

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA JÚLIO DE MESQUITA
FILHO FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E
VETERINÁRIAS CÂMPUS DE JABOTICABAL**

**SILÍCIO COMO PROMOTOR DE SEQUESTRO DE
CARBONO PELOS FITÓLITOS NA CULTURA DO MILHO
CULTIVADO EM LATOSSOLO VERMELHO SOB DOIS
REGIMES HÍDRICOS**

Vanessa Quagliariello

Engenheira Agrônoma

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA JÚLIO DE MESQUITA
FILHO FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E
VETERINÁRIAS CÂMPUS DE JABOTICABAL**

**SILÍCIO COMO PROMOTOR DE SEQUESTRO DE CARBONO
PELOS FITÓLITOS NA CULTURA DO MILHO CULTIVADO EM
LATOSSOLO VERMELHO SOB DOIS REGIMES HÍDRICOS**

Vanessa Quagliariello

Orientador: Prof. Dr. Renato de Mello Prado

Coorientador: Dr. Jonas Pereira de Souza Júnior

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

Q1s

Quagliariello, Vanessa

Silício como promotor de sequestro de carbono pelos fitólitos na cultura do milho cultivado em latossolo vermelho sob dois regimes hídricos / Vanessa Quagliariello. -- Jaboticabal, 2026

53 p.

Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Jaboticabal

Orientador: Renato de Mello Prado

Coorientador: Jonas Pereira de Souza Júnior

1. Adubação silicatada. 2. Sequestro de carbono. 3. Regime hídrico. 4. Estresse hídrico. 5. PhytOC. I. Título.



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

Câmpus de Jaboticabal



CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA TESE: SILÍCIO COMO PROMOTOR DE SEQUESTRO DE CARBONO PELOS FITÓLITOS NA CULTURA DO MILHO CULTIVADO EM LATOSSOLO VERMELHO SOB DOIS REGIMES HÍDRICOS

AUTORA: VANESSA QUAGLIARIELLO

ORIENTADOR: RENATO DE MELLO PRADO

COORDENADOR: JONAS PEREIRA DE SOUZA JÚNIOR

Aprovada como parte das exigências para obtenção do Título de Doutora em Agronomia (Ciência do Solo), pela Comissão Examinadora:

Documento assinado digitalmente
gov.br RENATO DE MELLO PRADO
Data: 23/05/2026 09:39:47-0300
Verifique em <https://validar.it.gov.br>

Prof. Dr. RENATO DE MELLO PRADO (Participação Presencial)
Departamento de Ciência do Solo / UNESP / Câmpus de Jaboticabal - FCAV

Documento assinado digitalmente
gov.br ANELISA DE AQUINO VIDAL LACERDA SOARES
Data: 25/05/2026 13:23:32-0300
Verifique em <https://validar.it.gov.br>

Pesquisadora Dra. ANELISA DE AQUINO VIDAL LACERDA SOARES (Participação Virtual)
Unidade de Pesquisa e Desenvolvimento(UPD) - APTA / Bauru/SP

Documento assinado digitalmente
gov.br CINTIA CARMEN DE FARIA MELO
Data: 25/05/2026 10:34:27-0300
Verifique em <https://validar.it.gov.br>

Pós-doutoranda CINTIA CARMEN DE FARIA MELO (Participação Virtual)
Departamento de Ciência do Solo / FCAV / UNESP - Jaboticabal

Documento assinado digitalmente
gov.br ANGÉLICA CRISTINA FERNANDES DEUS
Data: 25/05/2026 16:11:01-0300
Verifique em <https://validar.it.gov.br>

Profa. Dra. ANGÉLICA CRISTINA FERNANDES DEUS (Participação Virtual)
Departamento de Fitossanidade, Engenharia Rural e Solos / UNESP / Câmpus de Ilha Solteira - FEIS

Documento assinado digitalmente
gov.br SAMARA ALVES TESTONI
Data: 25/05/2026 13:04:57-0300
Verifique em <https://validar.it.gov.br>

Profa. Dra. SAMARA ALVES TESTONI (Participação Presencial)
Departamento de Ciência do Solo / UNESP / Câmpus de Jaboticabal - FCAV

Jaboticabal, 22 de maio de 2026.

DADOS CURRICULARES DA AUTORA

Vanessa Quagliariello- Brasileira nascida em 14 de março de 1972, natural de Curitiba, Paraná, filha de Lino Quagliariello e Marlene Matheus Quagliariello. Atuou na iniciativa privada em companhias multinacionais como Monsanto e Nutrien e nacionais como Fava Sementes e Uniggel, durante 29 anos de sua carreira, em cargos que foram desde vendas e desenvolvimento de mercado até gerência de marketing e de produtos. Em fevereiro de 1993 ingressou no curso de graduação em Engenharia Agrônômica na UNESP de Jaboticabal, concluindo em setembro de 1998. Em agosto de 2002 ingressou no mestrado na UNESP de Jaboticabal no programa de Ciência do Solo trabalhando com agricultura de precisão com a tese sobre “Variabilidade de atributos do solo sob pivô central em diferentes manejos” concluindo o mestrado em novembro de 2004. Em agosto de 2024 ingressou no doutorado de Ciência do Solo na UNESP de Jaboticabal tendo trabalhado na área de adubação de Si e sob dois regimes hídricos e seus impactos na formação de fitólitos e captura de carbono da atmosfera.

“Os dias de abundância não vêm por acaso; eles nascem de muito esforço e persistência.”

Mahatma Gandhi

Dedico

Ao meu pai Lino Quagliariello, (*in memoriam*) pelo exemplo de esforço, dedicação e persuasão e que pautou minha vida e carreira. Obrigada pai, você se orgulharia.

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais Lino (*in memoriam*) e Marlene, que foram meus grandes incentivadores apoiadores e torcedores pelo meu sucesso, e que me mostraram a importância de buscar conhecimento para entender o mundo e a cultura ao meu redor, pelos valores com que me criaram, nos quais me espelhei sempre, e o amor que sempre me dedicaram.

Ao meu marido pela paciência pelo incentivo e por estar sempre ao meu lado facilitando minha vida e tornando a vida mais leve, pelas dicas e exemplo de sempre perseguir o caminho que gosta de trilhar.

Ao meu orientador Dr. Renato de Mello Prado, por me receber sob sua tutoria e indicar caminhos inovadores, uma visão ampla mas pouco explorada e muito contemporânea para um tema já existente e que certamente trará uma nova perspectiva em sustentabilidade.

Ao meu coorientador Dr. Jonas Pereira de Souza Júnior, que me acompanhou de perto nessa jornada, me incentivando a pensar e escrever melhor, a ser mais crítica em relação ao meu trabalho fazendo com que eu me superasse sempre, e por me trazer um lado mais “pesquisadora”.

Ao meu colega de trabalho, Milton, que me acompanhou nas análises de laboratório e esteve sempre pronto a me ajudar e aconselhar.

Aos meus irmãos por existirem e pelos momentos de distração que trouxeram.

A todos que contribuíram direta ou indiretamente para que esse trabalho fosse possível.

Sumário

1. Introdução	1
2. Revisão de Literatura	4
2.1 Relevância do regime hídrico no cultivo de milho sob déficit hídrico.....	4
2.2 Importância do Si na cultura do milho	5
2.3 Formação de fitólitos e considerações gerais	7
2.4 Influência da adição de Si e do regime hídrico na formação dos fitólitos	9
3. Material e Métodos	10
3.1 Localização e características da área de estudo.....	10
3.2 Delineamento experimental, plot experimental e aplicação dos tratamentos	13
4. Análises.....	15
4.1 Amostras e Determinação de Biomassa	15
4.2 Avaliação do potencial hídrico.....	16
4.3 Determinação do Si	16
4.3.1 Teor de Si e Concentração de Si na planta.....	16
4.3.2 Teor de C e concentração de C na planta.....	16
4.3.3 Si disponível no solo	16
4.3.4 Determinação dos fenóis.....	17
4.4 Determinação da quantidade de fitólitos	17
4.5 Determinação do PhytOC e Estimativa de Sequestro de Carbono	17
4.6 Análises Estatísticas.....	18
5. Resultados	18
6. Discussão.....	30
7. Conclusões.....	36
8. Referências	36
9. Considerações Finais	42

SILÍCIO COMO PROMOTOR DE SEQUESTRO DE CARBONO PELOS FITÓLITOS NA CULTURA DO MILHO CULTIVADO EM LATOSSOLO VERMELHO SOB DOIS REGIMES HÍDRICOS

Resumo

O carbono ocluído nos fitólitos (phytolith-occluded carbon, PhytOC) ocupa hoje um lugar relevante no sequestro de carbono (C) da atmosfera e o entendimento de como a adubação silicatada e o regime hídrico podem influenciar no aumento desse sequestro pelos fitólitos é fundamental para o manejo das culturas, principalmente do milho (*Zea mays* L.) que ocupa lugar de destaque no potencial de sequestro de C sendo a segunda cultura mais plantada no planeta. O presente estudo teve como objetivo quantificar o efeito da fertirrigação com Si (Si) e da disponibilidade hídrica sobre a formação de fitólitos e o acúmulo de PhytOC em plantas de milho. O experimento foi conduzido em delineamento de blocos casualizados, em esquema fatorial 2×4 , combinando dois regimes hídricos (80% e 40% da capacidade de retenção de água no solo – CRA) e quatro doses de Si (0, 4, 8 e 12 kg ha^{-1}). Os resultados indicaram que a fertirrigação com Si foi eficaz mesmo em ambientes de déficit hídrico e induziu aumento da concentração de Si nas folhas e aumento do potencial hídrico, indicando a resiliência das plantas quando na presença do elemento benéfico. Houve aumento dos fitólitos no milho, nos dois regimes hídricos na presença de Si, entretanto, o acúmulo de carbono ocluído nos fitólitos PhytOC foi maior quando sob déficit hídrico indicando que há fatores subjacentes que regem a oclusão do C pelos fitólitos e devem ser mais estudados.

Esses resultados indicam que o manejo do Si pode constituir uma ferramenta agronômica estratégica, contribuindo tanto para a resiliência fisiológica do milho quanto para o sequestro de C e a mitigação climática em sistemas agrícolas sob crescente pressão hídrica.

Palavras-chave: adubação silicatada, sequestro de carbono, regime hídrico, estresse hídrico, PhytOC, irrigação.

SILICON AS A PROMOTER OF PHYTOLITH CARBON SEQUESTRATION IN MAIZE CULTIVATED IN A RHODIC FERRALSOL UNDER TWO WATER REGIMES

Abstract

Phytolith-occluded carbon (PhytOC) currently holds a significant role in atmospheric carbon (C) sequestration, and understanding how silicon fertilization and water regimes influence the increase of this sequestration by phytoliths is essential for crop management. This is especially relevant for maize (*Zea mays* L.), which occupies a prominent position in C sequestration potential as the second most cultivated crop on the planet. This study aimed to quantify the effect of Si fertigation and water availability on phytolith formation and PhytOC accumulation in maize plants. The experiment was conducted in a randomized block design with a 2×4 factorial scheme, combining two water regimes (80% and 40% of soil water-holding capacity — WHC) and four Si rates (0, 4, 8, and 12 kg ha⁻¹). The results indicated that Si fertigation was effective even under water deficit conditions, inducing an increase in leaf Si concentration and water potential, which reflects plant resilience in the presence of this beneficial element. Phytolith production in maize increased under both water regimes in the presence of Si; however, PhytOC accumulation was higher under water deficit, indicating underlying factors governing C occlusion within phytoliths that warrant further investigation. These findings demonstrate that Si management can serve as a strategic agronomic tool, contributing to both the physiological resilience of maize and C sequestration for climate mitigation in agricultural systems under increasing water stress.

Keywords: silicon fertilization, carbon sequestration, water regime, drought stress, PhytOC, irrigation.

1. Introdução

As concentrações atmosféricas de gases de efeito estufa (GEE) atingiram níveis recordes em 2023, com o CO₂ alcançando valor 51% superior ao observado na era pré-industrial (OMM, 2023).

Enquanto as emissões continuarem, o CO₂ continuará a se acumular na atmosfera, favorecendo o aquecimento global. Segundo o relatório do IPCC de 2023 apenas cortes na emissão de C já não são suficientes para evitar o aquecimento global, sendo necessária uma ampla gama de opções de remoção de carbono, entre elas o reflorestamento, o sequestro de C pelo solo e o manejo de resíduos de colheita (IPCC, 2023).

Nesse contexto, o sequestro de carbono por meio de sua oclusão nos fitólitos (PhytOC) e o potencial acúmulo dessa fração no solo em longo prazo têm sido considerados uma abordagem promissora para aumentar o armazenamento de C em agroecossistemas (Parr e Sullivan, 2005). Desde a proposição desse conceito, diversos estudos têm enfatizado a importância de quantificar a produção de PhytOC e seu potencial de contribuição para o sequestro de C e para a mitigação das mudanças climáticas em diferentes sistemas agrícolas, incluindo cultivos de arroz (Anjum e Prakash, 2021; Guo et al., 2015; Li et al., 2020) e trigo (Li et al., 2022; Wang e Sheng, 2022).

Os fitólitos são estruturas amorfas de sílica formadas a partir do Si absorvido pelas plantas, predominantemente na forma de ácido monossilícico (H₄SiO₄) presente na solução do solo. Após a absorção radicular, o Si é transportado pelo fluxo transpiratório e posteriormente depositado nos tecidos vegetais, onde ocorre sua polimerização nas estruturas intra e extracelulares das folhas, caule e raízes (Epstein, 1999; Piperno, 2006). Durante a biossilificação, compostos orgânicos celulares ricos em carbono, como fragmentos de parede celular, lignina, polissacarídeos e compostos fenólicos, são incorporados e fisicamente aprisionados na matriz de sílica em formação, resultando no C ocluso nos fitólitos (PhytOC) (Parr e Sullivan, 2005; Li et al., 2013). Esse carbono, protegido no interior do fitólito, pode permanecer estável no solo por longos períodos, contribuindo para o sequestro de C em escala global (Song et al., 2013; 2016). Com a morte ou colheita das plantas, os resíduos se decompõem no solo, porém os fitólitos permanecem por muitos anos nas

camadas do solo formando importantes e duradouros sumidouros de C (Song et al., 2013).

