição química e na granulometria das fontes de terra diatomácea utilizadas nos fertilizantes, a fim de aprimorar sua eficiência agronômica.

Neste contexto, a pesquisa em questão avaliou a hipótese de que granulometrias com menores tamanhos de partículas e solubilidade de fertilizante de sílica amorfa apresentam melhores respostas em relação ao crescimento, desenvolvimento e produtividade do milho cultivado em solo arenoso no Cerrado. Para tal, estabeleceu-se o objetivo de avaliar o efeito de diferentes granulometrias de sílica amorfa sobre a absorção de silício, acúmulo de nutrientes, trocas gasosas e rendimento do milho cultivado em solo arenoso no Cerrado.

4.2 Material e Métodos

4.2.1 Área de estudo

O ensaio de campo foi desenvolvido entre os meses de dezembro de 2023 e maio de 2024 em uma área de produção de grãos da Fazenda Estrela, pertencente ao Grupo Piovesan, sob as seguintes coordenadas geográficas: 9°13'33'' S, 44°54'57,84'' W, altitude de 663 metros, localizada na Serra do Quilombo, zona rural do município de Bom Jesus, estado do Piauí, Brasil. A área de estudo tinha solo identificado como Latossolo Amarelo Distrófico (Pragana *et al.*, 2016).

O município de Bom Jesus apresenta clima classificado como Aw de acordo com dados Köppen, clima tropical com chuvas acontecendo na estação de verão e inverno seco, com média de 26,2 °C de temperatura ao longo do ano e índice de precipitação de 984,8 mm anual, podendo variar de 900 a 1200 mm ano⁻¹ (Holanda; Medeiros, 2019).

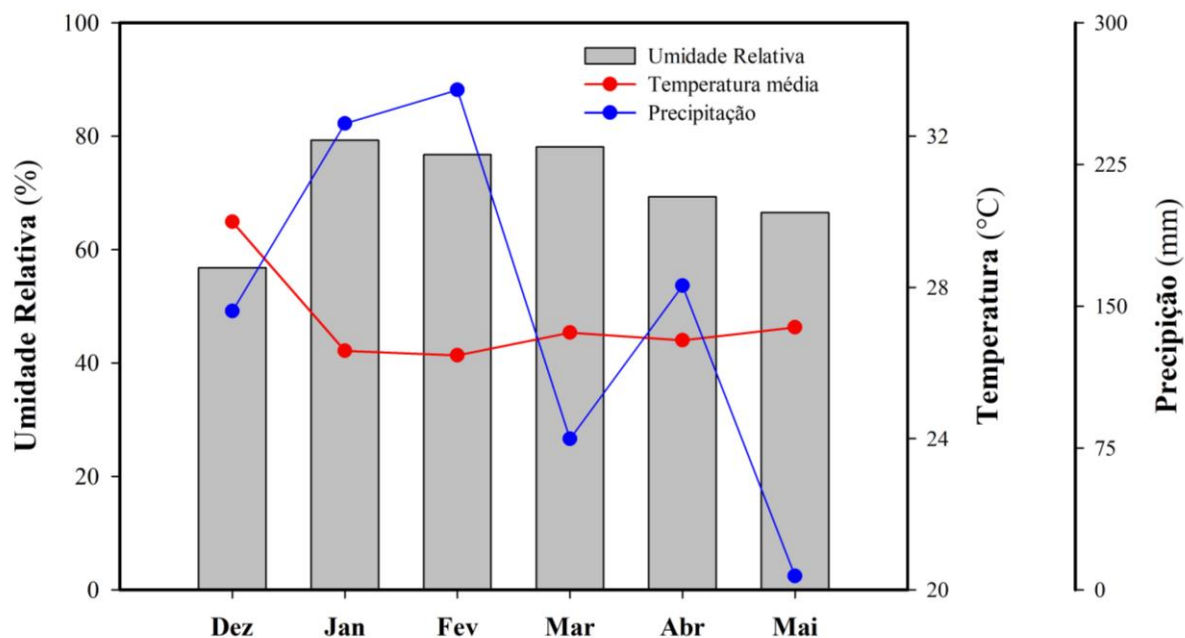


Figura 1 - Dados de temperatura (°C), umidade relativa do ar (%) e precipitação (mm), no período de realização do experimento, com base em dados recuperados do Instituto Nacional de Meteorologia - INMET.

4.2.2 Coleta e análise de solo da área do experimento

Antes da implementação do ensaio de campo coletou-se amostras de solo na camada de 0 - 20 cm, dentro da área destinada as parcelas experimentais, utilizando um trado de aço inoxidável, formando uma amostra composta de aproximadamente 500 gramas, para a caracterização química e física do solo. Em seguida, as amostras foram colocadas em sacos plásticos e identificadas para envio ao laboratório.

Após a chegada ao laboratório secou-se as amostras ao ar, sendo feita a homogeneização e peneiração em malha de 2 mm de aço inox. Realizou-se a caracterização química e física do solo de acordo com a metodologia de Teixeira *et al.* (2017) (Tabela 1). A concentração de silício nessa camada de solo foi determinada seguindo a metodologia descrita por Korndörfer, Pereira e Nolla (2004), sendo que o silício presente no solo foi extraído com soluções de CaCl₂ 0,01 mol L⁻¹ e ácido acético 0,5 mol L⁻¹ e determinado por colorimetria. Ambos os extratores

indicaram baixa disponibilidade de Si, característico de regiões tropicais de solos altamente intemperizados, indicando um solo com possível resposta a suplementação com silício (Zellner *et al.*, 2021).

Tabela 1 - Características químicas e granulometria do solo na profundidade 20 cm antes da implementação do experimento.

pH em água	P	K	Ca	Mg	Na	Al	H + Al	SB	CTC	V	m
1:2,5	mg dm ⁻³	cmol _c dm ⁻³						cmol _c dm ⁻³		%	
6,6	6,3	0,13	1,4	0,33	0,05	0,1	4,1	1,91	6,01	31,78	4,97
B	Cu	Mn	Fe	Zn	Si _a	Si _c	COS	Areia	Silte	Argila	
mg dm ⁻³					g kg ⁻¹						
-	0,15	4,66	58,99	1,71	10,5	8,4	2,6	710	90	200	

Note = SB (Soma de Bases); T (Capacidade de Troca de Cátions); V (Saturação por Bases); m (Saturação por alumínio); COS (carbono orgânico do solo), Si_a (silício disponível no solo extraído com ácido acético 0,5 mol L⁻¹), Si_c (silício disponível no solo extraído com CaCl₂ 0,01 mol L⁻¹).

4.2.3. Descrição das granulometrias avaliadas

Foi analisada a solubilidade dos grupos de fontes de silício fornecidos. O silício solúvel foi extraído utilizando solução de Na₂CO₃ + NH₄NO₃ e determinado por espectrofotometria UV-VIS após digestão alcalina induzida por autoclavagem, constatando que as granulometrias 70:30, 60:40, 40:60 e 30:70 Agrimax, respectivamente, apresentaram uma concentração de silício solúvel cerca de 8, 25, 15 e 34 vezes maior do que as outras formas (Figura 2). Os teores totais de silício foram medidos por um equipamento portátil de fluorescência de raios X.

4.2.4 Instalação do experimento

As sementes do milho híbrido 30F53 VYHR foram semeadas com distância de 0,5 m entre as linhas de plantas com 3 plantas por metro linear, totalizando uma população de 60 mil plantas ha⁻¹. A calagem foi realizada por meio da aplicação de 12 t ha⁻¹ de calcário dolomítico incorporado com grade, seguida da aplicação de 1 t ha⁻¹ de gesso, pois área ainda não havia sido cultivada em outros anos. A adubação foi realizada com 670 kg ha⁻¹ de superfosfato simples

aplicados a lanço e incorporado, 200 kg ha⁻¹ de cloreto de potássio, sendo que 50% da dose foi aplicada a lanço em pré-plantio e o restante em cobertura, 200 kg ha⁻¹ de ureia aplicados e incorporado em pré-plantio, 100 kg ha⁻¹ de sulfato de amônio aplicados a lanço em cobertura, 25 kg ha⁻¹ do fertilizante FTE MIB (1,8% B, 0,8% Cu, 3,0 Fe, 2,0% Mn e 9,0% Zn), 30 kg ha⁻¹ do fertilizante MidaS (Enxofre partilhado). Durante todas as fases de crescimento das plantas foram aplicados, herbicidas, fungicidas e inseticidas.

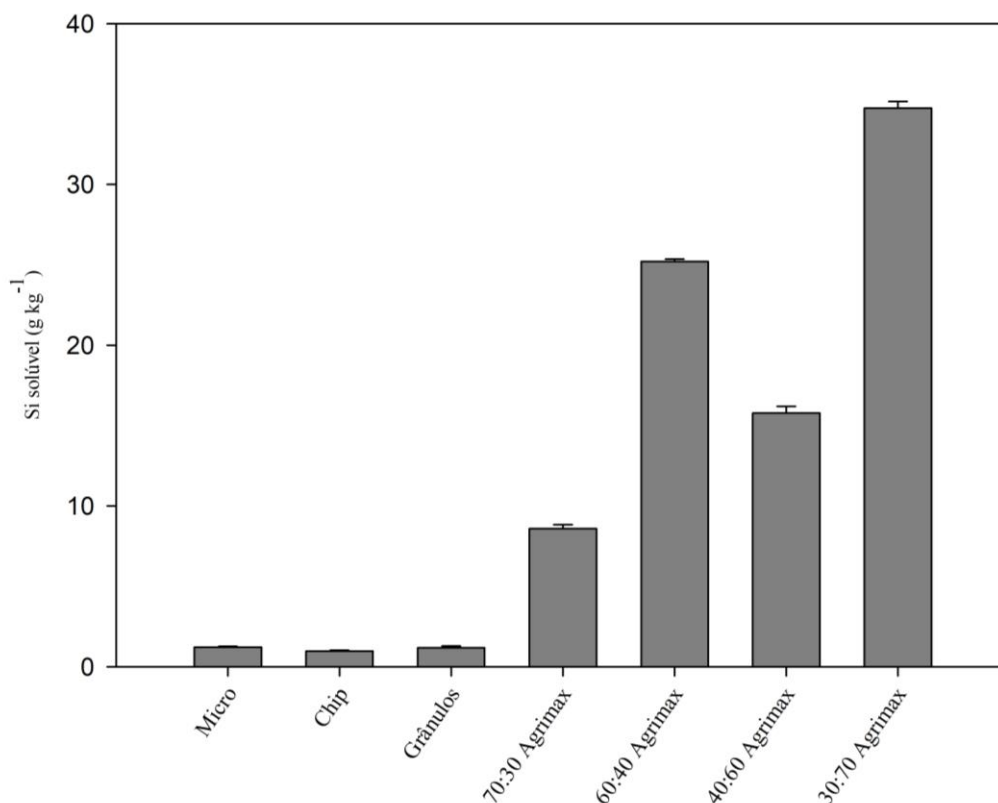


Figura 2 - Valores médios de silício solúvel em solução de carbonato de sódio (Na₂CO₃) e nitrato de amônio (NH₄NO₃) nas diferentes granulometrias do fertilizante à base de sílica amorfa utilizado.

4.2.5 Design experimental e tratamentos

O experimento no campo foi implementado em delineamento de blocos ao acaso em esquema fatorial 7 x 2 + 1, correspondente a 7 granulometrias do fertilizante a base de sílica amorfa (AgrisilicaTM, Agripower Australia Limited) (Tabela 2), fabricado de terra natural (material sedimentar) de diatomáceas da espécie *Melosira granulata*, 2 doses (200 e 400 kg ha⁻¹, proporcionais a 50 e 100 kg ha⁻¹ de Si) e o controle (sem aplicação do fertilizante), com

cinco repetições. Os tratamentos foram aplicados junto com a semente no momento da semeadura.