Conforme cresce a importância do uso eficiente e sustentável do solo como fator de equilíbrio entre o clima e ciclo do C, os esforços de mitigação climática devem ser focados em reduzir as emissões no uso da terra e aumentar a resiliência climática dos sumidouros de C em terras agricultáveis, colaborando assim também para a segurança alimentar em uma população mundial crescente (Cheng et al., 2023).

Entre as principais culturas agrícolas, o milho se destaca pela ampla área cultivada mundialmente, estimada em aproximadamente 200 milhões de hectares (FAO, 2022). Além de sua importância produtiva, a cultura apresenta expressivo potencial de contribuição para o sequestro de C via fitólitos, representando aproximadamente 23% do sumidouro global de carbono ocluso em fitólitos estimado para as terras cultivadas, atrás apenas do arroz (Song et al., 2013). Um caminho para potencializar o aumento do estoque de C ocluso nos fitólitos em terras agricultáveis seria por meio da otimização dos sistemas de cultivo com a fertilização e a irrigação (Song et al., 2013).

As pesquisas encontradas sobre manejo de adubação silicatada em milho e sua relação com fitólitos e PhytOC são incipientes. Entretanto, estudos desenvolvidos com outras espécies acumuladoras de Si demonstram que o aumento da disponibilidade desse elemento favorece a biossilicificação e o potencial de sequestro de carbono. Em arroz, a aplicação de fertilizantes à base de escória silicatada promoveu aumento da produção de fitólitos e de PhytOC (Song et al., 2015; Sun et al., 2019). Em trigo, a suplementação de Si em solução nutritiva também resultou em maior acúmulo de biomassa, fitólitos e PhytOC (Wang e Sheng, 2022). Resultados semelhantes foram observados em bambu moso, no qual a aplicação de metassilicato de sódio ($\text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$) aumentou significativamente o acúmulo de Si, de fitólitos e de PhytOC (Liu et al., 2023).

Poucos são os trabalhos indicando relação entre os fitólitos e a irrigação, porém a fim de entender o passado e ressaltar a importância de relacionar os fitólitos com a administração de água de irrigação dos antepassados, foram desenvolvidos estudos com diferentes culturas e níveis de

irrigação distintos em lavouras de trigo e cevada (Rosen e Weiner, 1994; Jenkins e Jamjourn, 2011). Esses estudos obtiveram uma correlação positiva entre a irrigação e o aumento do número de fitólitos através do aumento de biomassa das plantas.

Além do efeito direto da disponibilidade hídrica sobre o crescimento vegetal, estudos mais recentes indicam que o regime de irrigação também pode modificar a absorção e a deposição de Si nos tecidos vegetais. Em arroz houve interação entre disponibilidade de água e fertilização silicatada, de modo a influenciar a produção de fitólitos e o acúmulo de C ocluso, indicando que o regime hídrico não apenas afeta o desenvolvimento das plantas, mas também pode alterar a eficiência da biomineralização da sílica e o potencial de sequestro de carbono via PhytOC (Wang et al., 2015). Esses resultados reforçam que a disponibilidade hídrica deve ser considerada juntamente com a disponibilidade de Si quando se busca compreender a formação de fitólitos em espécies acumuladoras de silício.

Apesar dos avanços na compreensão do papel do Si na formação de fitólitos e do potencial desses como sumidouros de C, os mecanismos que controlam a oclusão de carbono (PhytOC) ainda não estão completamente elucidados. Estudos indicam que a adubação silicatada pode aumentar a produção de fitólitos e o conteúdo de PhytOC; no entanto, não está claro se esse aumento resulta diretamente da maior disponibilidade de Si ou de fatores fisiológicos associados às condições de crescimento das plantas, como o regime hídrico. Dessa forma, permanece como lacuna científica compreender como a interação entre disponibilidade de Si e condições hídricas influenciam a formação de fitólitos e o acúmulo de PhytOC, especialmente em condições de campo.

Nesse contexto é pertinente verificar se (i) a adubação silicatada aumenta a produção de fitólitos e de C ocluso em plantas de milho, devido à maior disponibilidade de Si para a deposição nas estruturas vegetais (ii) o regime hídrico de 80% CRA favorece uma maior produção de fitólitos e de C ocluso em comparação com o regime de 40% CRA, em razão do menor estresse hídrico e do melhor desenvolvimento das plantas e; (iii) se existe a correlação entre a adubação silicatada, a produção de fitólitos, e a oclusão de C. Sendo assim

objetiva-se com esse trabalho avaliar o efeito de diferentes doses de adubação silicatada em dois regimes hídricos, sobre a produção de fitólitos e o acúmulo de C ocluso nas plantas de milho.

2. Revisão de Literatura

2.1 Relevância do regime hídrico no cultivo de milho sob déficit hídrico

Segundo a FAO (2023), para alimentar o mundo e zerar a fome até 2030, será necessário aumentar em 60% a produção de alimento e o milho ocupa posição de destaque entre os cultivos com 202 milhões de hectares plantados no mundo.

Atualmente, a maior parte das terras cultiváveis depende de chuva (agricultura de sequeiro) e no milho representa 82% de toda a área plantada enquanto apenas 18% são relativos a áreas irrigadas. Embora a área irrigada seja menor, ela contribui desproporcionalmente para o volume total de produção, pois a produtividade em áreas irrigadas chega a ser 50% a 60% superior à de sequeiro (FAO, 2021).

Embora o milho possua um metabolismo C4 que lhe confere uma das maiores eficiências de uso da água entre os cereais (Steduto et al., 2012), sua alta dependência de disponibilidade hídrica nos estádios reprodutivos o torna vulnerável a mudanças climáticas e variações no regime de chuvas (FAO, 2021).

A necessidade hídrica total durante o ciclo do milho varia de 500 a 800 mm, porém a necessidade de distribuição é desigual ao longo do ciclo, atingindo seu ápice de demanda (7 a 9 mm/dia) durante o florescimento e polinização, conforme estabelecido nos parâmetros de coeficiente de cultura propostos por Allen et al., (1998) e validados para as condições tropicais por Albuquerque e Guimarães (2010).

A resposta do milho em decorrência ao déficit hídrico considerando o potencial hídrico da cultura (Bergonsi, et al. 2000) são: a redução da expansão celular e do crescimento foliar para conservar os recursos para um estresse leve de -0,8 a -1MPa (Hsiao, 1973; Takács et al., 2025) passando ao fechamento estomático mediado pelo ácido abscísico, à redução da transpiração e entrada

de CO₂ e da fotossíntese líquida em um estresse moderado (Boyer, 1970) chegando ao nível de stress severo, acima de 1,2 MPa, onde ativam-se mecanismos críticos de sobrevivência, como o ajuste osmótico via acúmulo de prolina, o enrolamento foliar para redução da temperatura interna e, em fases reprodutivas, o abortamento de grãos por falha na polinização e na translocação de fotoassimilados prejudicando seriamente a produção de grãos (Steduto et al., 2012; Takács et al., 2025).

Diante da forte influência do regime hídrico sobre o crescimento e a produtividade do milho, sobretudo no estágio de florescimento e enchimento de grãos, a adição de Si pode minimizar os efeitos do estresse hídrico podendo contribuir para segurança alimentar no mundo.

2.2 Importância do Si na cultura do milho

A crosta terrestre é composta em grande parte por Si, que é encontrado principalmente na forma de minerais de silicato, aluminossilicatos secundários e várias formas de dióxido de Si. Apesar da abundância de Si e de sua absorção pelas plantas não é considerado um nutriente essencial para as plantas, e sim um elemento benéfico (Epstein, 1999, 2001).

Em gramíneas, devido à elevada capacidade de absorção e acúmulo, o Si é frequentemente descrito como um elemento funcional de importância agrônômica. Sua atuação está associada a melhorias fisiológicas relevantes, incluindo maior tolerância ao déficit hídrico, aumento da eficiência no uso da água e modulação da transpiração. Adicionalmente, o Si contribui para o equilíbrio nutricional das plantas, promovendo maior eficiência na absorção de nutrientes e redução da toxicidade de elementos prejudiciais como Al, Fe (Prado, 2023 ; Epstein, 1999).

O Si no solo encontra-se predominantemente na forma de silicatos e sílica amorfa, sendo disponibilizado às plantas na forma de ácido monossilícico, que constitui a principal forma absorvida pelas raízes (Epstein, 1999; Cornelis et al., 2011). A absorção do Si ocorre tanto de forma passiva, via fluxo de massa associado à transpiração, quanto por mecanismos ativos mediados por transportadores específicos, como ZmLsi1 e ZmLsi2, responsáveis pela entrada

e transporte do elemento através das células radiculares (Mitano-Ueno e Ma, 2021).

Dentre os benefícios do Si o mais importante para o milho é a melhoria nos parâmetros fisiológicos, pois a cultura apresenta elevada sensibilidade ao déficit hídrico, especialmente em estádios críticos de desenvolvimento. Estudos experimentais indicam que a aplicação de Si pode promover aumento da biomassa, melhoria do potencial hídrico foliar e maior eficiência no uso da água, resultando em maior estabilidade produtiva sob condições de estresse (Gao et al.; 2006; Kaya et al., 2006; Xu et al., 2022).

Outro mecanismo importante está relacionado à mitigação do estresse oxidativo. O déficit hídrico promove a formação de espécies reativas de oxigênio (ROS), que podem causar danos celulares e comprometer a integridade das membranas. O Si atua estimulando o sistema antioxidante, aumentando a atividade de enzimas como superóxido dismutase, catalase e peroxidases, reduzindo os danos oxidativos e preservando a funcionalidade celular (Luyckx et al., 2017; Bhardwaj et al., 2021). Adicionalmente, o Si contribui para a manutenção da atividade fotossintética, protegendo o aparato fotossintético e garantindo maior eficiência na assimilação de C, mesmo sob condições ambientais adversas de estresse (Gao et al., 2006).

No milho, esses efeitos são particularmente relevantes, pois a cultura apresenta elevada sensibilidade ao déficit hídrico, especialmente em estádios críticos de desenvolvimento.

Evidenciando o papel do Si como modulador central das respostas fisiológicas do milho ao estresse hídrico em diferentes condições experimentais Costa et al., 2026, associa a aplicação de Si na promoção de melhorias consistentes em parâmetros fisiológicos do milho sob déficit hídrico, incluindo aumento da eficiência do uso da água, maior atividade antioxidante e manutenção da capacidade fotossintética.

Além dos benefícios fisiológicos que o Si induz na planta para aumentar a tolerância à restrição hídrica, existem outro benefício pouco evidenciado é a

formação de fitólitos, que tem implicação ambiental e que pode contribuir para o sequestro de C fato relevante nos dias atuais.

2.3 Formação de fitólitos e considerações gerais

Os fitólitos, são estruturas de sílica formadas pelo processo de biossilicificação dentro da planta. Os fitólitos são formados a partir da absorção do ácido monossilícico presente na solução do solo que é transportado, através do fluxo de transpiração até as folhas onde se precipitam. A precipitação dos fitólitos ocorre quando a solução se torna saturada devido à perda de água para o ambiente, resultando na solidificação da sílica nos espaços intercelulares, dentro do lúmen celular ou na própria parede da célula (Piperno, 2006).

A deposição dos fitólitos e sua posterior formação são influenciadas por fatores genéticos, fatores ambientais, fatores fenológicos e fatores nutricionais.

Quanto aos fatores genéticos, grupos taxonômicos específicos, como as famílias Poaceae (gramíneas), Cyperaceae e Arecaceae (palmeiras), são conhecidos como plantas acumuladoras de Si, pois possuem genes transportadores de Si que facilitam a absorção ativa (Hodson, 2016).

Fatores ambientais como a evapotranspiração influenciam na deposição dos fitólitos. Em ambientes áridos ou de alta incidência solar, a precipitação de sílica é intensificada. Além disso, a biodisponibilidade de sílica no solo e o pH são determinantes para a quantidade total de biomineral produzido (Parr e Sullivan, 2005).

A fenologia das plantas importa na formação dos fitólitos, pois o Si, uma vez depositado, não é remobilizado pela planta, é cumulativo. Plantas em estágios avançados de maturidade apresentam tecidos significativamente mais silicificados do que plântulas ou tecidos jovens. Com o passar do tempo, a sílica deixa de ocupar apenas os espaços intersticiais da parede celular e passa a preencher o lúmen celular, resultando em fitólitos mais densos e morfologicamente completos em tecidos senescentes (Motomura et al., 2004).

A base da bioassimilação reside na biodisponibilidade de ácido monossilícico na solução do solo, e a sua absorção é mediada por transportadores específicos, como os genes *ZmLsi1* e *ZmLsi2*, cuja eficiência de transporte é atrelada e limitada pela oferta de Si na rizosfera (Mitani-Ueno e Ma, 2021).

Embora o Si seja um dos elementos mais abundantes na crosta terrestre, nem sempre ele está em forma assimilável. Solos com baixo pH ou altamente intemperizados, como muitos Latossolos tropicais, podem apresentar deficiência de Si, o que reduz a produção de fitólitos. Nestes contextos, a adubação silicatada não apenas fortalece a resistência mecânica da planta contra pragas e estresses abióticos, mas também amplia a capacidade da planta de ocluir carbono em sua biomassa.

Por serem inorgânicos os fitólitos resistem à oxidação e à decomposição orgânica após a morte da planta, depositando-se no solo servindo como um registro estável da ocupação vegetal pretérita. Essa estabilidade permite sua utilização como ferramenta confiável na reconstrução paleoambiental, possibilitando a identificação de comunidades vegetais, inferência de espécies dominantes e até a detecção de práticas de manejo, como irrigação, além da estimativa de condições ambientais passadas, incluindo níveis de estresse hídrico (Rosen e Weiner, 1994; Madella et al., 2009; Jenkins e Jamjoum, 2011).

Uma abordagem mais moderna leva em consideração a importância ambiental dos fitólitos no que tange a remoção do CO₂ da atmosfera, pelas plantas, despontando como uma alternativa para mitigação dos gases de efeito estufa. Durante a formação do fitólito, uma fração de carbono orgânico, entre 0,1% e 6%, é aprisionada dentro da estrutura de sílica (Parr e Sullivan, 2011).

Este C ocluído (PhytOC) é altamente resistente, podendo permanecer no solo por milhares de anos, o que posiciona os fitólitos como um mecanismo relevante de sequestro de C a longo prazo. Estudos recentes sugerem que o PhytOC desempenha um papel crítico na mitigação das mudanças climáticas, pois, enquanto o C da biomassa foliar retorna à atmosfera em poucos anos, o

carbono dentro do fitólito é removido do ciclo ativo por escalas geológicas (Song et al., 2016).

2.4 Influência da adição de Si e do regime hídrico na formação dos fitólitos

A adubação silicatada está relacionada ao aumento da deposição de sílica nos tecidos vegetais, promovendo maior formação de fitólitos em diferentes culturas, especialmente em gramíneas (Song et al., 2015; Sun et al., 2019). Em arroz, diversos estudos demonstram que a aplicação de Si resulta em incremento tanto na produção de fitólitos quanto no C ocluso (PhytOC), evidenciando uma relação direta entre a disponibilidade do elemento e a intensidade da biossilificação (Song et al., 2015; Sun et al., 2019; Guo et al., 2015). Em outras culturas, como trigo e bambu, também há evidências de aumento na formação de fitólitos com a adição de Si, embora os efeitos sobre o PhytOC sejam mais variáveis e dependentes das condições ambientais e fisiológicas (Rehman et al., 2023; Lv et al., 2020). Esses estudos indicam que, embora o aumento de fitólitos com a adição de Si seja um padrão relativamente consistente, sua relação com o acúmulo de C ocluso não é necessariamente proporcional.

A adubação silicatada tem sido consistentemente associada ao aumento da deposição de sílica e à formação de fitólitos, pois que eleva a disponibilidade de Si na solução do solo e favorece sua absorção pelas plantas. No entanto, a eficiência desse processo depende da interação com fatores ambientais, especialmente o regime hídrico.

O regime hídrico exerce influência complexa sobre a formação de fitólitos, uma vez que afeta simultaneamente o crescimento vegetal, a absorção de Si e os processos de biossilificação. Em condições de maior disponibilidade de água, o aumento do crescimento vegetal pode resultar em maior acúmulo absoluto de sílica nos tecidos, indicando que a produção de fitólitos acompanha o aumento da biomassa sem, no entanto, implicar necessariamente em maior concentração relativa de fitólitos por unidade de massa seca, devido ao efeito de diluição (Jenkins e Jamjoum, 2011).

Por outro lado, sob condições de déficit hídrico, a redução do crescimento vegetal pode limitar o acúmulo total de sílica, mas alterar a concentração e as

características dos fitólitos formados. Nesse contexto, Meunier et al. (2017) demonstraram que o estresse hídrico modifica a formação de fitólitos, evidenciando que esse processo não responde de forma linear às condições ambientais. Em conjunto, esses estudos indicam que a formação de fitólitos resulta do balanço entre a disponibilidade de Si, o crescimento vegetal e as condições hídricas, sendo controlada por mecanismos que podem atuar de forma independente sobre o acúmulo total, a concentração e a composição dos fitólitos.

Song et al. (2013) estimaram que o sequestro de C por fitólitos em áreas agrícolas alcança cerca de 26 Tg CO₂ ano⁻¹ em escala global e demonstraram que esse sumidouro triplicou desde 1961, principalmente em decorrência da intensificação do manejo agrícola, incluindo fertilização e irrigação evidenciando que práticas de manejo, como a adubação silicatada e a irrigação têm grande potencial para ampliar o sequestro de C via fitólitos em sistemas agrícolas.

Apesar desses avanços, os estudos sobre a interação entre adubação silicatada, disponibilidade hídrica, formação de fitólitos e acúmulo de PhytOC em milho ainda são escassos, principalmente em condições de campo. A maior parte das pesquisas concentra-se nos efeitos fisiológicos do Si sobre o crescimento e a tolerância ao déficit hídrico, havendo pouca informação sobre como o manejo da cultura pode influenciar simultaneamente a biossilificação e o potencial de sequestro de carbono.

Nesse contexto, compreender a influência conjunta da adubação silicatada e do regime hídrico sobre a formação de fitólitos e o acúmulo de PhytOC em plantas de milho pode representar um passo importante visando ampliar o conhecimento sobre os mecanismos que regulam esses processos e fornecer bases científicas para o desenvolvimento de estratégias de manejo capazes de aumentar tanto a resiliência da cultura quanto sua contribuição para o potencial sequestro de C em sistemas agrícolas.

3. Material e Métodos

3.1 Localização e características da área de estudo

O experimento foi realizado na fazenda da Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias (FCAV), localizada na Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho (UNESP), em Jaboticabal estado de São Paulo (22° 43' 30" S de latitude e 47° 38' 00" W de longitude e altitude de 546 metros).

Durante a condução do experimento, desde o plantio até a colheita 02/05/2023 a 30/08/2023, as condições climáticas foram monitoradas por meio da estação meteorológica automatizada da FCAV/UNESP. Nesse período, a temperatura média do ar foi de $21,39 \pm 3,50$ °C, variando de 11,9 a 31,4 °C; a umidade relativa do ar apresentou média de $60,96 \pm 11,44\%$, com variação de 36,9 a 97,8%; e a radiação solar global média foi de $16,61 \pm 3,85$ MJ m⁻², oscilando entre 0,99 e 23,49 MJ m⁻² (Figura 1). O período experimental coincidiu com a época de menor precipitação do ano na região, caracterizada pela redução das chuvas, diminuição da umidade relativa do ar e elevada disponibilidade de radiação solar.

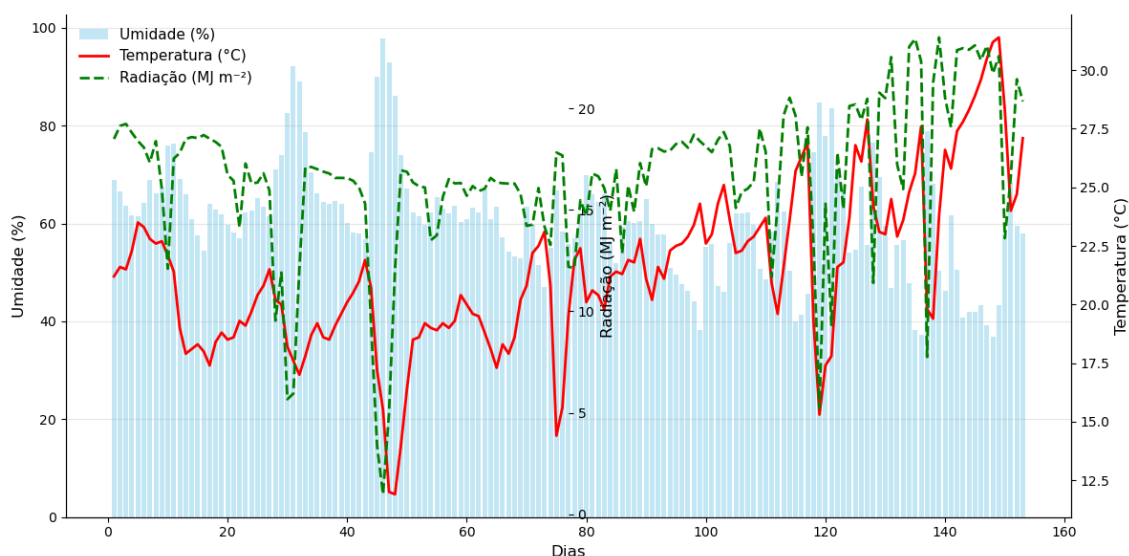


Fig. 1. Daily relative humidity (%), air temperature (°C), and solar radiation (MJ m⁻²) from maize sowing to harvest during the experimental period.

A precipitação acumulada durante o período foi de 110,3 mm, valor aproximadamente 15,2% inferior à média histórica (130 mm) registrada para o mesmo intervalo pela Estação Agroclimatológica da FCAV/UNESP (1971–2014). Essa condição evidencia que o experimento foi conduzido sob um cenário de baixa disponibilidade hídrica atmosférica e pluviométrica, característico do cultivo de milho de segunda safra na região, no qual o florescimento e o

enchimento de grãos normalmente ocorrem durante a estação seca. Dessa forma, a irrigação foi fundamental para garantir o estabelecimento e a manutenção dos regimes hídricos de 80% e 40% da capacidade de retenção de água (CRA) avaliados neste estudo.

O híbrido de milho utilizado no experimento foi o Status Viptera® 3, de ciclo precoce com elevado potencial agrônomo e ampla adaptabilidade às diferentes condições de cultivo. O híbrido apresenta boa sanidade de colmo, folhas e grãos e elevada tolerância ao complexo de enfezamentos, exigência de fertilidade classificada como média a alta e incorpora a tecnologia Viptera® 3 que confere proteção contra as principais lagartas da cultura do milho, além de tolerância aos herbicidas glifosato e glufosinato de amônio. A semeadura foi realizada com espaçamento de 0,45 m entre linhas e densidade de quatro sementes por metro linear, resultando em uma população de 88.889 plantas ha⁻¹.

As sementes foram tratadas com o inseticida Cruiser® 600 FS (tiаметoxam), o fungicida Maxim® Quattro (azoxistrobina, tiabendazol, fludioxonil e metalaxil-M) e o bioestimulante Epivio®. Durante o ciclo da cultura, o manejo fitossanitário foi realizado de forma preventiva, ao longo do ciclo, visando reduzir a interferência de pragas e doenças sobre o desenvolvimento das plantas. Para isso foram realizadas quatro aplicações de inseticidas Sperto® (acetamiprido + bifentrina) e Platinum Neo® (tiаметoxam + lambda-cialotrina), além de duas aplicações de fungicidas utilizando Ampligo®, Priori Xtra® (azoxistrobina + ciproconazol) e Opera® (piraclostrobina + epoxiconazol).

O experimento foi conduzido em um Latossolo Vermelho eutroférico (LVef), classificado conforme Andrioli e Centurion (1999). Os Latossolos da região de Jaboticabal são solos profundos, bem drenados, de textura argilosa e elevado grau de intemperismo, apresentando predominância de caulinita e óxidos de ferro e alumínio na fração argila. Embora o caráter eutroférico confira maior fertilidade natural em relação aos Latossolos distróficos, a intensa evolução pedogenética reduz as reservas de minerais primários ricos em Si, fazendo com que a disponibilidade desse elemento para as plantas dependa principalmente do equilíbrio entre os processos de dissolução, adsorção, lixiviação e manejo do solo. Essas características justificam a avaliação da

adubação silicatada, especialmente em culturas acumuladoras de Si, como o milho.

A adubação com N, P, S, Zn e B foi realizada conforme as recomendações de Cantarella et al. (2022) para a cultura do milho, com base nos resultados da análise química do solo da camada de 0–20 cm, conforme os métodos descritos por Raij et al. (2001) e Si disponível foi determinado conforme método descrito por Korndörfer et al. (2004) na (Tabela 1).

(Tabela 1). A adubação fosfatada foi realizada na semeadura, com a aplicação de 50 kg ha⁻¹ de P₂O₅ na forma de superfosfato simples diretamente no sulco. O nitrogênio foi fornecido via fertirrigação, utilizando ureia como fonte, parcelado em três aplicações iguais de 70 kg ha⁻¹ de N aos 7, 14 e 21 dias após a emergência (DAE). O potássio foi fornecido na dose de 70 kg ha⁻¹ de K₂O, na forma de cloreto de potássio, distribuído a lanço aos 9 DAE. Além da adubação de solo, foi realizada uma aplicação foliar de micronutrientes aos 20 dias de junho de 2023, utilizando sulfato de zinco monohidratado (0,17%) e ácido bórico (1,0 g L⁻¹), com volume de calda de 100 L ha⁻¹, visando suprir adequadamente a demanda de Zn e B da cultura.

Tabela 1. Atributos químicos do solo da área experimental antes da instalação do experimento.

Profundidade cm	pH CaCl ₂	MO g dm ⁻³	P mg dm ⁻³	S mg dm ⁻³	B mg dm ⁻³	Cu mg dm ⁻³	Fe mg dm ⁻³	Zn mg dm ⁻³	Ca mmol c dm ⁻³	Mg mmol c dm ⁻³	K mmol c dm ⁻³	H + Al mmol c dm ⁻³	Si mg kg ⁻¹	V %
0–20	4.5	24.0	43.0	24.0	0.5	8.0	34.0	4.7	38.0	10.0	2.4	28.0	3.0	65.0

3.2 Delineamento experimental, plot experimental e aplicação dos tratamentos

O delineamento experimental foi de blocos casualizados fatorial duplo 2X4, com dois regimes hídricos 80% e 40% da capacidade de retenção de água no solo (CRA), e quatro doses de Si: 0; 4 ; 8; 12 kg ha⁻¹ que foram fornecidos através de fertirrigação totalizando oito tratamentos com 4 repetições. As parcelas experimentais apresentaram dimensões de 2,25 x 6 m, área total de 13,5 m² e área útil de 5,4 m².