Tabela 2 - Caracterização das diferentes granulometrias dos fertilizantes utilizados no experimento.

Descrição do tratamento	Si	Al	P	K	Ca	Mg	Fe	Mn	Tamanho de partículas
	-----%-----								
Micro	22,86	5,60	0,05	0,25	2,41	1,18	3,21	0,03	<100 µm
Chip	22,81	5,30	0,04	0,22	2,21	1,21	2,66	0,02	2-8 mm
Grânulo	22,00	5,60	0,04	0,26	2,12	1,34	4,54	0,02	2-5 mm
70:30 Agrimax	24,2	5,10	0,05	2,97	1,88	1,30	2,20	0,01	<100 µm
60:40 Agrimax	23,52	5,63	0,04	1,79	2,30	1,29	2,55	0,02	<100 µm
40:60 Agrimax	24,58	5,26	0,05	2,90	2,07	1,11	2,25	0,01	<100 µm
30:70 Agrimax	24,4	5,06	0,05	3,62	1,73	1,29	2,10	0,01	<100 µm

4.2.6 Amostragem e análise foliar

No florescimento e na formação da espiga foram coletadas folhas diagnose (folha presente na base da inflorescência feminina) das plantas presentes dentro da parcela amostral (Sousa; Lobato, 2004). As folhas foram depositadas em sacos de papel e em sacos plásticos, acondicionadas em isopor com gelo e encaminhadas ao laboratório, onde foram removidas as nervuras centrais e as extremidades das folhas, mantendo-se apenas o terço central (Malavolta; Vitti; Olivieira, 1997). Este material foi colocado novamente nos sacos de papel e depositados em estufa de circulação de ar forçado até o momento que atingissem massa constante que normalmente ocorre 72 horas após o início do processo, sendo realizada a pesagem diária do material para acompanhar o processo.

Em seguida, as amostras foliares secas foram moídas em moinho de facas do tipo Wiley, peneirados (em peneiras de malha de 0,5 mm) e armazenados para posterior análise de silício, fósforo e micronutrientes. Amostras de os limbos foliares foram digeridas em micro-ondas modelo Mile - stone Ethos Easy, contendo uma solução ácida ($\text{HNO}_3 + \text{HCl}$) a uma temperatura aproximada de 175 °C por um período de 10 minutos. Em seguida, os extratos obtidos foram filtrados em malhas de diâmetro inferior a 2,0 µm e diluídos com 25 mL de água destilada.

A concentração de fósforo (P) e micronutriente, ferro (Fe), manganês (Mn), cobre (Cu) e zinco (Zn), encontradas nas foram medidos por ICP-OES (Perkin Elmer 7000 DV). Por fim, a concentração de silício (Si) nas folhas foi definido por meio da metodologia de Elliot e Snyder

(1991), em que inicialmente é feita a digestão induzida por autoclave, seguida pela determinação por colorimetria.

4.2.7 Análises de trocas gasosas

As trocas gasosas foram mensuradas duas vezes durante a execução do experimento no florescimento e na formação da espiga, sendo as medidas realizadas na folha diagnose, no período de 8:00 as 10:00 horas, utilizando um equipamento de análise gasosa por infravermelho (IRGA, Walz - GFS3000, Effeltrich, Alemanha) com fluorômetro acoplado. As medições foram realizadas em plantas individuais, apenas nos tratamentos que receberam a dose de 200 kg ha⁻¹, utilizando uma densidade de fluxo de fótons fotossintéticos (PPFD) de 1000 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ e uma concentração interna de CO₂ de 400 ppm. Nesse sentido, foi medida a fotossíntese líquida (A), transpiração (E), condutância estomática (gs) e a concentração interna de CO₂ (Ci). A partir desses dados obtidos foram calculadas a eficiência de carboxilação da ribulose -1,5-bisfosfato carboxilase/oxigenase (Rubisco) (A/Ci), a eficiência intrínseca do uso da água (A/gs) e a eficiência instantânea do uso da água (A/E).

4.2.8 Estimativa de produtividade

No momento da colheita, foram coletadas espigas de maneira manual das plantas presentes dentro da parcela experimental, depositadas em sacos plásticos e encaminhadas ao laboratório, onde foram avaliados o diâmetro da espiga - DE (utilizando parquímetro digital), comprimento da espiga - CE (utilizando fita métrica) e o número de linhas de grãos - NLG. Em seguida, as espigas foram debulhadas para a determinação da massa total de grãos (utilizando balança de precisão), a produtividade foi estimada pela ponderação da massa dos grãos de todas as espigas coletadas nas parcelas e transformada para quilos de grãos por hectare. Foi determinada a umidade (%) de cada lote de amostras de grãos e corrigidas a 13% (Kappes; Arf; Andrade, 2013).

4.2.9 Análises estatísticas

Foi calculada a médias e desvio padrão para todas as variáveis do estudo. Os dados foram testados quanto aos pressupostos da análise de variância e quando necessário estes foram submetidos a transformações logarítmicas e de raiz quadrada. Depois, realizou-se à análise de variância (ANOVA) a partir do teste F ($p \leq 0,05$). E quando encontrados diferenças significativas a comparação das médias foi feita por meio do teste de Scott-Knott, ao nível de 5% de probabilidade. As análises estatísticas foram efetuadas no ambiente do *software* R, versão 4.3.1 (R Core Team, 2023, Viena, Áustria). A elaboração dos gráficos foi feita no ambiente do *software* sigmaPlot, versão 11.0 (SystatSoftware inc., 2007).

4.3 Resultados

4.3.1 Teores de silício e nutrientes nas folhas de milho

A suplementação com silício resultou em aumentos significativos na concentração foliar de silício do milho no estágio de florescimento, com os maiores níveis (cerca de 0,7%) observados nos tratamentos 60:40 Agrimax, 40:60 Agrimax e 30:70 Agrimax, com doses de 200 e 400 kg ha⁻¹. O teste de Skott-Knott ($p \leq 0,05$) confirmou diferenças significativas, evidenciando o forte efeito tanto do tipo de tratamento quanto da dose aplicada. As menores concentrações de Si (cerca de 0,3%) foram encontradas no tratamento controle (Figura 3a).

Na Figura 3b, um padrão semelhante foi observado para as concentrações de silício (Si) nas folhas do milho durante o estágio de formação da espiga, em que os níveis de Si praticamente dobraram em comparação ao estágio de florescimento. Nesse estágio, os tratamentos 60:40 Agrimax e 40:60 Agrimax com dose de 400 kg ha⁻¹, promoveram as maiores concentrações foliares de Si, com aproximadamente 1,5%. Diferentemente do estágio de florescimento, foi observada uma diferença significativa na concentração de Si entre as doses aplicadas, para estes dois tratamentos citados anteriormente, sendo que os dois tratamentos na dose 400 kg ha⁻¹, apresentaram a maior concentração de Si foliar (Figura 3b).

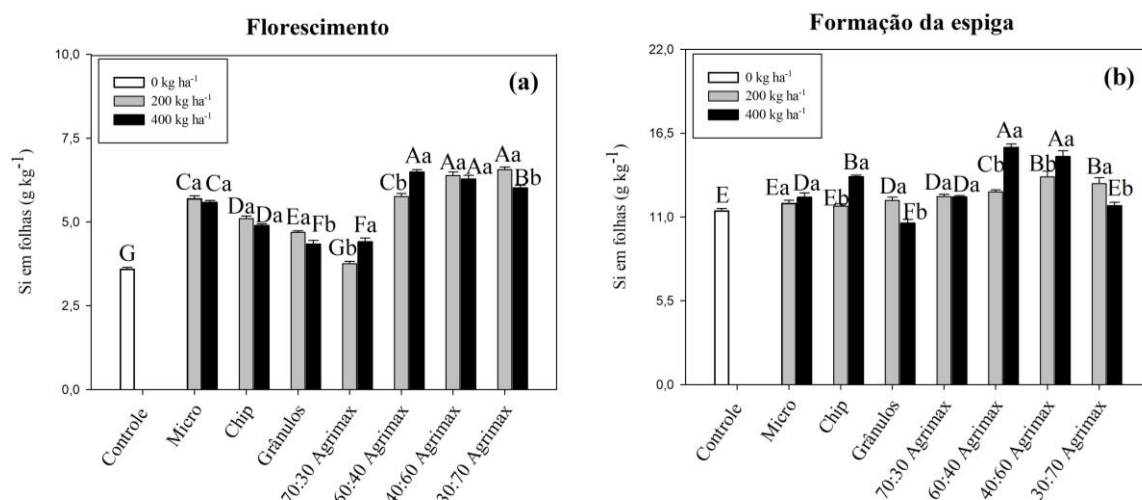


Figura 3 - Concentração de silício nas folhas de milho nos dois estádios avaliados submetidas a diferentes granulometrias de fertilizante a base de sílica amorfa, incluindo o controle e duas doses do fertilizante (200 e 400 kg ha⁻¹). As letras acima das barras representam os resultados do teste de Scott–Knott ao nível de 5% de significância, indicando os agrupamentos estatísticos, em que as letras maiúsculas comparam granulometrias na mesma dose e letras minúsculas comparam doses na mesma granulometria.

Para o fósforo, as granulometrias pó micronizado (Micro) e Chip na dose de 400 kg ha⁻¹, juntamente com o tratamento 60:40 Agrimax com 200 kg ha⁻¹, apresentaram os maiores teores de P nas folhas, seguidos pelos tratamentos 70:30 Agrimax, 40:60 Agrimax e 30:70 Agrimax com 400 kg ha⁻¹ durante o estágio de florescimento (Figura 4a).

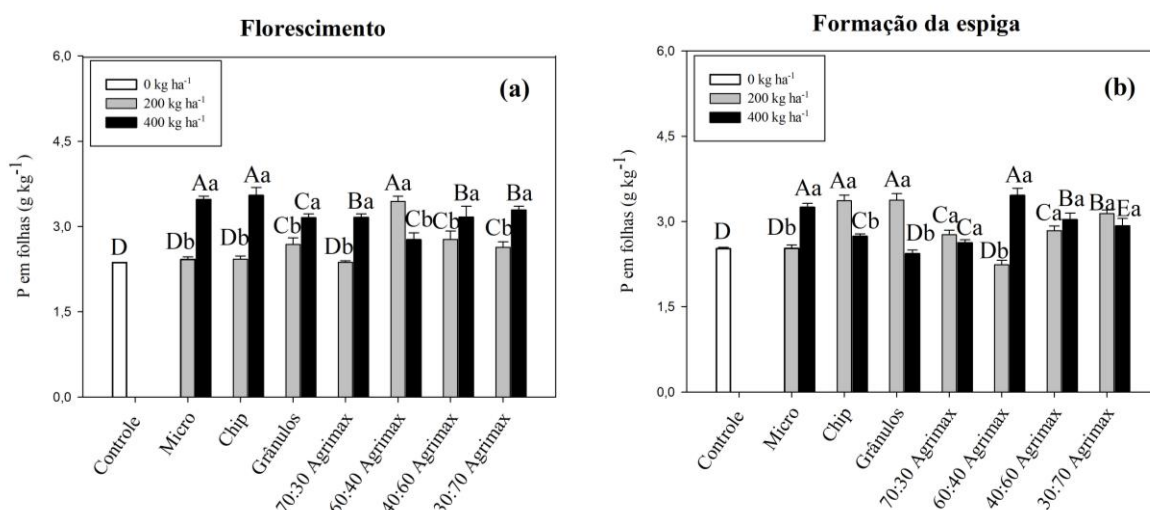


Figura 4 - Concentração de fósforo nas folhas de milho nos dois estádios avaliados submetidas a diferentes granulometrias de fertilizante a base de sílica amorfa, incluindo o controle e duas doses do fertilizante (200 e 400 kg ha⁻¹). As letras acima das barras representam os resultados do teste de Scott–Knott ao nível de 5% de significância, indicando os agrupamentos estatísticos, em que as letras maiúsculas comparam

granulometrias na mesma dose e letras minúsculas comparam doses na mesma granulometria.