O sistema de irrigação foi constituído por fitas gotejadoras autocompensantes, cujo mecanismo de compensação de pressão proporciona

vazão constante e assegurou elevada uniformidade de distribuição da água. Os emissores foram espaçados entre si em 0,50 m e com uma vazão de 1,6 L h⁻¹.

Os níveis de CRA foram determinados utilizando técnicas de coleta de amostras indeformadas do solo. A curva de retenção de água foi construída por meio de testes em mesa de tensão e câmara de pressão de Richards (Klute, 1986).

Inicialmente, as plantas foram mantidas em condições hídricas adequadas (80% CRA), por 30 dias após a emergência da cultura, para seu melhor estabelecimento. Posteriormente o nível de déficit hídrico de 40% de CRA foi implementado nas respectivas parcelas.

A lâmina d'água aplicada para manutenção dos níveis de CRA foi determinada por meio de balanços hídricos diários, que levaram em consideração à irrigação somada a precipitação e a evapotranspiração (ETC) das plantas em cada estágio fenológico da cultura.

O monitoramento da umidade do solo foi realizado utilizando um Reflectômetro no Domínio do Tempo (TDR), em medições diárias, e para maior precisão a calibração do TDR, foi realizada através da coleta de amostras nos pontos amostrados e determinada pelo método gravimétrico.

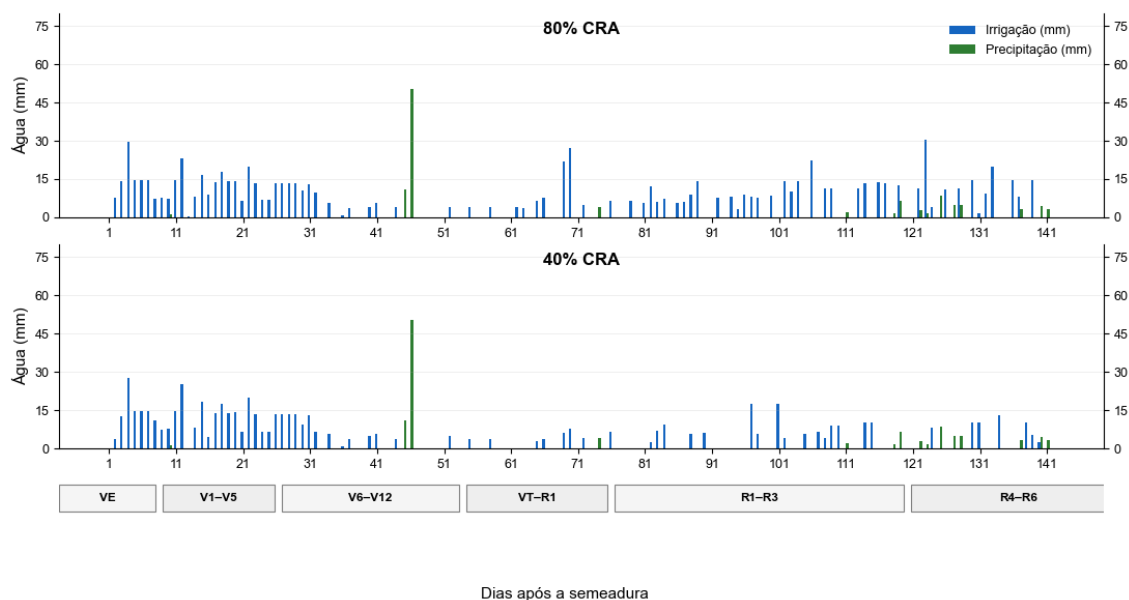


Figura 2. Acréscimo de água (mm) sob diferentes regimes hídricos durante o período experimental. As barras representam a irrigação (azul) e precipitação (verde) aplicadas para cada regime de água sem déficit hídrico, e com déficit hídrico severo. VE: emergência; V1–V5: vegetativo inicial; V6–V12: vegetativo intermediário; VT–R1: pendoamento e florescimento; R1–

R3: florescimento e enchimento inicial dos grãos; R4–R6: enchimento final dos grãos e maturação fisiológica.

O manejo de Si na fertirrigação teve como fonte o silicato de potássio nas doses de 0; 26,6 ; 53,3 ; 80,0 kg ha⁻¹ que correspondem a 0; 4; 8 e 12 kg ha⁻¹ de Si, considerando que o silicato de potássio possui 15% de Si. Essas dosagens foram divididas em 6 aplicações que forneceram 0; 0,66; 1,33; e 2kg ha⁻¹ de Si cada uma. Esse parcelamento visou minimizar os efeitos da polimerização do Si e foi acrescido de sorbitol a 10% para favorecer a estabilidade da solução na oferta de Si na forma monomérica (Babiker e Duncan, 1974). A lâmina de fertirrigação utilizada foi de 2,5 mm e a solução fertirrigada apresentou as seguintes concentrações: 0 mM L⁻¹ ; 1 mM L⁻¹ de Si; 2 mM L⁻¹ de Si e 3 mM L⁻¹ de Si.

O Si fornecido através da fertirrigação teve início no período vegetativo, quando as demandas nutricionais das plantas foram maiores, e foram realizadas a cada 4 dias começando aos 8 dias após a emergência.

As parcelas que receberam 0, 4 e 8 kg ha⁻¹ de Si receberam, respectivamente, 57,9; 38,6 e 19,3 kg ha⁻¹ de cloreto de potássio(K₂O), parcelados em seis aplicações realizadas a lanço nas parcelas, visando compensar o K₂O fornecido pelo silicato de potássio.

4. Análises

4.1 Amostras e Determinação de Biomassa

As plantas foram coletadas no campo no estágio R1, utilizando somente as três linhas centrais para avaliação experimental excluindo 1 m de cada extremidade e foram coletadas 10 plantas de cada parcela que foram levadas para o laboratório onde a parte aérea foi cortada, separando caule e as folhas.

Posteriormente as folhas e caules foram lavados primeiramente em água corrente e depois em solução detergente (0,1% v/v), solução de HCl (0,3% v/v) e em água deionizada. O material vegetal foi seco em estufa de circulação forçada de ar (TE-394/3- MP, Tecnal, BR) (65±5°C), até atingir uma massa constante. Em seguida as amostras foram pesadas em balança semi-analítica, para determinação da massa seca (MS) e então moída em moinho de facas tipo Wiley. A MS produzida foi expressa em grama por planta.

4.2 Avaliação do potencial hídrico

A avaliação foi realizada no terço central da terceira folha completamente desenvolvida (+3), contada a partir do ápice das plantas de milho. As leituras foram realizadas entre 4 e 6 horas da manhã possibilitando coletar o melhor status hídrico basal das plantas quando as plantas estavam em estágio de R1, utilizando uma planta por parcela, totalizando 32 avaliações. A determinação do potencial hídrico foi realizada antes da coleta das plantas para estimar biomassa, e se deu através da medição da pressão gradual na folha cortada medida por câmara de pressão de Scholander (Scholander, P. F et al., 1965).

4.3 Determinação do Si

4.3.1 Teor de Si e Concentração de Si na planta

O teor de Si foi obtido tanto nas folhas quanto no caule através da extração com solução de peróxido de hidrogênio e hidróxido de sódio em estufa de circulação forçada de ar (TE-394/3-MP, Tecnal, BR) a $120 \pm 5^\circ\text{C}$, segundo a técnica de Kraska e Breitenberck (2010). A determinação foi realizada por colorimetria com molibdato de amônio, ácido oxálico e ácido clorídrico, seguida de leitura em espectrofotômetro 400 nm e o teor expresso em g kg^{-1} (Korndörfer et al., 2004). O Si acumulado na planta foi calculado usando os teores de Si multiplicados pela MS da planta e expresso em mg planta^{-1} .

4.3.2 Teor de C e concentração de C na planta

O teor de carbono total nas folhas e no caule foi determinado por combustão seca em analisador elementar, utilizando amostras previamente secas, moídas e homogeneizadas. Os resultados foram expressos em g kg^{-1} de matéria seca (MS). O carbono acumulado foi calculado multiplicando-se o teor de carbono pela massa seca correspondente de cada órgão vegetal, sendo expresso em g planta^{-1} .

4.3.3 Si disponível no solo

O teor de Si disponível no solo foi determinado a partir da coleta de amostra de solo de 0-20 cm quando as plantas estavam em estágio de R1. A análise foi realizada por extração com solução de CaCl_2 $0,01 \text{ mol L}^{-1}$, na relação solo: extrator de 1:5, sob agitação por 1 h. O extrato foi filtrado e o Si quantificado

por método colorimétrico do molibdato, com leitura em espectrofotômetro a 660 nm, conforme (Korndörfer et al., 2004).

4.3.4 Determinação dos fenóis

A extração dos fenóis foi realizada a partir das amostras das folhas da planta, utilizando metanol 80% (v/v), sob agitação por 60 minutos à temperatura ambiente. Após centrifugação, o sobrenadante foi utilizado para determinação dos fenóis totais pelo método de Folin-Ciocalteu, conforme Singleton e Rossi (1965). A absorbância foi determinada em espectrofotômetro a 765 nm e os resultados expressos em mg equivalentes de ácido gálico (EAG) g⁻¹ de matéria seca.

4.4 Determinação da quantidade de fitólitos

Os fitólitos foram obtidos a partir das amostras de folhas e de caules utilizando o método dry ashing modificado (Puppe e Leue, 2018). Inicialmente, foram pesados 2,5 g de material vegetal seco, os quais foram submetidos à calcinação em mufla a 450 °C por 6 horas, para combustão da matéria orgânica. Em seguida, as amostras permaneceram na mufla por mais 6 horas até completo resfriamento. A matéria orgânica residual foi oxidada com H₂O₂ (30%) e HNO₃ (65%) a 80 °C em estufa, até cessar a reação evidenciada pela ausência de efervescência e pela completa digestão do material orgânico. Posteriormente, os carbonatos foram removidos com HCl a 10%, sob aquecimento a 80 °C por 30 minutos. Os fitólitos obtidos foram lavados com água destilada, secos em estufa a 105 °C até massa constante e quantificados por pesagem em balança analítica, sendo os resultados expressos em mg g⁻¹ de massa seca.

4.5 Determinação do PhytOC e Estimativa de Sequestro de Carbono

Para a obtenção do C ocluso nos fitólitos foi usada a técnica de Walkley e Black (1934), onde a amostra com os fitólitos foi oxidada com dicromato de potássio em meio acidulado com ácido sulfúrico. Após a oxidação da matéria orgânica, o excesso de dicromato de potássio não consumido na reação foi determinado por titulação com solução de sulfato ferroso amoniacal, utilizando ferroína como indicador do ponto final da titulação. A diferença entre a quantidade inicial de dicromato adicionada e a quantidade residual determinada

por titulação foi utilizada para calcular o carbono oxidado presente nos fitólitos, sendo os resultados posteriormente convertidos em PhytOC nos fitólitos (PhytOC) e expressos em mg C g^{-1} de fitólito.

A taxa de sequestro de carbono (R_p) ($\text{kg CO}_2 \text{ ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$) foi determinada a partir da biomassa da planta (M em kg), da densidade de plantas por hectare (N), do conteúdo de PhytOC nos fitólitos (H , g kg^{-1}) e da razão entre os pesos moleculares do CO_2 e do C (MCO_2/MC), conforme proposto por Wang e Sheng (2022), de acordo com a equação:

$$R_p = M \times N \times H \times (\text{MCO}_2/\text{MC})$$

A taxa anual de sequestro de carbono pelos fitólitos (A_p) foi calculada com base na mesma abordagem, multiplicando-se a taxa de sequestro de carbono (R_p) pela área cultivada (S , ha^2), conforme:

$$A_p = R_p \times S$$

4.6 Análises Estatísticas

Inicialmente, foram avaliados os pressupostos da análise de variância por meio dos testes de normalidade dos resíduos e de homogeneidade das variâncias (homocedasticidade). Atendidos esses pressupostos, os dados foram submetidos à análise de variância (teste F) a 5% de probabilidade. Quando observado efeito significativo, as médias dos fatores qualitativos foram comparadas pelo teste de Tukey ($p \leq 0,05$), enquanto os fatores quantitativos foram avaliados por análise de regressão. Adicionalmente, foram realizadas análises multivariadas por agrupamento hierárquico (Hierarchical Cluster Analysis – HCA) e análise de componentes principais (Principal Component Analysis – PCA). Todas as análises estatísticas foram realizadas em ambiente Python.

5. Resultados

Para as folhas do milho, não houve interação significativa entre os fatores regime hídrico e doses de Si para o potencial hídrico foliar, massa seca, concentração de Si, acúmulo de Si e acúmulo de C, sendo observada interação apenas para concentração de C (Figura 3).

O Si disponível no solo foi maior no regime hídrico de 40% da CRA em comparação ao de 80% da CRA nas doses de 0 e 8 kg ha^{-1} de Si. Para essa

variável, observou-se ajuste quadrático em função das doses de Si, sendo os maiores valores obtidos no regime de 40% da CRA, com concentração máxima de $11,75 \text{ mg kg}^{-1}$ na dose estimada de $8,35 \text{ kg ha}^{-1}$. No regime hídrico de 80% da CRA, a concentração máxima foi de $10,59 \text{ mg kg}^{-1}$ na dose estimada de $8,60 \text{ kg ha}^{-1}$ (Figura 3a).

O regime hídrico de 80% da CRA foi superior a 40% da CRA para o potencial hídrico foliar em todas as doses de Si. Para as doses de Si nas plantas sob 80% CRA não houve ajuste quadrático e o valor médio foi de $-0,53 \text{ MPa}$. Para as plantas sob 40% da CRA, houve ajuste quadrático, atingindo ponto máximo em $-0,90 \text{ MPa}$ na concentração de $6,67 \text{ kg ha}^{-1}$ (Figura 3b).