O mesmo comportamento foi observado durante o estágio de formação da espiga, com os tratamentos pó micronizado (Micro) e 60:40 Agrimax na dose de 400 kg ha⁻¹ e para os tratamentos Chip e Grânulos na dose de 200 kg ha⁻¹ apresentando as maiores concentrações de P, seguidos pelos tratamentos 40:60 Agrimax na dose de 400 kg ha⁻¹ e 30:70 Agrimaz na dose de 200 kg ha⁻¹ (Figura 4b).

Em relação aos micronutrientes, não foram observadas diferenças significativas nas concentrações de micronutrientes foliares entre o controle e os tratamentos avaliados em ambos os períodos de amostragem (Tabelas 3 e 4).

Assim como ocorreu para as concentrações de silício, a concentração de micronutrientes quase que dobraram do estágio de florescimento para o estágio de formação da espiga (Tabela 3 e 4). Em geral, a dose de 400 kg ha⁻¹, garantiu as maiores concentrações foliares de micronutrientes, em ambos os estádios de amostragem.

Tabela 3 - Concentração de micronutrientes na folha diagnose de plantas de milho, no estágio de florescimento, submetidas a diferentes doses e granulometrias de fertilizantes a base de sílica amorfa.

Tratamentos	Dose de Si kg ha ⁻¹											
	0	200	400	0	200	400	0	200	400	0	200	400
	Fe mg kg ⁻¹			Cu mg kg ⁻¹			Mn mg kg ⁻¹			Zn mg kg ⁻¹		
Controle	251.3*	-	-	6.7*	-	-	68.6*	-	-	43*	-	-
Micro	-	256.6ABa ^{ns}	320.6Ba ^{ns}	-	6.7BCb ^{ns}	10.7ABCa ^{ns}	-	67.6ABa ^{ns}	74.3Aa ^{ns}	-	55.3Ba ^{ns}	50Ca ^{ns}
Chip	-	363Aa ^{ns}	440ABa ^{ns}	-	7.3ABCb ^{ns}	10BCa ^{ns}	-	67.3ABa ^{ns}	72.3Aa ^{ns}	-	54Ba ^{ns}	46Cb ^{ns}
Grânulos	-	288ABb ^{ns}	436.6ABa ^{ns}	-	6.3Ca ^{ns}	9.3CDa ^{ns}	-	60.3Bb ^{ns}	71.6Aa ^{ns}	-	40.3Cb ^{ns}	62.6ABa ^{ns}
70:30 Agrimax	-	306.3ABb ^{ns}	490.3Aa ^{ns}	-	8ABb ^{ns}	11.7Aa ^{ns}	-	73Aa ^{ns}	74Aa ^{ns}	-	66Aa ^{ns}	63.3ABa ^{ns}
60:40 Agrimax	-	315.6ABa ^{ns}	326.6Ba ^{ns}	-	7.3ABCa ^{ns}	7.7Ea ^{ns}	-	78.6Aa ^{ns}	81Aa ^{ns}	-	69Aa ^{ns}	56BCb ^{ns}
40:60 Agrimax	-	293ABa ^{ns}	331Ba ^{ns}	-	8.7Aa ^{ns}	8DEa ^{ns}	-	75.6Aa ^{ns}	77.6Aa ^{ns}	-	68Aa	66ABa
30:70 Agrimax	-	217.3Bb ^{ns}	397.6ABa ^{ns}	-	8.3Aa ^{ns}	11ABa ^{ns}	-	78Aa ^{ns}	82.3Aa ^{ns}	-	60.6ABa ^{ns}	67Aa ^{ns}
CV (%)	14.71			7.9			6.1			7.01		

Note = *Valores correspondentes ao tratamento controle (sem aplicação de Si). Médias seguidas pela mesma letra maiúscula na mesma coluna não apresentaram diferença estatística entre si pelo teste de Tukey ($p \leq 0,05$). Da mesma forma, médias acompanhadas pela mesma letra minúscula na mesma linha não apresentam diferenças estatística entre si pelo teste de Tukey ($p \leq 0,05$). ^{ns}Médias que não diferem estatisticamente do tratamento controle pelo teste de Dunnett ($p < 0,05$).

Tabela 4 - Concentração de micronutrientes na folha diagnose de plantas de milho, no estágio de formação da espiga, submetidas a diferentes doses e granulometrias de fertilizantes a base de sílica amorfa.

Tratamentos	Dose de Si kg ha ⁻¹											
	0	200	400	0	200	400	0	200	400	0	200	400
	Fe mg kg ⁻¹			Cu mg kg ⁻¹			Mn mg kg ⁻¹			Zn mg kg ⁻¹		
Controle	579.6*	-	-	6.6*	-	-	162*	-	-	70*	-	-
Micro	-	580.9ABb ^{ns}	697.6Aa ^{ns}	-	6.6BCb ^{ns}	10.6ABCa ^{ns}	-	168.6BCb ^{ns}	270.1Aa ^{ns}	-	84.7ABb ^{ns}	115.7Aa ^{ns}
Chip	-	647.5ABa ^{ns}	676.6Aa ^{ns}	-	7.3ABCb ^{ns}	10BCa ^{ns}	-	150CDa ^{ns}	170.8Ba ^{ns}	-	68.8BCa ^{ns}	77Ca ^{ns}
Grânulos	-	533.4Bb ^{ns}	793.3Aa ^{ns}	-	6.3Cb ^{ns}	9.3CDa ^{ns}	-	148.5CDa ^{ns}	174.6Ba ^{ns}	-	85.5ABa ^{ns}	86BCa ^{ns}
70:30 Agrimax	-	550.3ABa ^{ns}	484.3Ba ^{ns}	-	8ABb ^{ns}	11.6Aa ^{ns}	-	231Ba ^{ns}	178.8Bb ^{ns}	-	79ABCa ^{ns}	79.1Ca ^{ns}
60:40 Agrimax	-	662.1Ab ^{ns}	792Aa ^{ns}	-	7.3ABC ^{ns} a	7.6Ea ^{ns}	-	203.1Bb ^{ns}	274.3Aa ^{ns}	-	63Cb ^{ns}	115.4Aa ^{ns}
40:60 Agrimax	-	622.4ABa ^{ns}	477.8Bb ^{ns}	-	8.6Aa ^{ns}	8DEa ^{ns}	-	135.2Db ^{ns}	190.2Ba ^{nsns}	-	74.4BCb ^{ns}	93.1BCa ^{ns}
30:70 Agrimax	-	554.6ABa ^{ns}	433.1Bb ^{ns}	-	8.3Ab ^{ns}	11ABa ^{ns}	-	293.2Aa ^{ns}	209.2Bb ^{ns}	-	93.3Aa ^{ns}	96.4Ba ^{ns}
CV (%)	7.72			7.19			9.49			7.65		

Note = *Valores correspondentes ao tratamento controle (sem aplicação de Si). Médias seguidas pela mesma letra maiúscula na mesma coluna não apresentaram diferença estatística entre si pelo teste de Tukey ($p \leq 0,05$). Da mesma forma, médias acompanhadas pela mesma letra minúscula na mesma linha não apresentam diferenças estatística entre si pelo teste de Tukey ($p \leq 0,05$). ^{ns}Médias que não diferem estatisticamente do tratamento controle pelo teste de Dunnett ($p < 0,05$).

4.3.2 Eficiência fotossintética

No estágio de florescimento foi observado uma regulação distinta nas taxas de fotossíntese líquida entre os diferentes tratamentos, de modo que, os tratamentos pó micronizado (Micro), 70:30 Agrimax e 40:60 Agrimax, promoveram as maiores taxas de fotossíntese líquida (Figura 5a). A regulação das taxas de transpiração e condutância estomática ocorreu de forma bastante similar, em ambos os casos o tratamento pó micronizado (Micro), seguindo dos tratamentos Chip e Grânulos, levaram as maiores taxas de transpiração e condutância estomática (Figura 5b, c).

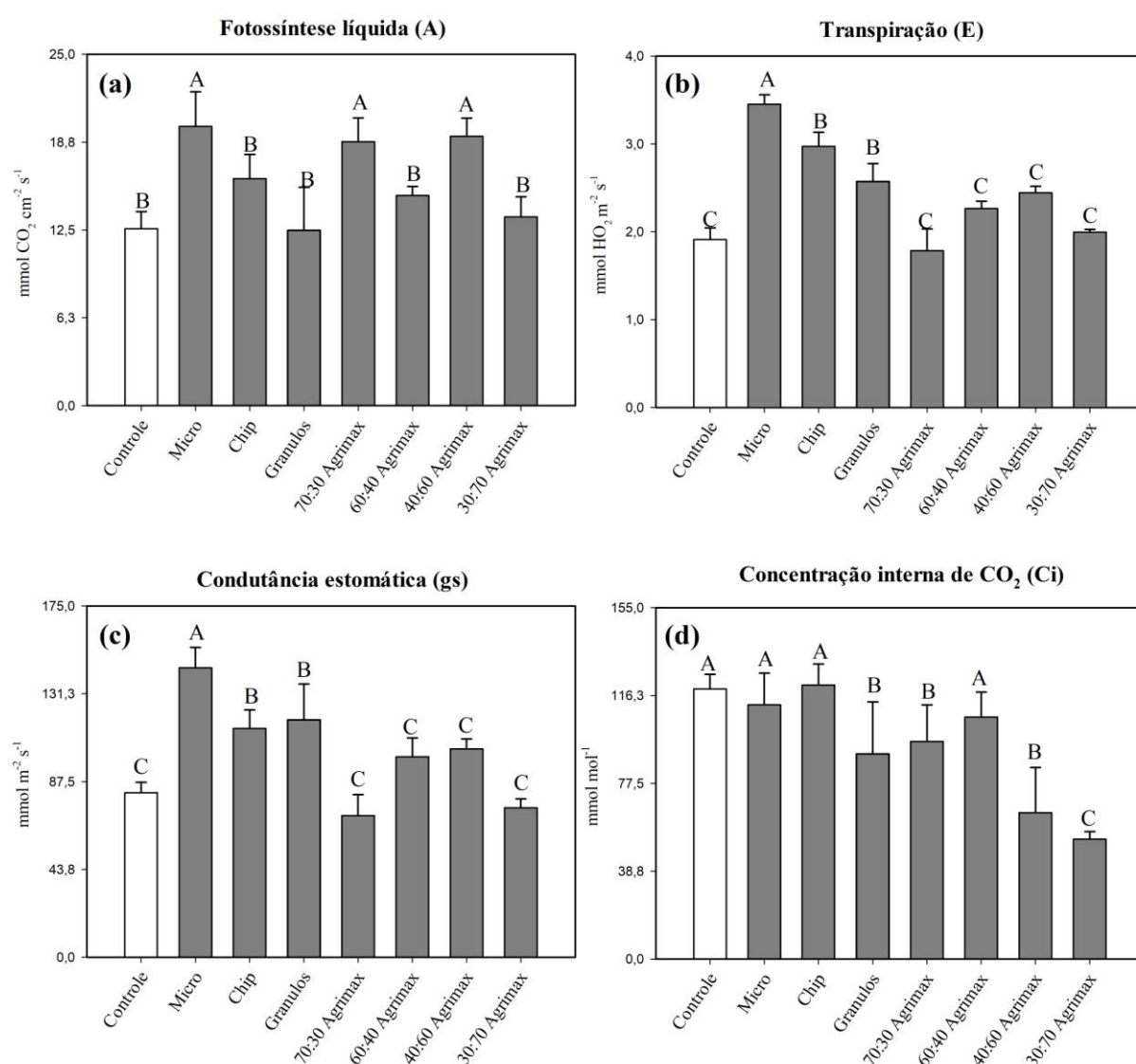


Figura 5 - Taxa de fotossíntese líquida (A, a), transpiração (E, b), condutância estomática (gs, c) e concentração interna de CO₂ (Ci, d) de plantas de milho, no estágio florescimento, submetidas a diferentes granulometrias de fertilizante a base de sílica

amorfa, incluindo o controle e a dose de silício (200 kg ha^{-1}). As letras acima das barras representam os resultados do teste de Scott–Knott ao nível de 5% de significância, indicando os agrupamentos estatísticos.

Observou-se uma diminuição na concentração interna de CO_2 nos tratamentos Grânulos, 70:30 Agrimax, 40:60 Agrimax e 30:70 Agrimax em comparação ao controle (Figura 5d). Por outro lado, apenas o tratamento 40:60 Agrimax, garantiu a maior eficiência de carboxilação da Rubisco (A/Ci) (Figura 6a).

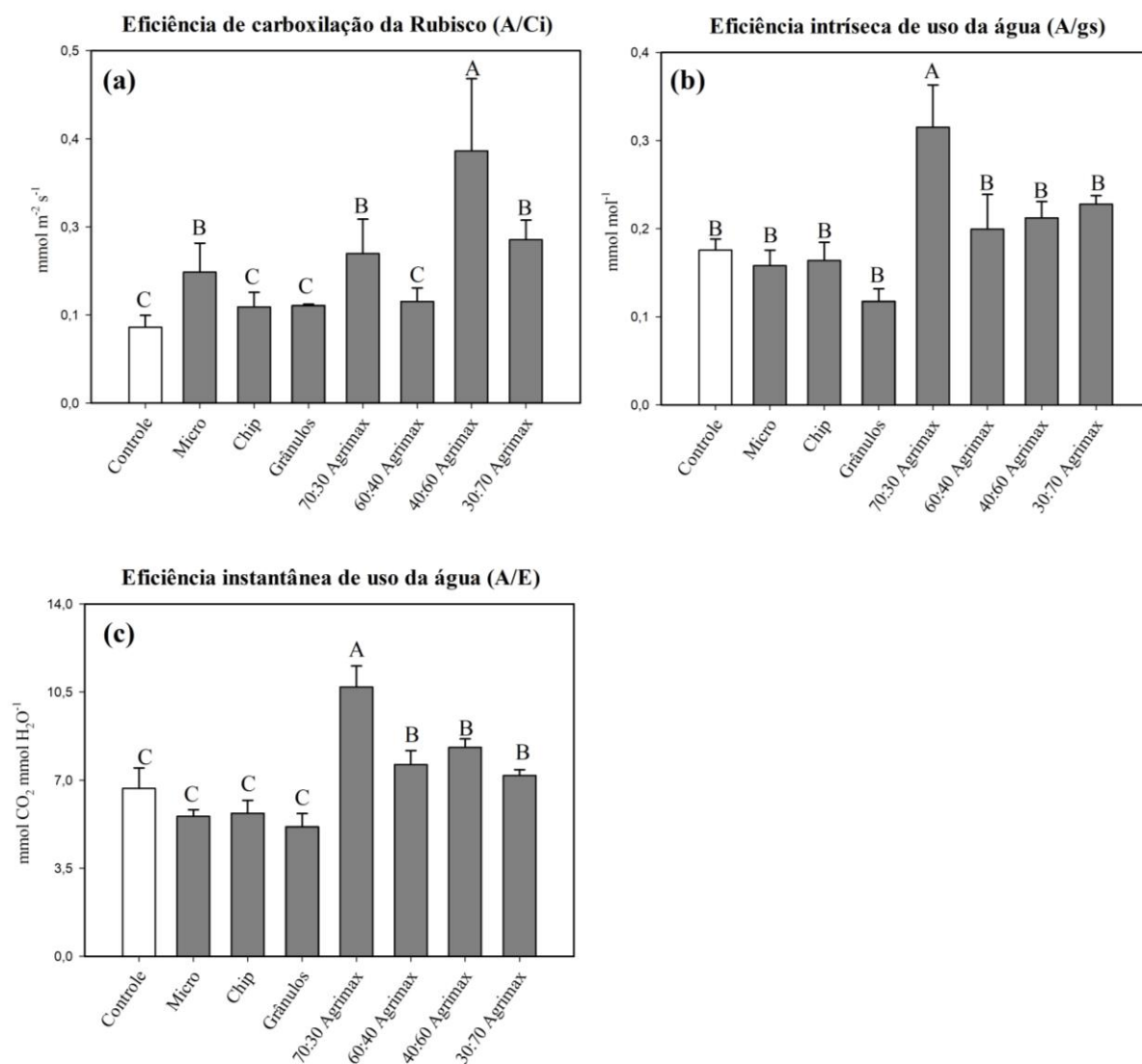


Figura 6 - Eficiência de carboxilação da Rubisco (A/Ci, a), eficiência intrínseca de uso da água (A/gs, b) e eficiência instantânea de uso da água (A/E, c) em plantas de milho, no estágio florescimento, submetidas a diferentes granulometrias de fertilizante a base de sílica amorfa, incluindo o controle e uma dose de silício (200 kg ha^{-1}). As letras acima das barras representam os resultados do teste de Scott–Knott ao nível de 5% de significância, indicando os agrupamentos estatísticos.

Os diferentes tratamentos não impactaram significativamente a eficiência intrínseca de uso da água A/g_s , exceto para o tratamento 70:30 Agrimax, que apresentou os maiores valores de (A/g_s) em relação aos demais tratamentos (Figura 6b). Para a eficiência instantânea de uso da água (A/E) , o mesmo comportamento foi observado, em que apenas o tratamento 70:30 Agrimax, promoveu maiores taxas de (A/E) (figura 6c).

No estágio de formação da espiga os tratamentos pó micronizado (Micro), Chip, Grânulos, 60:40 Agrimax e 30:70 Agrimax, promoveram as maiores taxas de fotossíntese líquida (A) (Figura 7a). Diferentemente, apenas os tratamentos pó micronizado (Micro) e Chip, ocasionaram as maiores taxas de transpiração (E) (Figura 7b).

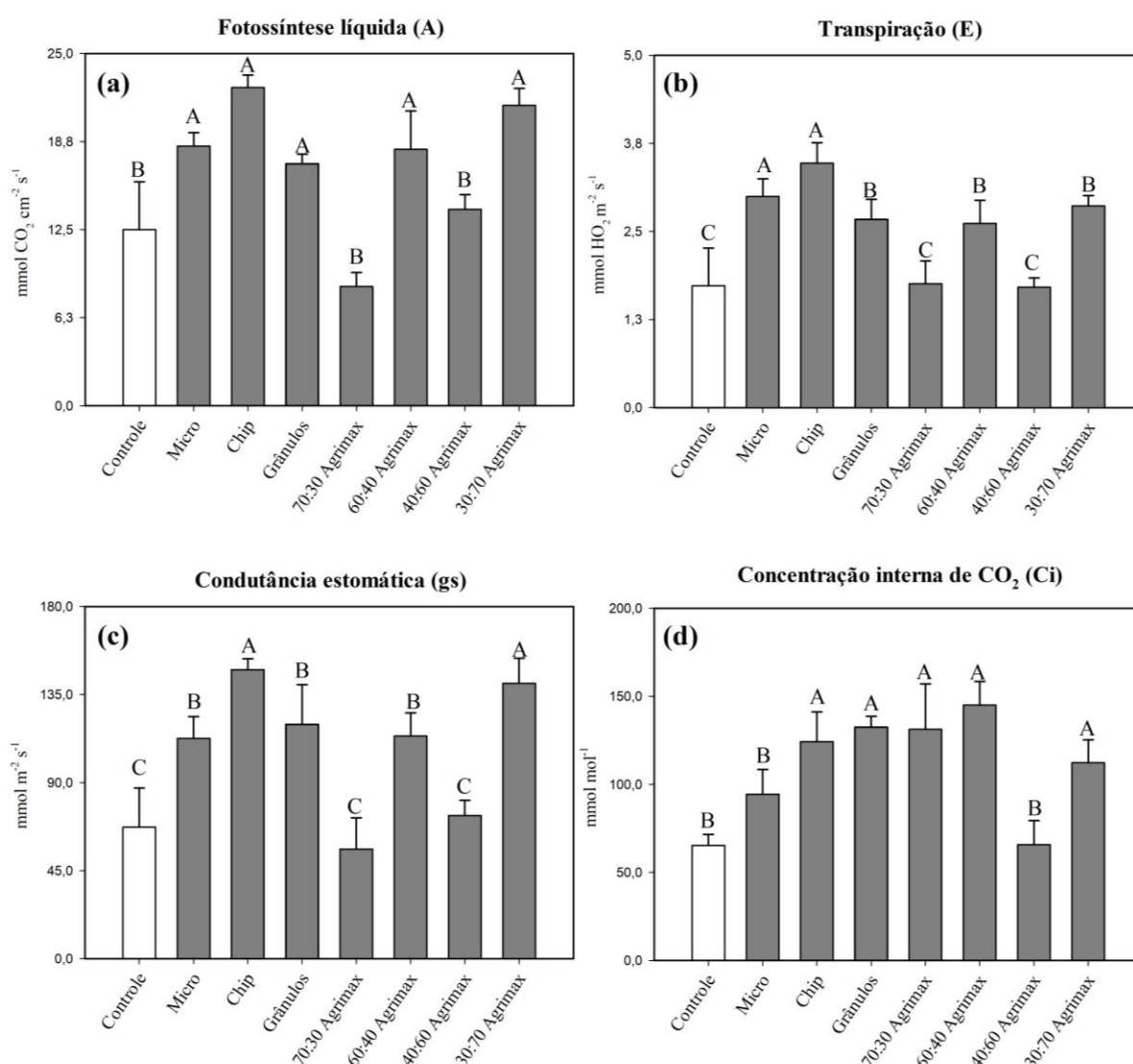


Figura 7 - Taxa de fotossíntese líquida (A, a), transpiração (E, b), condutância estomática (g_s , c) e concentração interna de CO_2 (C_i , d) de plantas de milho, no estágio formação da espiga, submetidas a diferentes granulometrias de fertilizante a base de sílica amorfa, incluindo o controle e a dose de silício ($200\ kg\ ha^{-1}$). As letras acima das barras representam os resultados do teste de Scott-Knott ao nível de 5% de significância, indicando os agrupamentos estatísticos.

Comportamento análogo foi observado para as taxas de condutância estomática (gs), em que o tratamento Chip, juntamente com o tratamento 30:70 Agrimax, ocasionaram as maiores taxas (Figura 7c). Em relação a concentração interna de CO_2 (Ci) os tratamentos Chip, Grânulos, 70:30 Agrimax, 60:40 Agrimax e 30:70 Agrimax, garantiram as maiores concentrações (Figura 7d).

Já quando se avaliou a eficiência de carboxilação da Rubisco (A/Ci) os tratamentos Grânulos e 60:40 Agrimax, resultaram em reduções significativas (Figura 8a). Não foi observado diferenças significativas para a eficiência intrínseca de uso da água (A/gs) entre os diferentes tratamentos (Figura 8b). Assim como, para a eficiência instantânea de uso da água (A/E) (Figura 8c).