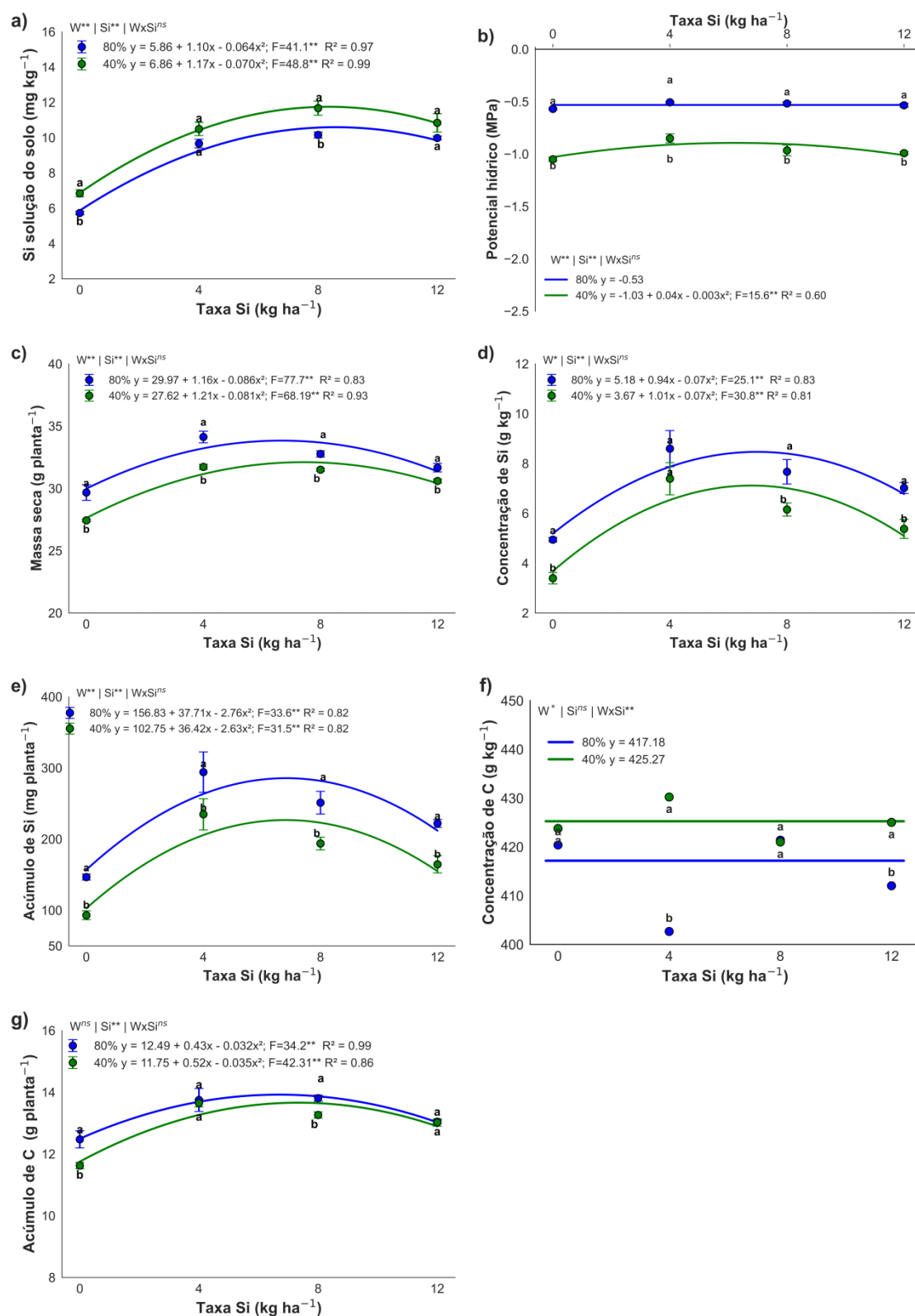


Figura 3. Teor de Si no solo (a) potencial hídrico foliar (b), massa seca (c), concentração de Si (d), Si acumulado (e), concentração de C (f), C Acumulado (g) nas folhas de plantas de milho cultivadas em duas condições hídricas (W- com déficit hídrico 40% capacidade de retenção de água (CRA), sem déficit 80% CRA) associado a 4 doses de Si (0,4,8 e 12 kg ha⁻¹); *, **, ns, 5% significância, 1% significância e não significativo pelo teste F. Letras diferentes indicam diferença

significativa para regimes hídricos em uma mesma dosagem de Si de acordo com o Teste de Tukey a 5% de Probabilidade .

A massa seca da folha foi maior sob regime hídrico de 80% da CRA quando comparada a 40% a CRA para todas as doses de Si (Figura 3c). Em ambos os regimes hídricos houve ajuste quadrático em função do aumento das doses de Si, atingindo massa seca foliar máxima de 33,9 e 32,1 g planta⁻¹ em 6,74 e 7,47 kg ha⁻¹ para os regimes de 80 e 40% de CRA, respectivamente.

A concentração de Si nas folhas sob regime hídrico de 80% de CRA foi superior ao de 40% CRA nas doses de 0, 8 e 12 kg ha⁻¹ enquanto para a dose de 4 kg ha⁻¹ não houve diferença estatística (Figura 3d). Levando em consideração as doses de Si o comportamento foi quadrático para ambos os regimes hídricos tendo atingido o ponto máximo na dose de 6,71 kg ha⁻¹ com teor de Si 8,3 g kg⁻¹ para 80% de CRA e para 40% na dose de CRA 7,21 kg ha⁻¹ com teor de Si máximo de 7,3 g kg⁻¹.

Em relação ao Si acumulado na folha o regime hídrico de 80% de CRA foi superior para todas as doses de Si quando comparado ao regime de 40% de CRA. As doses de Si apresentaram comportamento quadrático em ambos os regimes hídricos atingindo os maiores valores do teor acumulado de Si na folha de 13,93 e 13,68 g kg⁻¹ nas doses de 6,72 e 7,43 mg kg⁻¹ para 80% e 40% de CRA respectivamente.

A concentração de carbono na folha apresentou interação significativa entre o regime hídrico e as doses de Si (Figura 3f). Em geral, observaram-se maiores concentrações de carbono sob 40% da capacidade de retenção de água, sem tendência consistente de resposta às doses de Si.

O acúmulo de C nas folhas foi superior no regime hídrico de 80% CRA em comparação ao de 40% CRA, especialmente nas doses de 0 e 8 kg ha⁻¹ de Si (Figura 3g). Em relação às doses, observou-se ajuste quadrático para ambos os regimes hídricos. O máximo estimado de C foliar no regime de 80% CRA foi de 13,93 g planta⁻¹, obtido na dose de 6,72 kg ha⁻¹ de Si. Já no regime de 40% CRA, o máximo estimado foi de 13,68 g planta⁻¹, na dose de 7,43 kg ha⁻¹ de Si (Figura 3g).

Tabela 2. Parâmetros do modelo (a_0, a_1, a_2), coeficientes de determinação (R^2), significância do teste F e pontos ótimos (x = dose de Si, y = resposta predita) para as variáveis de resposta avaliadas de plantas de milho cultivadas sob diferentes condições hídricas.

Regime hídrico	a_0	a_1	a_2	R^2	Teste F	Ponto ótimo x (kg ha ⁻¹ Si)	Ponto ótimo y (mg EAG g ⁻¹ MS)
80% CRA	9,178	1,189	-0,0780	0,9971	66,05**	7,6254	13,7125
40% CRA	12,072	0,515	-0,0524	0,9888	29,80**	4,9120	13,3358

Os compostos fenólicos totais nas folhas responderam de forma quadrática às doses de Si em ambos os regimes hídricos (Tabela 2). No regime de 80% da CRA, o maior teor estimado de fenóis foi de 13,71 mg EAG g⁻¹ de MS, obtido na dose de 7,63 kg ha⁻¹ de Si, enquanto no regime de 40% da CRA o valor máximo estimado foi de 13,34 mg EAG g⁻¹ de MS, na dose de 4,91 kg ha⁻¹ de Si. Ambos os modelos apresentaram elevado coeficiente de determinação, $R^2 = 0,9971$ e $0,9888$ para 80% e 40% da CRA, respectivamente, indicando bom ajuste das equações de regressão.

Para o caule das plantas a massa seca, Si acumulado e o C acumulado não apresentaram interação entre os regimes hídricos e doses de Si aplicadas, enquanto para concentração de Si e concentração de C houve a interação (Figura 4).

Em relação à matéria seca do caule os regimes hídricos de 80% e 40 % de CRA não apresentaram diferenças nas doses de Si aplicadas (Figura 4a). As doses de Si apresentaram comportamento quadrático em ambos regimes hídricos, os valores máximos obtidos para a matéria seca de 33,69 g planta⁻¹ e 31,36 g planta⁻¹, nas doses de Si de 5,27 e 6,0 kg ha⁻¹ para 80% e 40% de CRA respectivamente.

Para concentração de Si no caule, foi observada superioridade do regime hídrico de 80% de CRA em relação ao 40% apenas na dose de 8 kg ha⁻¹ (Figura 4b) . Para as doses de Si não houve ajuste quadrático para nenhum dos regimes hídricos com médias de 2,64 e 2,49 mg kg⁻¹ nos regimes de 80% e 40% respectivamente.

O acúmulo de Si no caule apresentou superioridade no regime hídrico de 80% de CRA apenas na dose de 8 kg ha⁻¹, nas demais doses não apresentou

diferença quando comparado com 40% CRA. Para as doses de Si a resposta foi quadrática sob regime hídrico de 80% atingindo ponto máximo na dose de 5,37 kg ha⁻¹ com acúmulo de 94,61 mg planta⁻¹. No regime de 40% CRA, não houve efeito significativo da adubação silicatada com valor médio de 68,18 mg planta⁻¹ (Figura 4c) .

Para concentração de C no caule houve diferença entre os regimes hídricos avaliados a maior para 40% CRA apenas na dose de 12 kg ha⁻¹ de Si . Não houve ajuste quadrático para as doses de Si aplicadas, os valores médios foram de 443,56 e 432,98 g kg⁻¹ para 40% e 80% CRA, respectivamente (Figura 4d).

O acúmulo de C no caule não apresentou resposta significativa para os regimes hídricos de 80% CRA e 40% CRA para nenhuma das doses de Si aplicadas. Em relação às doses de Si a resposta foi quadrática em ambos os regimes hídricos, com incremento máximo nas doses de 5,25 e 5,24 kg ha⁻¹ nos regimes hídricos de 80% e 40% CRA respectivamente. O acúmulo de carbono foi maior no regime de 80% CRA atingindo o máximo em 14,37 g planta⁻¹, enquanto no regime de 40% foi de 13,24 g planta⁻¹ (Figura 4e).

Relativo à quantidade de fitólitos na folha, observaram-se diferenças entre os regimes hídricos apenas nas doses intermediárias de Si (4 e 8 kg ha⁻¹), nas quais o tratamento com 80% da CRA apresentou valores superiores de fitólitos em relação ao de 40% da CRA. Para as doses de Si a resposta foi quadrática nos dois regimes hídricos, atingindo o valor máximo de 41,80 mg g⁻¹ para 80% da CRA e 37,6 mg g⁻¹ para 40% da CRA valores obtidos nas doses de 7 e 7,26 kg ha⁻¹ de Si, respectivamente (Figura 5a). Não foi observada interação entre os fatores: regime hídrico e doses de Si aplicadas.

Para o teor de fitólitos no caule o regime hídrico de 40% da CRA propiciou valores superiores ao de 80% da CRA nas doses de 0 e 4 kg ha⁻¹ de Si, não foram verificadas diferenças significativas entre os regimes nas doses de 8 e 12 kg ha⁻¹. Em relação às doses de Si os dois regimes hídricos apresentaram ajuste quadrático, com valores máximos estimados de 14,45 mg g⁻¹ na dose de 5,27 kg ha⁻¹ de Si para 40% da CRA e de 12,14 mg g⁻¹ na dose de 7,25 kg ha⁻¹ de Si para 80% da CRA (Figura 5b). Houve interação entre o regime hídrico e as doses de Si.