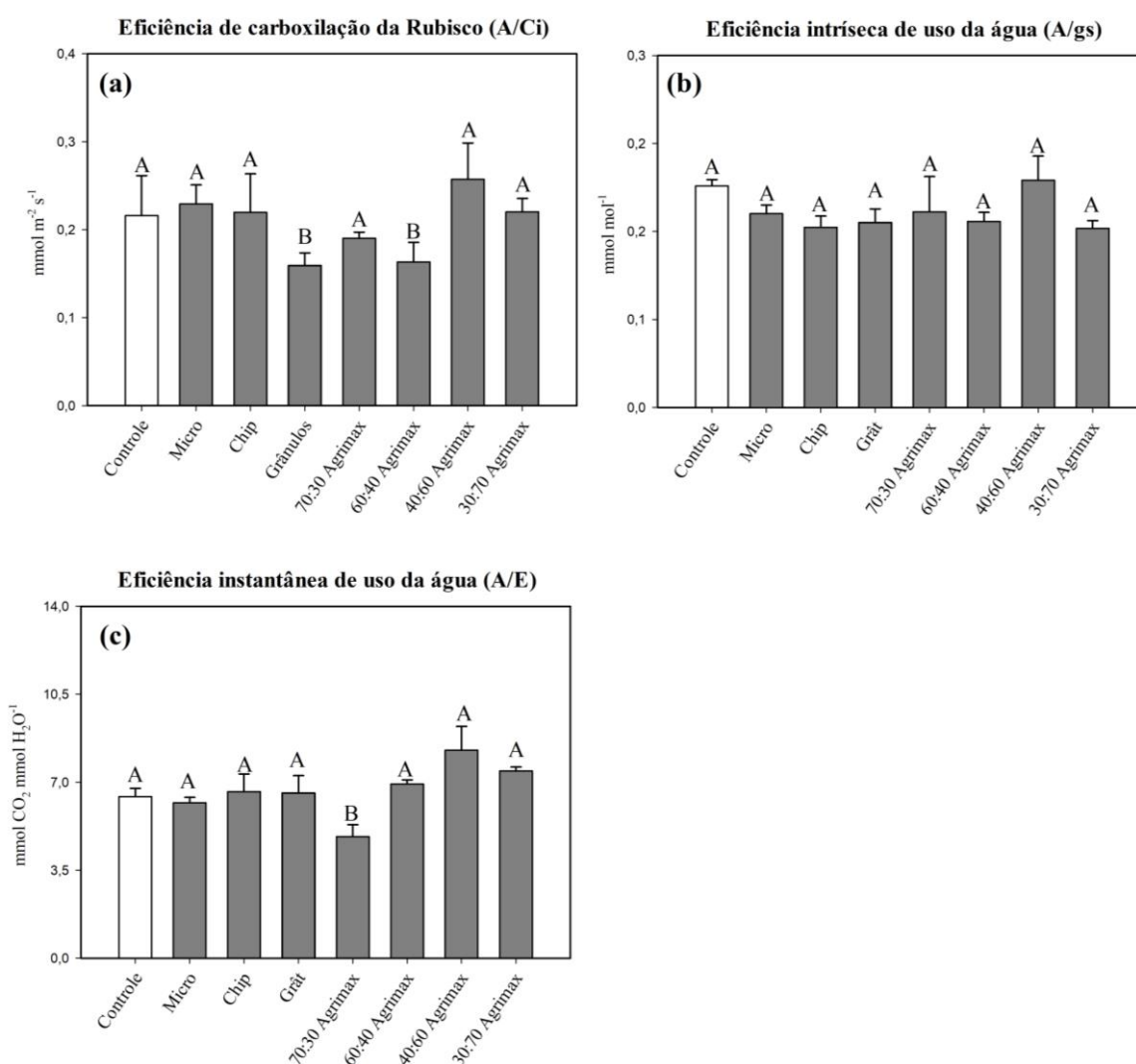


Figura 8 - Eficiência de carboxilação da Rubisco (A/Ci , a), eficiência intrínseca de uso da água (A/gs , b) e eficiência instantânea de uso da água (A/E , c) em plantas de milho, no estágio formação da espiga, submetidas a diferentes granulometrias de fertilizante a base de sílica amorfa, incluindo o controle e uma dose de silício (200 kg ha^{-1}). As letras acima das barras representam os resultados do teste de Scott-Knott ao nível de 5% de significância, indicando os agrupamentos estatísticos.

4.3.3 Desempenho produtivo

Os resultados demonstraram um impacto variável da fertilização com Si sobre a produtividade do milho, de modo que as granulometrias Agrimax 70:30 e 60:40 em ambas as doses e 40:60 e 30:70 na dose de 400 kg ha⁻¹ apresentaram as maiores produtividades. Esses rendimentos foram estatisticamente comparáveis ao tratamento com a tecnologia Chip na dose de 400 kg ha⁻¹. Em contraste, o tratamento com Chip a 200 kg ha⁻¹ e ambos os tratamentos com Micro e Grânulos nas duas doses não promoveram ganhos significativos de produtividade de grãos em comparação ao controle sem aplicação.

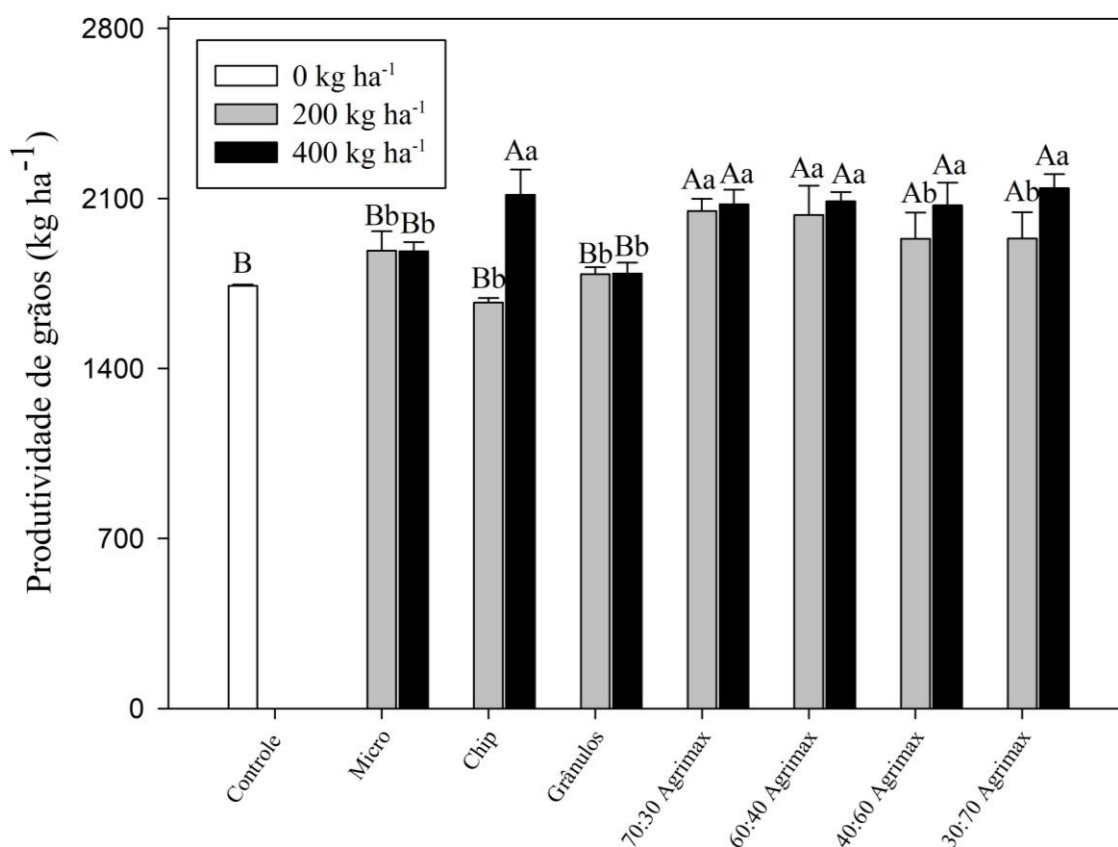


Figura 9 - Produtividade de grãos de milho no controle e nos grupos de diferentes granulometrias de fertilizante a base de sílica amorfa com duas doses (200 e 400 kg ha⁻¹). As letras acima das barras representam os resultados do teste de Scott-Knott ao nível de 5% de significância, indicando os agrupamentos estatísticos, em que letras maiúsculas comparas as granulometrias do fertilizante na mesma dose e letras minúsculas comparam as doses dentro das mesmas granulometrias.

4.3.4 Análise de Componentes Principais

Visando demonstrar o impacto das diferentes granulometrias do fertilizante à base de sílica amorfa sobre os parâmetros avaliados e a inter-relação entre as variáveis resposta, foi realizada análise multivariada por meio de Análise de Componentes Principais (PCA) para os dois estádios avaliados (Figura 10 e 11). No florescimento, os dados da PCA esclareceram 65,27% da variação total, sendo 43,76% dos dados no PC1 e 21,51% no PC2 (Figura 10). Formaram-se três grupos diferentes. As variáveis nutricionais como teor de silício (Si), fósforo (P), zinco (Zn), cobre (Cu), manganês (Mn) e fisiológicas como fotossíntese líquida (A) e eficiência de carboxilação da Rubisco (A/Ci), promoveram elevada contribuição para a separação dos grupos, estando associadas principalmente aos tratamentos com fertilizantes do tipo Agrimax 40:60 e Agrimax 60:40 em proporções mais elevadas.

Por outro lado, o tratamento granulado apresentou forte associação com a concentração interna de CO₂ (Ci), demonstrando baixo uso do CO₂ assimilado. O tratamento com fertilizante Micro foi relacionado à transpiração (E) e condutância estomática (gs). Já os tratamentos 30:70 Agrimax e 70:30 Agrimax” mostraram-se negativamente correlacionado à eficiência intrínseca (A/g_s) e instantânea de uso da água (A/E).

No estágio de formação da espiga, os dados da PCA explicaram 57,57% da variação total, sendo 34,27% representados pelo primeiro componente principal (PC1) e 23,30% pelo segundo (PC2) (Figura 11). Observou-se a formação de três grupos distintos entre os tratamentos. As variáveis fisiológicas como fotossíntese líquida (A), transpiração (E), condutância estomática (gs), concentração interna de CO₂ (Ci) e nutricionais como teor de fósforo (P), zinco (Zn) e manganês (Mn), apresentaram elevada contribuição para a separação dos grupos, estando associadas principalmente aos tratamentos Chip, 30:70 Agrimax e Grânulo. Por outro lado, o tratamento Micro juntamente com 60:40 Agrimax estiveram relacionados ao teor de silício (Si), com contribuição moderada. Já o tratamento controle e 40:60 Agrimax estiveram associados a eficiência intrínseca de uso da água (A/g_s).

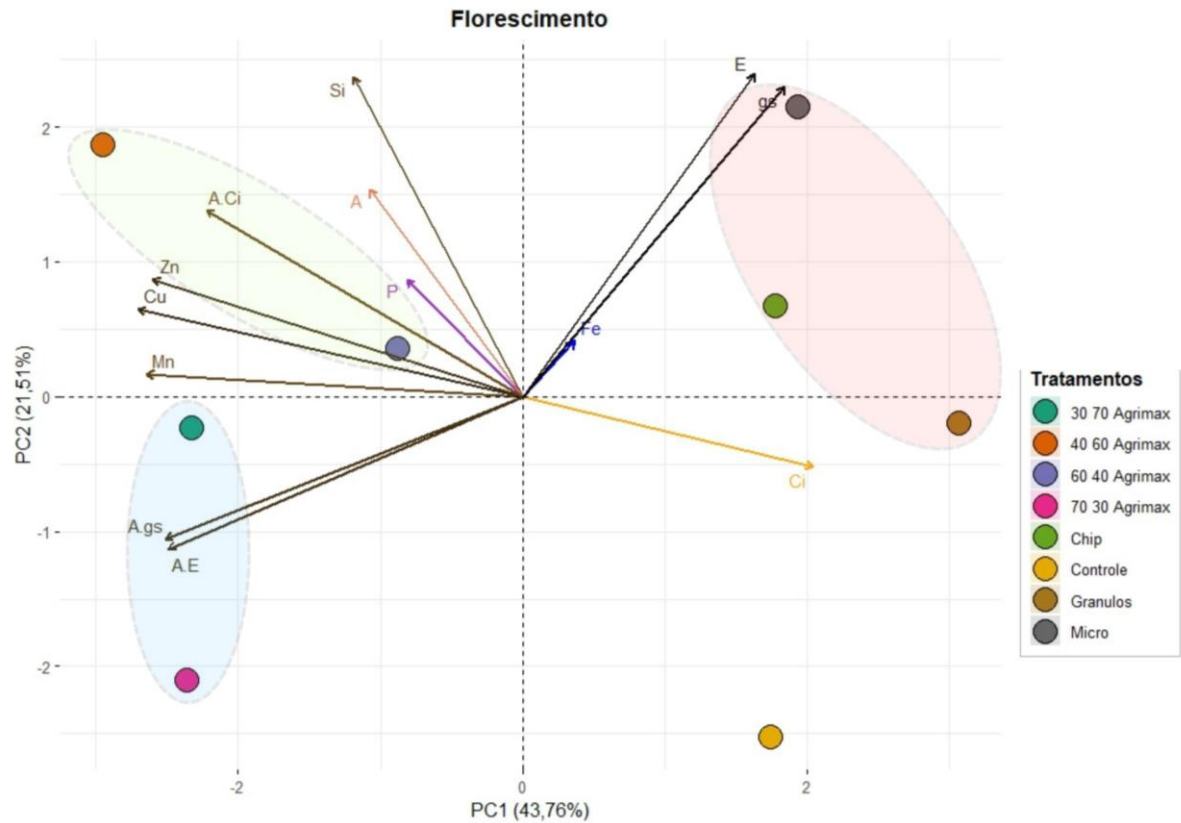


Figura 10 - Gráfico biplot para os atributos nutricionais e fisiológicos no estágio de florescimento: teor de silício (Si), fósforo (P), ferro (Fe), zinco (Zn), cobre (Cu), manganês (Mn), fotossíntese líquida (A), transpiração (E), condutância estomática (gs), concentração interna de CO₂ (Ci), eficiência de carboxilação da Rubisco (A/Ci), eficiência intrínseca de uso da água (A/gs) e eficiência instantânea de uso da água (A/E).

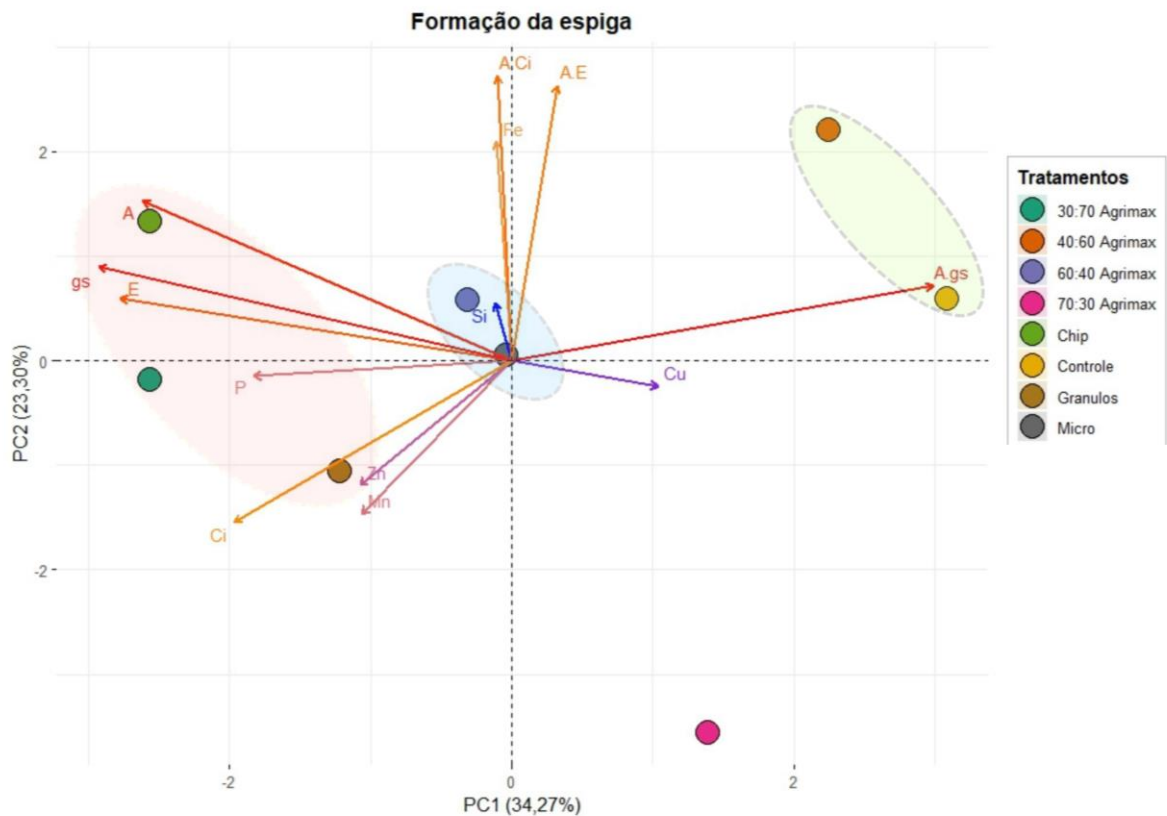


Figura 11 - Gráfico biplot para os atributos nutricionais e fisiológicos no estágio de formação da espiga: teor de silício (Si), fósforo (P), ferro (Fe), zinco (Zn), cobre (Cu), manganês (Mn), fotossíntese líquida (A), transpiração (E), condutância estomática (gs), concentração interna de CO₂ (Ci), eficiência de carboxilação da Rubisco (A/Ci), eficiência intrínseca de uso da água (A/g_s) e eficiência instantânea de uso da água (A/E).

4.4 Discussão

4.4.1 Teores de silício e nutrientes nas folhas de milho

As plantas apresentam grande variação na eficiência de armazenar silício em suas estruturas, sendo esse processo influenciado por diversos fatores, como características anatômicas, fisiológicas e morfológicas, especialmente a presença de proteínas transportadoras de silício (Guo et al., 2025). Além disso, fatores como a aplicação exógena, o tipo de fonte utilizada e a concentração de silício solúvel presente nessas fontes também afetam significativamente o acúmulo do elemento pelas plantas (Wani et al., 2023). Nossos resultados

demonstraram que fertilizantes à base de sílica amorfa com menores granulometrias proporcionam maior absorção de silício por plantas de milho cultivadas em solo arenoso (Figuras 3 a e b).

A assimilação de silício varia conforme múltiplos fatores, como o genótipo, a concentração de silício no solo, o tipo de solo e a fase em que a plantas se encontra (Barreto *et al.*, 2022). Em nosso estudo, observamos que o estágio de desenvolvimento exerce influência sobre a absorção de silício, de modo que a concentração do elemento nos tecidos foliares do milho praticamente dobrou do florescimento para o estágio de formação da espiga, evidenciando o aumento da exigência nutricional da planta durante o enchimento de grãos.

De um modo geral, as menores granulometrias de sílica amorfa que apresentaram as maiores solubilidades de silício, favoreceram as maiores concentrações de fósforo em ambos os estádios fenológicos avaliados (Figura 4 a e b). Este efeito estar associado a influência que o silício tem sobre o fenômeno de adsorção do fósforo em óxidos e oxihidróxidos de ferro e alumínio. A fertilização com silício promove diversos mecanismos que aumentam a disponibilidade de fósforo, incluindo a sorção competitiva e a troca com formas pouco disponíveis do nutriente, o aumento do pH do solo, a competição entre o ácido silícico e o fósforo por sítios de adsorção, além do incremento à atividade de microrganismos na rizosfera, que contribui para a mineralização e disponibilização do fósforo (Etesami; Schaller, 2023; Al-Rubie; Abdulkareem, 2024).

Não foram observadas diferenças significativas para a concentração de micronutrientes nas folhas (Fe, Cu, Mn e Zn) entre tratamentos avaliados e o controle em ambos os estádios avaliados, apesar de não ter se obtido diferenças significativas entre os diferentes tratamentos e o controle, as menores granulometrias foram mais eficientes em aumentar os níveis de micronutrientes nas duas fases avaliadas (Tabela 3 e 4). Relatos acerca da influência do silício sobre a disponibilidade e absorção de micronutrientes pelas plantas ainda são escassos (Rea *et al.*, 2022). No entanto, a aplicação de silício tem um efeito variável em relação a assimilação de micronutrientes (Oliveira; Felisberto; Prado, 2023).

A atuação do silício na melhoria da disponibilidade e absorção de micronutrientes como ferro (Fe), manganês (Mn), cobre (Cu) e zinco (Zn) tem sido relatada em diversos estudos (Mehrabanjoubani *et al.*, 2015; Fan *et al.*, 2016). O Si facilita a assimilação destes por meio de diferentes mecanismos, incluindo a exsudação de ácidos orgânicos, como citrato e oxalato, o aumento da atividade da enzima Fe(III)-redutase, a acidificação da rizosfera e a elevação da capacidade oxidativa das raízes (Stevic *et al.*, 2016; Basha; Sayed; Badr, 2024). Além disso, o

Si contribui para o acúmulo de citrato e compostos quelantes nos tecidos vegetais, o que facilita a translocação e a redistribuição dos micronutrientes dentro da planta (Hailai *et al.*, 2024).

4.4.2 Eficiência fotossintética

A fotossíntese no milho é um processo complexo que envolve muitos compostos funcionais e estruturais (Thenveettil; Reddy; Reddy, 2024). O papel do silício como um agente mediador de melhorias no desempenho fotossintético das plantas, regulando transpiração, a condutância estomática, a fotossíntese efetiva e a sustentação do CO₂ intercelular, especialmente, em condições estressantes foi demonstrado em diversos estudos (Nazim *et al.*, 2024). Em nosso estudo, observamos um impacto variável nas taxas dos parâmetros fotossintéticos de plantas de milho sob diferentes granulometrias de um fertilizante a base de sílica amorfa. Em geral, as granulometrias do fertilizante pertencente a tecnologia Agramix, que apresentou a maior concentração de silício solúvel, promoveu melhoria nos índices dos parâmetros como fotossíntese líquida (A), eficiência de carboxilação da Rubisco (A/Ci), eficiência intrínseca e instantânea de uso da água (A/g_s) e (A/E), no estágio de florescimento (Figura 5 e 6).

O silício se deposita na epiderme vegetal na forma de sílica amorfa, melhorando a flexibilidade e a plasticidade da parede celular, influenciando a abertura e o fechamento estomático (Sheng; Chen, 2020). De modo que, aplicações de silício demonstram impacto positivo nas relações hídricas da planta e condutância estomática, pois o Si pode aumentar a absorção e o transporte de água (Ishaq *et al.*, 2023). No estágio de formação da espiga, percebe-se uma maior taxa de condutância estomática (g_s) na maioria dos tratamentos pertencentes a tecnologia Agrimax, em comparação aos demais tratamentos, culminado em maiores índices de concentração interna de CO₂ (Ci) e índices de fotossíntese líquida (A) (Figura 7a, b, c).

4.4.3 Desempenho produtivo

As granulometrias pertencentes a categoria Agrimax, que apresentaram maiores teores de silício solúvel, ocasionaram as melhores produtividade, sem influência da dose aplicada. O

potencial do silício como atenuador de estresses biótico e abióticos, culminado com aumentos significativos de produtividade em diversas culturas está bem estabelecido, como por exemplo, Naik *et al.* (2024) ao desenvolverem um protocolo de aplicação de silício para o cultivo de milho doce orgânico, utilizando como fonte de silício a terra de diatomácea, constataram que a dose de 200 kg ha⁻¹ resultou na produtividade máxima do milho doce. Além disso, a aplicação de silício resultou em uma produtividade da cultura 12 - 39% maior em comparação sem a aplicação de Si.