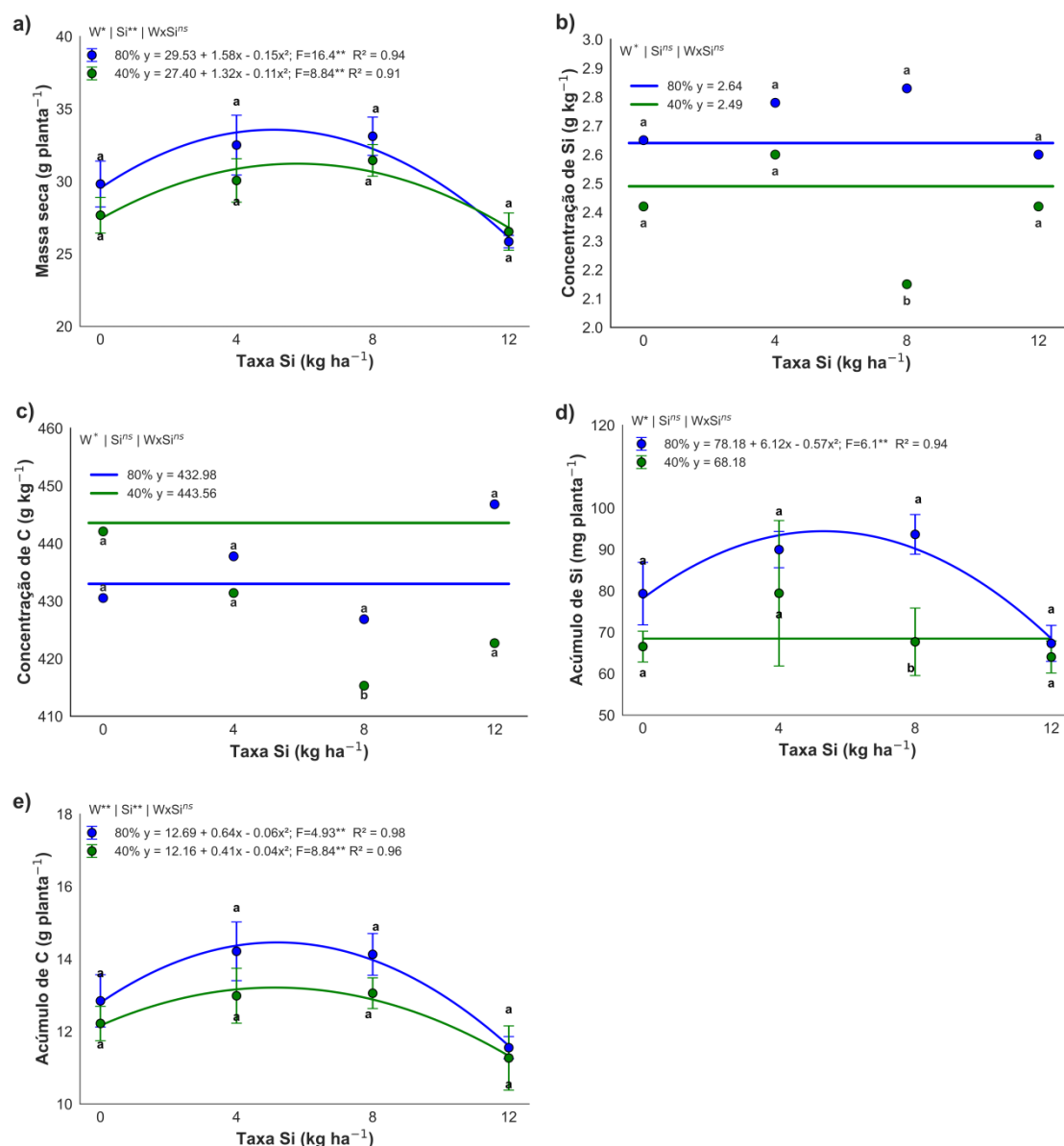


Figura 4. Matéria seca (a), concentração de Si (b), Si acumulado (c), concentração de C (d), C acumulado (e) no caule de plantas de milho cultivadas em duas condições hídricas (com déficit hídrico 40% capacidade de retenção de água (CRA), sem déficit 80% CRA) associado a 4 doses de Si (0, 4, 8 e 12 kg ha⁻¹); *, **, ns, 5% significância, 1% significância e não significativo pelo teste F. Letras diferentes indicam diferença significativa para regimes hídricos em uma mesma dosagem de Si de acordo com o Teste de Tukey a 5% .

A quantidade de PhytOC na folha foi superior no regime hídrico de 40% CRA em relação ao de 80% de CRA para todas as doses de Si. As doses de Si para ambos os regimes hídricos apresentaram ajustes quadráticos e atingiram maiores valores de PhytOC, correspondentes a 6,21 e 5,31 mg kg MS⁻¹ nas doses de 6,5 e 7,0 kg ha⁻¹ de Si para os regimes de 40 e 80%, respectivamente,

sem no entanto apresentar diferença significativa entre os fatores hídrico e adubação com Si (Figura 5c).

A quantidade de PhytOC no caule foi superior no regime hídrico de 40% da CRA em comparação ao de 80% da CRA nas doses de 0, 4 e 8 kg ha⁻¹ de Si, enquanto na dose de 12 kg ha⁻¹ não foram observadas diferenças entre os regimes (Figura 5d). Em ambos os regimes hídricos, o comportamento em resposta às doses de Si foi quadrático. O valor máximo estimado para o regime de 40% da CRA foi de 0,80 mg kg MS⁻¹, obtido na dose de 4,0 kg ha⁻¹ de Si, enquanto no regime de 80% da CRA o máximo estimado foi de 0.64 mg kg MS⁻¹, na dose de 6,0 kg ha⁻¹ de Si. A interação entre regime hídrico e doses de Si foi significativa.

Para o PhytOC total na planta os valores observados para o regime hídrico de 40% CRA foram superiores aos de 80% de CRA para todas as doses de Si. Para as doses de Si o resultado foi quadrático para os regimes hídricos de 80 e 40% CRA, com valores de dose de Si de 5,67 kg ha⁻¹ e PhytOC de 6,21 mg kg MS⁻¹ para 40% de CRA e de 6,50 kg ha⁻¹ e 5,88 mg kg MS⁻¹ para 80% CRA, sem que houvesse interação entre os fatores regime hídrico e doses de Si (Figura 5e).

Ao analisar o sequestro total de C por ha, foi possível observar maiores valores no regime hídrico de 40% do que 80% de CRA apenas nas doses de 0 e 8 kg de Si ha⁻¹. O resultado foi quadrático para ambos os regimes hídricos, com valores máximos de sequestro de C por hectare foram 60 e 67,18 t CO² ha⁻¹ nas doses de 6,39 kg ha⁻¹ e 6,87 kg ha⁻¹ para os regimes de 80 e 40% de CRA respectivamente (Figura 5f).

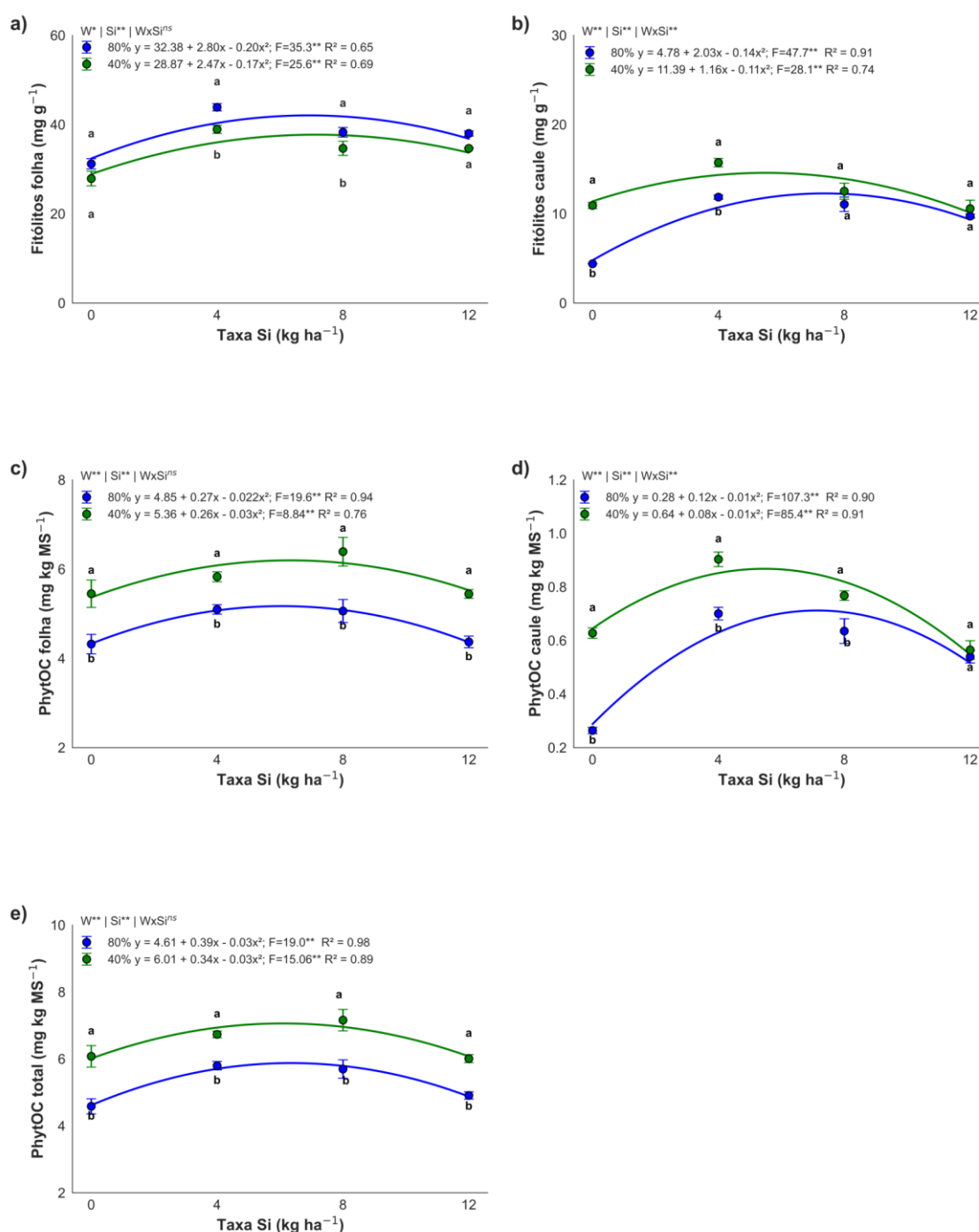


Figura 5. Quantidade de fitólitos na folha (a), Quantidade de fitólitos no caule (b), PhytOC nas folhas (c), PhytOC no caule (d), PhytOC total (e), Total C Sequestrado (f), em plantas de milho em duas condições hídricas (W- com déficit hídrico 40% capacidade de retenção de água (CRA), sem déficit 80% CRA) associado a 4 doses de Si (0, 4, 8 e 12 kg ha⁻¹); *, **, ns, 5% significância, 1% significância e não significativo pelo teste F. Letras diferentes indicam diferença significativa para regimes hídricos em uma mesma dosagem de Si de acordo com o Teste de Tukey a 5% de probabilidade.

As plantas sob regime hídrico de 40% CRA, sem acréscimo de Si e com 12 kg ha⁻¹ de Si apresentaram padrões multivariados semelhantes. Nesses tratamentos, observou-se maior associação com variáveis relacionadas à biossilificação do Si Ffolha e Fcaule e menores valores relativos para variáveis estruturais e fisiológicas SDM e Ψ_w (Figura 6).

Em contraste, os tratamentos com 4 e 8 kg ha⁻¹ de Si apresentaram maior associação com variáveis relacionadas à biossilificação do carbono PhytoLeaf, PhytoStem, TXCf, TXCt e PhytOCT comportamento evidenciado no regime hídrico de 40% CRA.

Por outro lado as plantas de milho com 80% de CRA, nos tratamentos sem Si e com 12 kg ha⁻¹ de Si também exibiram padrões multivariados semelhantes. Já os tratamentos com doses intermediárias de Si de 4 e 8 kg ha⁻¹ apresentaram maior associação com variáveis relacionadas à fisiologia e estruturais da planta como as variáveis de acúmulo de biomassa SDM e LDM.

A análise de PCA como a de Biplot demonstrou robustez estatística, com as duas dimensões (Dim1 e Dim2) respondendo juntas por 67,9% da variância total dos dados, podendo garantir que as interpretações sobre as relações entre regime hídrico e adubação de Si e acúmulo de fitólitos sejam representativas (Figura 7 a e b).

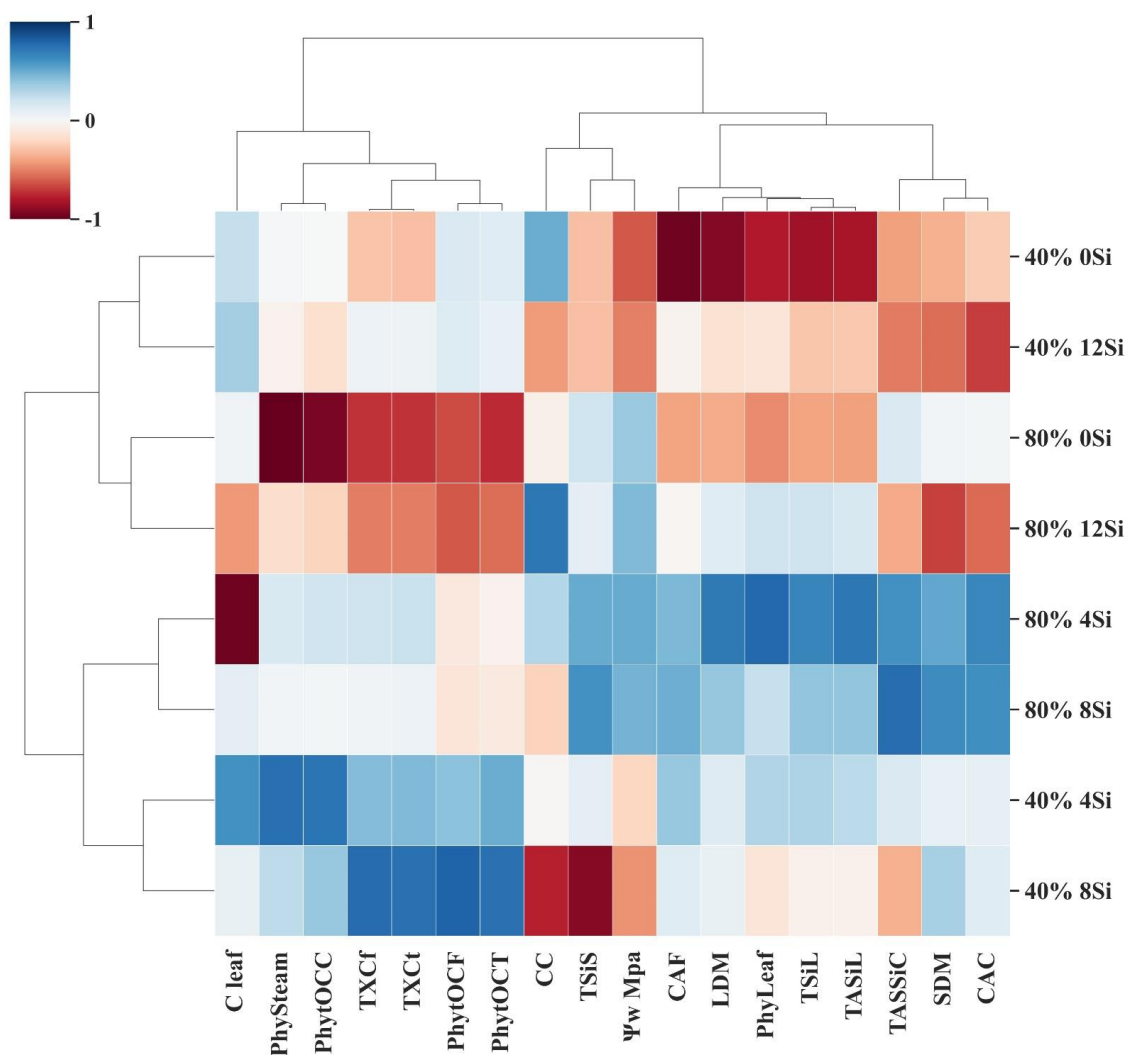


Figura 6. Mapa de agrupamento hierárquico (MAH) das variáveis de resposta em plantas de milho cultivadas sob dois regimes hídricos (40% e 80% da capacidade de retenção de água do solo) e quatro doses de Si (0, 4, 8 e 12 kg ha⁻¹). Variáveis Resposta: teor carbono na folha (C leaf), teor C caule (CC), Concentração de C folha (CAF), concentração de C no caule (CAC), massa seca da folha (SDM), massa seca do caule (LDM), potencial hídrico foliar (Ψw MPa), teor de Si no caule (TSiS), teor de Si na folha (TSiL), teor total de Si na folha (TASiL), teor total de Si no caule (TASSiC), fitólitos na folha (PhyLeaf), fitólitos no caule (PhySteam), carbono ocluso em fitólitos na folha (PhytOCF), carbono ocluso em fitólitos no colmo (PhytOCC).