Al-Huqail *et al.* (2023) ao estudarem o impacto de distintas fontes biogênicas de silício (biochar de palha de trigo, biochar de algodão, matéria-prima de casca de arroz, bagaço de cana-de-açúcar) no crescimento, produtividade e homeostase iônica em dois cultivos de milho (*Zea mays* L.) em solo alcalino, perceberam que as fontes biogênicas de Si utilizadas aumentaram o rendimento do milho em solo naturalmente afetado por sal, sendo que o rendimento máximo do milho no primeiro cultivo foi registrado com a fonte de bagaço de cana-de-açúcar, enquanto para o segundo cultivo, a matéria-prima de casca de arroz apresentou o rendimento máximo.

4.5 Conclusões

As granulometrias Agrimax se destacaram, apresentando uma concentração de silício solúvel aproximadamente dez vezes superior em comparação às demais granulometrias, contribuindo para o melhor desempenho em termos de absorção de silício, fósforo e regulação das taxas fotossintetizantes das plantas. Se destacando como uma fonte de Si promissor para melhorar a produtividade do milho em solos de baixa disponibilidade do elemento.

A fertilização com silício pode ser uma estratégia importante para otimizar a produtividade do milho, particularmente em solos com deficiência de Si, embora a escolha da fonte de Si e da taxa de aplicação deva ser cuidadosamente considerada.

REFERÊNCIAS

ALATAWI, A.; MFARREJ, M. F. B.; ALSHEGAIHI, R. M.; ASGHAR, M. A.; MUMTAZ, S.; YASIN, G.; MARC, R. A.; FAHAD, S.; ELSHARKAWY, M. M.; JAVED, S.; ALI, S.

Application of silicon and sodium hydrosulfide alleviates arsenic toxicity by regulating the physio-biochemical and molecular mechanisms of *Zea mays*. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 30, n. 31, p. 76555-76574, 2023.

AL-HUQAIL, A. A.; RIZWAN, A. ZIA-UR-REHMAN, M.; AL-HAITHLOUL, H. A. S.; ALGHANEM, S. M. S.; USMAN, M.; ABEED, A. A. Effect of exogenous application of biogenic silicon sources on growth, yield, and ionic homeostasis of maize (*Zea mays* L.) crops cultivated in alkaline soil. **Chemosphere**, v. 341, p. 140019, 2023.

AL-RUBIE, J. A. J.; ABDULKAREEM, M. A. Phosphorus and silicon uptake by corn (*Zea mays* L.) in response to silicon application in calcareous soil. **Nabatia**, v. 12, n. 2, p. 103-119, 2024.

APARECIDO, L. E. O.; DUTRA, A. F.; LORENÇONE, P. A.; ALCÂNTARA NETO, F., LORENÇONE, J. A.; LEITE, M. R. L. Climate change in MATOPIBA region of Brazil: a study on climate extremes in agriculture. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 153, n. 1, p. 87-100, 2023.

ARAÚJO, M. L. S. D.; RUFINO, I. A. A.; SILVA, F. B.; BRITO, H. C. D.; SANTOS, J. R. N. The relationship between climate, agriculture and land cover in Matopiba, Brazil (1985–2020). **Sustainability**, v. 16, n. 7, p. 2670, 2024.

BARRETO, R. F.; MAIER, B. R.; PRADO, R. M.; MORAIS, T. C. B.; FELISBERTO, G. Silicon attenuates potassium and sulfur deficiency by increasing nutrient use efficiency in basil plants. **Scientia Horticulturae**, v. 291, p. 110616, 2022.

BASHA, D. M. A.; SAYED, S. E; BADR, E, A. Evaluation of mineral fertilizer with silicon (Si) foliar application on growth, yield production and nutrient status of wheat under sandy soil conditions. **Egyptian Journal of Chemistry**, v. 67, n. 13, p. 229-239, 2024.

CHEN, J.; LI, Y.; ZENG, Z.; ZHAO, X.; ZHANG, Y.; LI, X.; CHEN, J.; SHEN, W. Silicon induces ROS scavengers, hormone signalling, antifungal metabolites, and silicon deposition against brown stripe disease in sugarcane. **Physiologia Plantarum**, v. 176, n. 3, p. e14313, 2024.

CONAB. Companhia Nacional de Abastecimento. 2025. **Acompanhamento da safra brasileira de grãos 2024/2025**. Disponível em: <https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/graos>. Acesso em: 04 mai. 2025.

DAR, F. A.; TAHIR, I.; REHMAN, R. U.; ALHARBY, H. F.; ALZAHIRANI, Y.; ALSAMADANY, H.; HAKEEM, K. R. Exogenous silicon alleviates aluminum phytotoxicity in *Fagopyrum esculentum* Moench by modulating physiological and antioxidant responses. **South African Journal of Botany**, v. 167, p. 367-384, 2024.

ELLIOT C. L.; SNYDER G.H. Autoclave-induced digestion for the colorimetric determination of silicon in rice straw. **Journal of Agricultural Food Chemistry** v. 39, p. 1118-1119, 1991.

ETESAMI, H.; SCHALLER, J. Improving phosphorus availability to rice through silicon management in paddy soils: A review of the role of silicate-solubilizing bacteria. **Rhizosphere**, v. 27, p. 100749, 2023.

FAN, X.; WEN, X.; HUANG, F.; CAI, Y.; CAI, K. Effects of silicon on morphology, ultrastructure and exudates of rice root under heavy metal stress. **Acta Physiologiae Plantarum**, v. 38, p. 1-9, 2016.

FENG, D.; WANG, R.; SUN, X.; LIU, L. N.; LIU, P.; TANG, J.; ZHANG, C.; LIU, H. Heavy metal stress in plants: ways to alleviate with exogenous substances. **Science of the Total Environment**, v. 897, p. 165397, 2023.

FERREIRA, J. G. R.; JUNIOR, H. S.; VENTURA, M. U.; SALOMÃO, R. V.; SILVA, J. W.; FREGONEZI, G. A. F.; ALMEIDA, P. P. S.; ALMEIDA, L. H. C. Productivity and phytotechnical parameters of corn grown on different cover plants. **Agronomy Science and Biotechnology**, v. 10, p. 1-8, 2024.

GUO, Z.; LIAO, S.; XU, C.; WEI, M.; SONG, L.; HUANG, H.; LI, Z.; CHEN, X.; JIANG, L.; ZHENG, H. L. Silicon enhances potassium uptake and leaf growth in *Avicennia marina*, a silicon-accumulating mangrove plant with silicon transporters. **Industrial Crops and Products**, v. 228, p. 120876, 2025.

GOU, C.; HUANG, Q.; RADY, M. M.; WANG, L.; IHTISHAM, M.; EL-AWADY, H. H.; SEIF, M.; ALAZIZI, E. M. Y.; EID, R. S. M.; TAHRI, W.; LI, J.; DESOKY, E. S. M.; EL-SAPPAH, A. H. Integrative application of silicon and/or proline improves sweet corn (*Zea mays* L. *saccharata*) production and antioxidant defense system under salt stress condition. **Scientific Reports**, v. 13, n. 1, p. 18315, 2023.

HAILAI, Y.; LIU, Y.; YANG, Z.; LI, Y.; FENG, J.; LI, W.; SHENG, H. Silicon regulation of manganese homeostasis in plants: mechanisms and future prospective. **Frontiers in Plant Science**, v. 15, p. 1465513, 2024.

HASSAN, M. U.; LIHONG, W.; NAWAZ, M.; ALI, B.; TANG, H.; RASHEED, A.; ZAID, A.; ALQAHTANI, F. M.; HASHEM, M.; QARI, S. H.; ZAID, A. Silicon a key player to mitigate chromium toxicity in plants: mechanisms and future prospective. **Plant Physiology and Biochemistry**, v. 208, p. 108529, 2024.

HERNÁNDEZ, T. E.; CONTRERAS, D. P.; GODOY, K.; CAYUNAO, B.; BARROSO, C. M.; ALARCÓN, D.; BIŠKO, A.; GERGICHEVICH, C. M. Diatomaceous earth as silicon source involved on antioxidant, morphology and productive traits of hazelnut (*Corylus avellana* L.). **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, v. 25, p. 3002-3016, 2025.

HOLANDA, R. M.; MEDEIROS, R. M. Classificação climática pelo método de Köppen e Thornthwaite em Bom Jesus do Piauí, Brasil. **Revista Pantaneira**, v. 16, p. 57-69, 2019.

IRFAN, M.; MAQSOOD, M. A.; REHMAN, H. U.; MAHBOOB, W.; SARWAR, N.; HAFEEZ, O. B. A.; HUSSAIN, S.; ERCISLI, S.; AKHTAR, M.; AZIZ, T. Silicon nutrition in plants under water-deficit conditions: overview and prospects. **Water**, v. 15, n. 4, p. 739, 2023.

ISLAM, W.; TAUQEER, A.; WAHEED, A.; ALI, H.; ZENG, F. **Silicon in plants mitigates damage against pathogens and insect pests**. In: PRADO, R. M. Benefits of silicon in the nutrition of plants. Cham: Springer International Publishing, 2023a. p. 347-378.

ISLAM, A. T.; ULLAH, H.; HIMANSHU, S. K.; TISARUM, R.; CHA-UM, S.; DATTA, A. The interactive effects of silicon and arbuscular mycorrhizal fungi on growth, physiological traits, and cob yield of baby corn plants under salt stress. **Silicon**, v. 15, n. 10, p. 4457-4471, 2023b.

ISHAQ, H.; WARAICH, E. A.; HUSSAIN, S.; AHMAD, M.; AHMAD, Z.; SAIFULLAH. Silicon-mediated growth, physiological, biochemical and root alterations to confer drought and nickel stress tolerance in maize (*Zea mays* L.). **Silicon**, v. 15, n. 15, p. 6579-6589, 2023.

KAPPES, C.; ARF, O.; ANDRADE, J. A. D. C. Maize grain yield in response to different soil management and nitrogen rates. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 37, p. 1310-1321, 2013.

KARVAR, M.; AZARI, A.; RAHIMI, A.; MADDADH-HOSSEINI, S.; AHMADI-LAHIJANI, M. J. Potassium silicate reduces water consumption, improves drought tolerance, and enhances the productivity of sweet corn (*Zea mays*) under deficit irrigation. **Acta Physiologiae Plantarum**, v. 45, n. 3, p. 38, 2023.

KAUR, H.; KAUR, H.; KAUR, H.; SRIVASTAVA, S. The beneficial roles of trace and ultratrace elements in plants. **Plant Growth Regulation**, v. 100, n. 2, p. 219-236, 2023.

KORNDÖRFER, G. H.; PEREIRA, H. S.; NOLLA, A. **Análise de silício no solo, planta e fertilizante**. Uberlândia: Instituto de Ciências Agrárias, Universidade Federal de Uberlândia GPSi-ICIAG-UFU, Boletim técnico 02, 2004. p. 50.

LEITE, W.; MIRANDA, R. S.; ROCHA, M. M.; DUTRA, A. F.; SANTOS, A. S.; SILVA, A. C.; BRITO, F. M.; SOUSA, R. S.; ARAÚJO, A. S. F.; NASCIMENTO, C. W. A.; ZUFFO, A. M.; NETO, F. A. Silicon alleviates drought damage by increasing antioxidant and photosynthetic performance in cowpea. **Journal of Agronomy and Crop Science**, v. 209, n. 6, p. 772-787, 2023.

LI, D.; HAO, A.; SHAO, W.; ZHANG, W.; JIAO, F.; ZHANG, H.; DONG, X.; ZHAN, Y.; LIU, X.; MU, C.; DING, Z.; XUE, D.; CHEN, J.; WANG, M. Maize kernel nutritional quality-an old challenge for modern breeders. **Planta**, v. 261, n. 2, p. 43, 2025.

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

MEHRABANJOUBANI, P.; ABDOLZADEH, A.; SADEGHIPOUR, H. R.; AGHDASI, M. Impacts of silicon nutrition on growth and nutrient status of rice plants grown under varying zinc regimes. **Theoretical and Experimental Plant Physiology**, v. 27, p. 19-29, 2015.