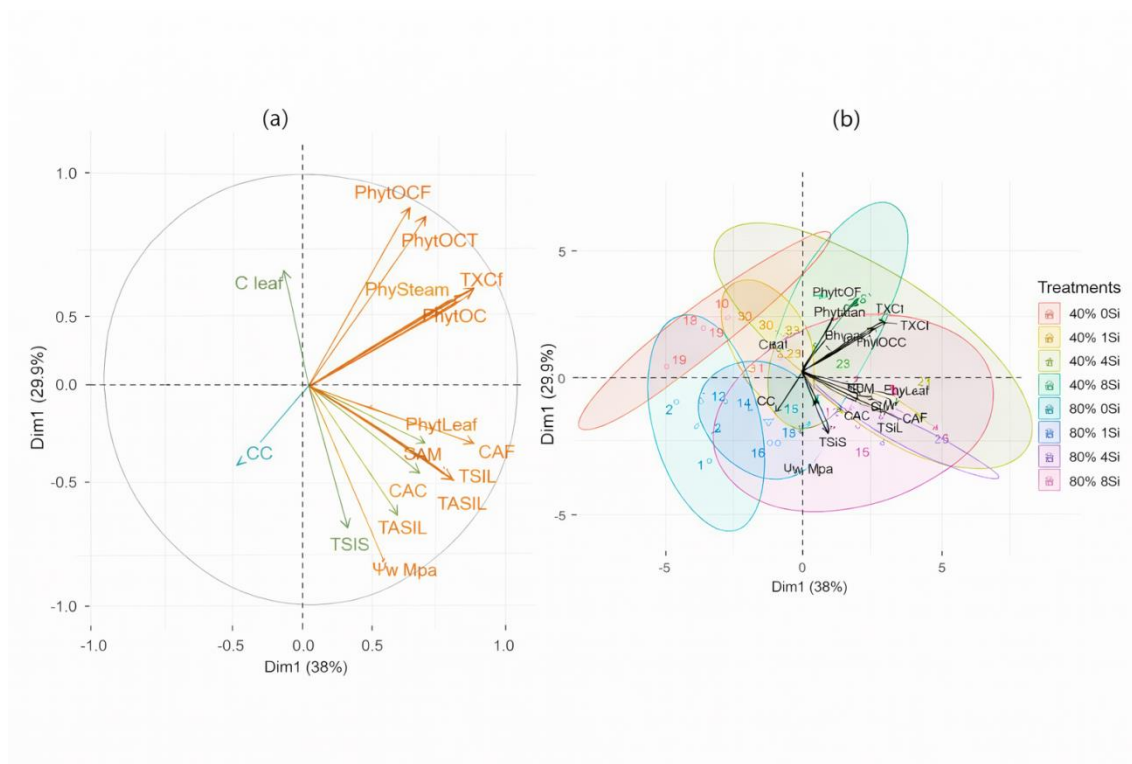


Figura 7. (a) Análise de Componentes Principais (ACP) das variáveis de reposta representadas no círculo de correlação de plantas de milho cultivadas sob dois regimes hídricos (40% e 80% da capacidade de retenção de água do solo e quatro doses de Si (0, 4, 8 e 12 kg ha⁻¹). (b) Biplot da ACP das variáveis resposta. Variáveis Resposta: teor carbono na folha (C leaf), teor C caule (CC), Concentração de C folha (CAF), concentração de C no caule (CAC), massa seca da folha (SDM), massa seca do caule (LDM), potencial hídrico foliar (Ψ_w MPa), teor de Si no caule (TSiS), teor de Si na folha (TSiL), teor total de Si na folha (TASiL), teor total de Si no caule (TASSiC), fitólitos na folha (PhyLeaf), fitólitos no caule (PhySteam), carbono ocluso nos fitólitos na folha (PhytOCF), carbono ocluso nos fitólitos no colmo (PhytOCC).

Relacionados ao Dim1 estão os tratamentos associados aos maiores valores das variáveis relacionadas à biossiliificação e sequestro de carbono, como PhytOCF, PhytOCT, PhytOCC, TXCf e TXCt, que se projetaram positivamente nesse eixo. Em contraste, variáveis como Ψ_w , TSiS e CC, que estariam associadas a fatores de crescimento, fisiológicos e hídricos da planta posicionaram-se no quadrante oposto, indicando comportamento inverso.

O Dim2 reúne os tratamentos que mostram as respostas fisiológicas e bioquímicas da planta de milho como CAF, LDM, TASiL e TSiL, que contribuíram fortemente para a separação vertical dos grupos.

Por outro lado, as plantas de milho cultivadas sob 80% da capacidade de retenção de água (CRA), nos tratamentos sem Si e com 12 kg ha⁻¹ de Si, apresentaram padrões multivariados semelhantes. Os tratamentos com 4 e 8 kg ha⁻¹ de Si formaram um agrupamento distinto, apresentando maior associação com as variáveis estruturais da planta, representadas pela massa seca (SDM) e lignina (LDM).

A sobreposição parcial das elipses indica efeitos combinados entre regime hídrico e dose de Si, enquanto a orientação dos vetores evidencia que as variáveis de C ocluso nos fitólitos como PhytOCF, PhytOCC e PhytOCT, TXCf e TXCt foram os principais fatores responsáveis pela separação multivariada entre os tratamentos.

6. Discussão

Os efeitos combinados do regime hídrico e da adubação silicatada evidenciam o papel do Si como elemento benéfico na promoção da resiliência do milho sob condições de déficit hídrico. Essa resposta pode ser explicada pelo aumento da absorção e da deposição de Si nos tecidos vegetais, favorecendo a formação de fitólitos e, conseqüentemente, o reforço estrutural das células epidérmicas reduzindo a perda de água por transpiração, melhorando a eficiência do uso da água e contribuindo para a manutenção do estado hídrico das plantas, refletido pelos maiores valores de potencial hídrico observados nas plantas suplementadas com Si.

Além disso, a manutenção da biomassa, mesmo sob restrição hídrica, indica que o Si contribuiu para minimizar os efeitos do estresse sobre o crescimento vegetal. Esses resultados corroboram estudos que demonstram que o Si atua na estabilização da parede celular, na redução do estresse oxidativo, na manutenção da atividade fotossintética e no aumento da eficiência do uso da água, mecanismos que, em conjunto, aumentam a tolerância das plantas ao déficit hídrico (Epstein, 1999; Ma e Yamaji, 2015; Meunier et al., 2017). No presente estudo, esses mecanismos também favoreceram a maior formação de fitólitos e de carbono ocluso (PhytOC), indicando que os benefícios do Si ultrapassam a manutenção do desempenho fisiológico das plantas, contribuindo também para o aumento do potencial de sequestro de C no sistema solo-planta.

Observou-se maior disponibilidade de Si na solução do solo no regime hídrico e 40% quando comparado ao regime de 80% CRA (Figura 3a), contudo, essa maior disponibilidade não se reflete em maior concentração e acúmulo foliar do elemento (Figura 3d e e). Ao contrário, observou-se maior teor de Si nas folhas sob regime hídrico 80% de CRA, indicando que a absorção de Si pode ser atribuída à maior transpiração da planta, aumentando o fluxo de massa e a absorção do Si pela planta, processo que se intensifica em condições de maior disponibilidade hídrica (Novák e Vidovic, 2003; Gao et al., 2006), também corroborado pelo PCA onde pode-se observar que o potencial hídrico está relacionado com os TSiL e o TSiS (Figura 7a e b).

A aplicação de Si via fertirrigação mostrou-se eficiente em aumentar a concentração e o acúmulo do elemento nas folhas (Figura 3d e e). Entretanto, em doses mais elevadas, observou-se redução na eficiência de absorção de Si, possivelmente associada à menor disponibilidade da forma monomérica na solução do solo, em decorrência da polimerização do Si em concentrações próximas a 3 mmol L^{-1} , o que reduz sua disponibilidade para as plantas (Vchrová e Pokorný, 2021; Currie e Perry, 2016).

Esse comportamento também foi evidenciado na análise de agrupamento hierárquico (Figura 6), na qual as maiores doses de Si se associaram a menores valores relativos das variáveis relacionadas ao teor e acúmulo de Si (TSiL, TSiS e TASSiC), indicando redução da eficiência de absorção do elemento nessas condições.

Plantas sob déficit hídrico apresentaram menor queda no potencial hídrico (Figura 3d) quando submetidas à dose ótima de Si $6,7 \text{ kg ha}^{-1}$ no regime de 40% de CRA, evidenciando o papel do Si como mitigador do estresse hídrico. Esse efeito está associado a mecanismos fisiológicos como maior eficiência no uso da água, aumento da condutância hidráulica e manutenção do potencial hídrico foliar, conforme descrito por Gao et al. (2006), Hattori et al. (2005), Yin et al. (2014). Adicionalmente, Meunier et al., (2017) destacam o papel estrutural dos fitólitos na tolerância das plantas ao estresse hídrico, uma vez que a deposição de sílica na forma de fitólitos nas paredes celulares aumenta a rigidez dos tecidos, reduz a perda de água e contribui para a manutenção da integridade celular, favorecendo a redução da transpiração e maior eficiência no uso da água.

No presente estudo, o aumento das doses de Si reduziu os efeitos do déficit hídrico, refletindo-se na manutenção do potencial hídrico foliar (Figura. 3d), no aumento da produção de massa seca e no maior acúmulo de fitólitos nas folhas. Esses resultados estão de acordo com Xu (2022), que relatou incremento da biomassa em plantas sob estresse hídrico suplementadas com Si, e com Meunier et al. (2017), que observaram aumento na formação de fitólitos em plantas submetidas à aplicação de Si.

A biomassa vegetal representa o elo funcional entre a resposta fisiológica ao Si e os processos de biossilificação. No presente estudo, o maior acúmulo de massa seca sob 80% de CRA confirma que a disponibilidade hídrica favorece o crescimento estrutural da planta. Estudos prévios demonstram que o aumento da biomassa está frequentemente associado à maior produção absoluta de fitólitos em plantas acumuladoras de Si (Song et al., 2015; Sun et al., 2019), o que foi corroborado neste estudo. No entanto, os resultados aqui obtidos indicam que o aumento da biomassa não implica, necessariamente, maior eficiência de oclusão de carbono. Sob déficit hídrico, mesmo com menor crescimento vegetal, observou-se maior PhytOC, sugerindo que a biomassa e o teor de Si podem regular a produção estrutural de fitólitos, enquanto a eficiência de oclusão de carbono pode responder a mecanismos metabólicos distintos.

A formação dos fitólitos em relação aos regimes hídricos observados nesse estudo mostram que as plantas de milho sob 40 % CRA apresentou maior concentração de fitólitos (mg g^{-1} MS) tanto nas folhas quanto nos colmos e fitólitos totais em comparação com o regime de 80 % CRA (Figura 5 a e b). Esse resultado indica que em ambientes com menor disponibilidade de água, há redução do crescimento da planta, e consequentemente uma concentração relativa maior de sílica por unidade de massa seca (Madella et al., 2009; Jenkins e Jamjoum, 2011; Stromberg et al., 2010, Guntzer et al., 2012). No regime hídrico de 80 % CRA há maior disponibilidade de Si na solução do solo resultando na maior deposição total de sílica nos tecidos, mas em menor concentração por massa seca, devido ao maior crescimento vegetativo o que leva ao efeito de diluição. Esse padrão foi descrito em experimentos com milho e, outras gramíneas, onde plantas irrigadas produzem maior biomassa e maior acúmulo absoluto de fitólitos, enquanto plantas sob déficit hídrico exibem maior densidade relativa de fitólitos (Jenkins e Jamjoum, 2011; D'Agostini et al., 2025). Esses

resultados mostram que a produção de fitólitos e oclusão de carbono pelos fitólitos respondem a mecanismos fisiológicos distintos, um envolvendo elementos estruturais ligados ao crescimento vegetal e outro a de componentes funcionais relacionados às respostas ao stress hídrico.