NAIK, B. S.; SHARMA, S. K.; PRAMANICK, B.; YADAV, S. K.; REDDY, G. K.; TIRUNAGARI, R.; MEENA, R. S.; BAMBORIYAJ. S.; KUMAR, M. S.; GURUMURTHY, P.; LAL, M. Development of an improved silicon application protocol for organic sweet corn cultivation ensuring higher productivity and better soil health. **Silicon**, v. 16, n. 6, p. 2547-2555, 2024.

NASCIMENTO, C. W. A.; SILVA, F. B. V.; LIMA, L. H. V.; SILVA, J. R.; VELOSO, V. L.; SILVA, F. L.; FREITAS, S. T.; SANTOS, L. F.; SANTOS, M. A. Silicon application to soil increases the yield and quality of table grapes (*Vitis vinifera* L.) grown in a semiarid climate of Brazil. **Silicon**, v. 15, n. 4, p. 1647-1658, 2023.

NASCIMENTO, C. W. A.; SILVA, F. B. V.; ARAÚJO, P. R. M.; ARAÚJO, J. C. T.; LINS, S. A. S. Efficiency and recovery index of silicon of a diatomaceous Earth-based fertilizer in two soil types grown with sugarcane and maize. **Journal of Plant Nutrition**, v. 44, p. 2347-2358, 2021.

NAZIM, M.; LI, X.; ANJUM, S.; AHMAD, F.; ALI, M.; MUHAMMAD, M.; SHAHZAD, K.; LIN, L.; ZULFIQAR, U. Silicon nanoparticles: A novel approach in plant physiology to combat drought stress in arid environment. **Biocatalysis and Agricultural Biotechnology**, v. 58, p. 103190, 2024.

OLIVEIRA, R. S.; SAMPAIO, M. V.; CARVALHO, F. J.; ALBUQUERQUE, C. J. B.; KORNDORFER, G. H. Silicon amendments reduce aphid numbers and improve yield of aphid-resistant and susceptible wheat cultivars in a dose-dependent manner. **Crop Protection**, v. 172, p. 106296, 2023a.

OLIVEIRA, L. A.; CRUZ, F. J. R.; SILVA, D. L.; ABREU-JUNIOR, C. H.; PRADO, R. M. **Silicon mitigates the effects of potentially toxic metals**. In: PRADO, R. M. Benefits of silicon in the nutrition of plants. Cham: Springer International Publishing, 2023b. p. 237-251.

OLIVEIRA, K. S.; FELISBERTO, G.; PRADO, R. M. **Silicon mitigates the effects of zinc and manganese deficiency in plants**. In: PRADO, R. M. Benefits of silicon in the nutrition of plants. Cham: Springer International Publishing, 2023. p. 129-148.

PRAGANA, R. B.; JUNIOR, V. S. S.; MOURA, R. S.; SOARES, J. M. Characterization of yellow latosols (Oxisols) of Serra do Quilombo, in Piauí state savanna woodlands-Brazil. **Revista Caatinga**, v. 29, p. 832-840, 2016.

QUEIROZ, L. L. G. D.; MESQUITA, E. F. D.; SOUSA, C. D. S.; PEREIRA, R. F.; DINIZ, J. P. C.; MELO, A. S. D.; COSTA, F. P. D. S. Foliar silicon alleviates water deficit in cowpea by enhancing nutrient uptake, proline accumulation, and antioxidant activity. **Plants**, v. 14, n. 8, p. 1241, 2025.

RAZA, T.; ABBAS, M.; AMNA; IMRAN, S.; KHAN, M. Y.; REBI, A.; RAFIE-RAD, Z.; EASH, N. S. Impact of silicon on plant nutrition and significance of silicon mobilizing bacteria in agronomic practices. **Silicon**, v. 15, n. 9, p. 3797-3817, 2023.

REA, R. S.; ISLAM, M. R.; RAHMAN, M. M.; NATH, B.; MIX, K. Growth, nutrient accumulation, and drought tolerance in crop plants with silicon application: a review. **Sustainability**, v. 14, p.4525, 2022.

RIZWAN, A.; ZIA-UR-REHMAN, M.; RIZWAN, M.; USMAN, M.; ANAYATULLAH, S.; ALHARBY, H. F.; BAMAGOOS, A. A.; ALHARBI, B. M.; ALI, S. Effects of silicon nanoparticles and conventional Si amendments on growth and nutrient accumulation by maize (*Zea mays* L.) grown in saline-sodic soil. **Environmental Research**, v. 227, p. 115740, 2023.

SANTOS, F. C.; VIANA, J. H. M.; BATISTA, M. A.; RESENDE, Á. V.; ALBUQUERQUE, F. M. R. **Agricultural use of sandy soils in brazilian cerrado (brazilian savanna)**. In: HARTEMINK, A.E.; HUANG, J. *Sandy Soils*. Cham: Springer Nature Switzerland, 2024. p. 165-177.

SHENG, H.; CHEN, S. Plant silicon-cell wall complexes: Identification, model of covalent bond formation and biofunction. **Plant Physiology and Biochemistry**, v. 155, p. 13-19, 2020.

SHI, Y.; ZHANG, Y.; HAN, W.; FENG, R.; HU, Y.; GUO, J.; GONG, H. Silicon enhances water stress tolerance by improving root hydraulic conductance in *Solanum lycopersicum* L. **Frontiers in Plant Science**, v. 7, p. 196, 2016.

SILVA, F. L.; SILVA, F. B. V.; ARAÚJO, P. R. M.; SILVA, R. L.; PARAIZO, T. S.; NASCIMENTO, C. W. A. Amorphous silica-based fertilizer reduces Cd uptake and translocation and human health risk in polluted soil grown with cowpea (*Vigna unguiculata* (L.) Walp). **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, v. 23, n. 3, p. 3174-3185, 2023b.

SILVA, J. L. F. D.; PRADO, R. M.; ALVES, T. L.; LATA, T. L. F.; SOARES, M. B. New strategy for silicon supply through fertigation in sugarcane integrating the pre-sprouted seedling phase and field cultivation. **Scientific Reports**, v. 13, p. 1230, 2023a.

SINGHAL, R. K.; FAHAD, S.; KUMAR, P.; CHOYAL, P.; JAVED, T.; JINGER, D.; SINGH, P.; SAHA, D.; MD, P.; BOSE, B.; AKASH, H.; GUPTA, N. K.; SODANI, R.; DEV, D.; SUTHAR, D. L.; LIU, K.; HARRISSON, M. T.; SAUD, S.; SHAH, A. N.; NAWAZ, T. Beneficial elements: New Players in improving nutrient use efficiency and abiotic stress tolerance. **Plant Growth Regulation**, v. 100, n. 2, p. 237-265, 2023.

SOUSA, D. M. G.; LOBATO, E. **Cerrado: correção do solo e adubação**. 2. ed. Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica; Planaltina, DF: Embrapa Cerrados, 2004. 416 p.

STEVIC, N.; KORAC, J.; PAVLOVIC, J.; NILOLIC, M. Binding of transition metals to monosilicic acid in aqueous and xylem (*Cucumis sativus* L.) solutions: a low-T electron paramagnetic resonance study. **Biometals**, v. 29, n. 5, p. 945-951, 2016.

THAKRAL, V.; RATURI, G.; SUDHAKARAN, S.; MANDLIK, R.; SHARMA, Y.; SHIVARAJ, S. M.; TRIPATHI, D. K.; SONAH, H.; DESHMUKH, R. Silicon, a quasi-essential element: availability in soil, fertilizer regime, optimum dosage, and uptake in plants. **Plant Physiology and Biochemistry**, v. 208, p. 108459, 2024.

THENVEETIL, N.; REDDY, K. N.; REDDY, K. R. Effects of potassium nutrition on corn (*Zea mays* L.) physiology and growth for modeling. **Agriculture**, v. 14, n. 7, p. 968, 2024.

TEIXEIRA, G. C. M.; PRADO, R. M. **Silicon mitigates the effects of water deficit in tropical plants**. In: PRADO, R. M. *Benefits of silicon in the nutrition of plants*. Cham: Springer International Publishing, 2023. p. 275-298.

TEIXEIRA, P. C.; DONAGEMMA, G. K.; FONTANA, A.; TEIXEIRA, W. G. **Manual de métodos de análise de solo**. 3. ed. revisada e ampliada. Brasília, DF: Embrapa, 2017. 573 p.

VIEIRA, R. M. D. S. P.; TOMASELLA, J.; BARBOSA, A. A.; POLIZEL, S. P.; OMETTO, J. P. H. B.; SANTOS, F. C.; FERREIRA, Y. C.; TOLEDO, P. M. Land degradation mapping in the MATOPIBA region (Brazil) using remote sensing data and decision-tree analysis. **Science of the Total Environment**, v. 782, p. 146900, 2021.

VERMA, K. K.; SONG, X. P.; ZENG, Y.; LI, D. M.; GUO, D. J.; RAJPUT, V. D.; LI, Y. R. Characteristics of leaf stomata and their relationship with photosynthesis in *Saccharum officinarum* under drought and silicon application. **ACS omega**, v. 5, n. 37, p. 24145-24153, 2020.

WANG, S.; CHENG, H.; WEI, Y. Supplemental silicon and boron alleviates aluminum-induced oxidative damage in soybean roots. **Plants**, v. 13, n. 6, p. 821, 2024.

WANG, C.; LINDERHOLM, H. W.; SONG, Y.; WANG, F.; LIU, Y.; TIAN, J.; XU, J.; SONG, Y.; REN, G. Impacts of drought on maize and soybean production in northeast China during the past five decades. **International journal of environmental research and public health**, v. 17, n. 7, p. 2459, 2020.

WANI, A. H.; MIR, S. H.; KUMAR, S.; MALIK, M. A.; TYUB, S.; RASHID, I. Silicon en route-from loam to leaf. **Plant Growth Regulation**, v. 99, n. 3, p. 465-476, 2023.

YOSHIDA, C. H. P.; LAPAZ, A. M.; RODRIGUES, F. Á.; ARAÚJO, W. L.; MARTINS, A. O.; PACHECO, A. C.; RIBEIRO, C. Silicon supplementation enhances the tolerance of popcorn maize plants to aluminum toxicity. **Theoretical and Experimental Plant Physiology**, v. 37, n. 1, p. 18, 2025.

ZELLNER, W.; TUBANA, B.; RODRIGUES, F. A.; DATNOFF, L. E. Silicon's role in plant stress reduction and why this element is not used routinely for managing plant health. **Plant Disease**, v. 105, p. 2033-2049, 2021.

ZILLI, M.; SCARABELLO, M.; SOTERRONI, A. C.; VALIN, H.; MOSNIER, A.; LECLÈRE, D.; HAVLÍK, P.; KRAXNER, F.; LOPES, M. A.; RAMOS, F. M. The impact of climate change on Brazil's agriculture. **Science of the Total Environment**, v. 740, p. 139384, 2020.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS E PERSPECTIVAS FUTURAS

Os resultados obtidos neste estudo demonstram que a aplicação de sílica amorfa pode influenciar significativamente a absorção de silício e o desempenho fisiológico do milho. A consistência dos efeitos positivos do fertilizante Agrimax ao longo do ciclo da cultura evidencia seu potencial como fertilizante promissor para manejo nutricional do milho em ambientes de cultivo com pouca concentração de silício.

De modo abrangente, os resultados nutricionais fisiológicos e produtivos reforçam o papel do silício como um insumo de grande relevância para a agricultura, favorecendo sistemas de produção mais eficientes, sustentáveis e com maior desempenho agrônomo. São necessários mais estudos para avaliar os efeitos acumulativos do uso de sílica amorfa nos sistemas de produção de milho, bem como a viabilidade econômica da incorporação do silício na rotina nutricional das lavouras de produção de milho no Cerrado.