Embora o número total de fitólitos nas folhas tenha sido maior sob o regime hídrico de 80 % da CRA, esse padrão não se repetiu para o carbono ocluído nos fitólitos (PhytOC). De fato, tanto nas folhas quanto no colmo e no total da planta (Figura 5a, b e c), os maiores valores de PhytOC foram observados em 40 % CRA, o que indica maior eficiência de oclusão de carbono sob condição de déficit hídrico como observado nitidamente no mapa de calor onde as variáveis relativas a oclusão de fitólitos estão aglomeradas e tem valores mais altos em relação a média, como PhytOCC, PhytICf, PhytOCC e TXCt (Figura 6) e com comportamento similar entre os tratamentos com 4 e 8 kg Si ha⁻¹.

Estudos indicam que o processo de oclusão de C durante a formação dos fitólitos está associado à deposição de compostos da parede celular, como a lignina, cujo encapsulamento é favorecido pelo Si sob condições de estresse hídrico (Meunier et al., 2017; Piperno, 2006). Essa hipótese é reforçada pelo aumento significativo do teor de fenóis nas folhas de milho sob 40% CRA — com incremento de 13,33 g GAE 100 g⁻¹ em plantas tratadas com Si (Tabela 2). Uma vez que os fenóis são precursores diretos da biossíntese de lignina e atuam no reforço estrutural dos tecidos em resposta ao déficit hídrico, esses resultados sugerem que o Si potencializa a síntese desses compostos orgânicos, contribuindo para uma maior retenção de carbono nos fitólitos.

A relação entre a adubação silicatada e o aumento da formação de fitólitos e do carbono ocluído nos fitólitos (PhytOC), observada no presente estudo (Figura 5c, 5d e 5e), também foi relatada em outras espécies acumuladoras de Si. Em folhas de bambu-mossô, Lv et al. (2020) verificaram aumento da formação de fitólitos em resposta à adubação silicatada. De forma semelhante, em arroz, Li et al. (2020) e Guo et al. (2015) observaram que a aplicação de Si, na forma de silicato de sódio e pó de basalto, promoveu aumento da produção de fitólitos e do carbono ocluído nos fitólitos (PhytOC).

Estudos com plantas acumuladoras de Si demonstram, em geral, associação positiva entre o aumento da biomassa, o acúmulo de Si e a formação de fitólitos, refletindo também em maior acúmulo de carbono ocluído (PhytOC)

(Song et al., 2015; Sun et al., 2019). Em arroz, Guo et al. (2015) observaram relação positiva entre a disponibilidade de Si na planta, a formação de fitólitos e o conteúdo de PhytOC na mesma cultura resultados semelhantes foram relatados por Li et al. (2020), nos quais o aumento do teor de Si foi acompanhado por maior formação de fitólitos e maior acúmulo de carbono ocluso.

No presente estudo, entretanto, observou-se comportamento distinto. As plantas submetidas ao déficit hídrico apresentaram maior concentração de fitólitos e maior conteúdo de PhytOC, mesmo apresentando menor produção de massa seca e menor teor de Si na planta. Resultado semelhante foi observado por Wang e Sheng (2022), que não encontraram correlação entre biomassa e produção de PhytOC em trigo-sarraceno, verificando diferenças expressivas no conteúdo de carbono ocluso entre espécies com produção de biomassa semelhante.

Em conjunto, esses resultados sugerem que a formação de fitólitos e a oclusão de carbono, embora relacionadas, não dependem exclusivamente da biomassa produzida ou do teor de Si na planta. Assim, a eficiência de oclusão de carbono pode estar associada à disponibilidade de carbono no momento da biossilificação e a outros mecanismos fisiológicos e metabólicos envolvidos na formação dos fitólitos.

Os resultados do presente estudo evidenciam que, sob déficit hídrico (40% da CRA), a aplicação de doses intermediárias de Si favoreceu as variáveis relacionadas à biossilificação, especialmente a formação de fitólitos e o acúmulo de carbono ocluso (PhytOC). Em contrapartida, sob 80% da capacidade de retenção de água, os tratamentos apresentaram maior associação com as variáveis relacionadas ao crescimento e à fisiologia da planta (Figura 6).

O milho é uma das culturas mais plantadas no mundo, sendo que a maior parte está implantada em áreas não irrigadas, entender que essa espécie mantém o potencial de acúmulo de C ocluso (PhytOC) mesmo nas áreas com déficit hídrico pode ter potencial para futura mitigação de CO₂ da atmosfera.

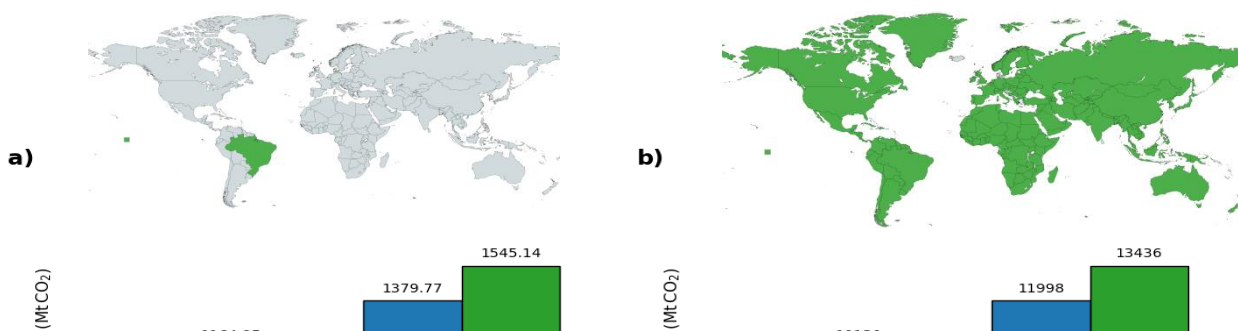


Figura 8. (a) Estimativa do total de CO₂ equivalente (t CO₂-eq ha⁻¹) sequestrado via fitólitos no cultivo de milho no Brasil em t CO₂ ha⁻¹ considerando a comparação sem adubação com Si (0 kg ha⁻¹) e sob a dose ótima de Si obtida nesse estudo 6,39 kg ha⁻¹ para 80% CRA e 6,87 kg ha⁻¹ para os regimes de 80% CRA (em azul) e 40% CRA (verde) na biomassa das plantas de milho com (b) Estimativa total do CO₂ sequestrado na área de milho mundial considerando os mesmos parâmetros da figura 6 (a).

Com base nesse estudo, usando maiores valores obtidos de sequestro de C pelos fitólitos para cada regime hídrico (Figura 5f) realizou-se uma extrapolação exploratória do potencial de sequestro de C em escala agrícola (Figura 8a e 8b).

Considerando que no Brasil a área de milho é de 22,7 milhões de ha CONAB (2023), e no mundo 200 milhões ha FAOSTAT Crop Database (2023) a extrapolação indica que a aplicação da dose ótima de Si pode elevar o estoque estimado de CO₂ de 1,03 para 1,38 Mt sob 80% CRA e de 1,16 para 1,54 Mt sob 40% CRA. Em escala global, esse potencial aumenta de 8,97 para 11,99 Mt (80% CRA) e de 10,13 para 13,44 Mt (40% CRA). No entanto, esse potencial precisa ser confirmado em estudos de campo para aferir a emissão de CO₂ inicial sem o emprego do silício e após alguns anos com manejo da adubação silicatada preferencialmente em estudos de longa duração.

Esses resultados evidenciam a hipótese de que a adubação silicatada aumenta o sequestro de C em ambos os regimes hídricos em 25% e representa uma estratégia promissora de mitigação climática em lavouras de milho irrigadas, mas, principalmente em sistemas de sequeiro com restrição hídrica onde o Si não apresenta potencial de para contribuir com a mitigação do stress hídrico como possibilita um aumento do sequestro de C.

7. Conclusões

1. A fertirrigação com Si modifica a biossilificação em plantas de milho, aumentando a absorção de Si e promovendo maior formação de fitólitos, principalmente em doses intermediárias de Si.

2. O regime hídrico influencia de forma distinta a biossilificação e a oclusão de C. Enquanto a maior disponibilidade hídrica favorece a produção de biomassa e a formação de fitólitos, o déficit hídrico aumenta a eficiência de oclusão de C nos fitólitos (PhytOC), especialmente quando associado à adubação silicatada.

3. A fertirrigação com Si atenua os efeitos do déficit hídrico sobre as plantas de milho, promovendo maior potencial hídrico foliar e manutenção da produção de biomassa, evidenciando seu potencial como ferramenta agrônômica para aumentar a resiliência da cultura em condições de restrição hídrica.

4. A associação entre a adubação silicatada, a formação de fitólitos e o acúmulo de PhytOC demonstra que o manejo do Si potencializa o sequestro de carbono na cultura do milho.

5. Nas condições deste estudo, o manejo do Si proporcionou incremento potencial de aproximadamente 25% no sequestro de carbono via PhytOC, evidenciando que a adubação silicatada constitui uma estratégia capaz de integrar benefícios agrônômicos e ambientais, aumentando simultaneamente a resiliência do milho ao déficit hídrico e sua contribuição para a mitigação das mudanças climáticas.

8. Referências

ALBUQUERQUE, P. E. P.; GUIMARÃES, D. P. Manejo da irrigação na cultura do milho. Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 2010. (Circular Técnica, 137)

ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; SMITH, M. Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements. Roma: FAO, 1998. 300 p. (FAO Irrigation and Drainage Paper, 56).

ANDRIOLI, I.; CENTURION, J. F. Influência do preparo do solo e da cultura anterior nas propriedades físicas de um Latossolo Vermelho eutroférico. Revista Brasileira de Ciência do Solo, v. 23, p. 107–114, 1999.

ANJUM, M.; PRAKASH, C. Role of phytolith occluded carbon in carbon sequestration of rice ecosystems. *Environmental Sustainability*, v. 4, p. 125–133, 2021.

BABIKER, A. G.; DUNCAN, R. R. Sorbitol and silicon interactions in nutrient solutions. *Plant and Soil*, v. 40, p. 145–154, 1974.

BERGONSI, J.I; BERGAMASCHI, H; BERLATO, M. A; SANTOS, A. M. Potencial hídrico foliar como um indicador do déficit hídrico em milho. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, Brasília, v. 35, n. 8, p. 1531-1540. 2000.

BHARDWAJ, S.; KAPOOR, D.; SHARMA, P.; ALAM, P.; AHMAD, P.; SHARMA, A. Silicon: A beneficial element for promoting environmental stress tolerance in plants. *Plant Physiology and Biochemistry*, v. 166, p. 1-10, 2021.

BOYER, J. S. Leaf enlargement and metabolic rates in corn, soybean, and sunflower at various leaf water potentials. *Plant Physiology*, v. 46, n. 2, p. 233-235, 1970.

CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J. A.; MATTOS JUNIOR, D.; BOARETTO, R. M.; RAIJ, B. van (Ed.). *Boletim 100: Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo*. Instituto Agrônomo, 2022.

CHENG, X.; LV, H.; LIU, S.; LI, C.; LI, P.; ZHOU, Y.; SHI, Y.; ZHOU, G. The phytolith carbon sequestration in terrestrial ecosystems: the underestimated potential of bamboo forest. *Ecological Processes*, v. 12, art. 62, 2023.

CONAB. COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. *Acompanhamento da safra brasileira de grãos 2023/24*. Brasília, 2023.

CORNELIS, J. T.; DELVAUX, B.; GEORG, R. B.; CARDOT, V.; HENRIET, C.; OPFERGELT, S. The biogeochemical cycle of silicon in terrestrial ecosystems. *Biogeochemistry*, v. 103, n. 1, p. 179-194, 2011.

COSTA, M. G; OLIVEIRA, K. S; PRADO, R. de M; HURTADO, A. C.; PALARETTI, L. F.; SOUZA JÚNIOR, J. P. Mechanisms of silicon as a key modulator of maize defense under water deficit: Meta-analytical insights. *Plant Stress*, v. 21, p. 101350, 2026.

CURRIE, H. A.; PERRY, C. C. Silica in plants: biological, biochemical and chemical studies. *Annals of Botany*, v. 117, p. 673–695, 2016.

D'AGOSTINI, M.; PEREIRA, R. G.; ALENCAR, A. C.; MACARIO, K.; COSTA-CASAS, M.; SANTOS, G. M. Phytolith production and carbon occlusion in maize under varying water availability and silicon fertilization. *Review of Palaeobotany and Palynology*, v. 332, p. 105-115, 2025.

EPSTEIN, E. Silicon in plants: Facts vs concepts. In: DATNOFF, L. E.; SNYDER, G. H.; KORNDÖRFER, G. H. (ed.). *Silicon in Agriculture*: Elsevier Science, v. 8, cap. 1, p. 1-15, 2001.

EPSTEIN, E. Silicon: its manifold roles in plants. *Annals of Applied Biology*, v. 155, p. 155–160, 1999.

FAO. FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS. The State of the World's Land and Water Resources for Food and Agriculture 2021: Systems at breaking point. Synthesis report. Rome: FAO, 2021. Disponível em: <https://www.fao.org/3/cb7654en/cb7654en.pdf>. Acesso em: 8 abr. 2026.

FAO. FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS. World food and agriculture statistical yearbook 2022. Rome, 2022.

FAO. FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS (FAOSTAT). Crops and livestock products database. Rome, 2023. Disponível em: <https://www.fao.org/faostat>. Acesso em: 10 jan. 2026.

GAO, X.; ZOU, C.; WANG, L.; ZHANG, F. Silicon improves water use efficiency in maize plants. *Journal of Plant Nutrition*, [s. l.], v. 27, n. 8, p. 1457-1470, 2006.

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

GUO, J.; SONG, Z.; SULLIVAN, L. A.; WANG, H.; LI, Z.; YU, C.; PENG, X.; LIU, Z. Basalt powder increases phytolith and PhytOC formation in rice paddies. *Geoderma*, v. 247, p. 65–72, 2015.

HATTORI, T.; INANAGA, S.; ARAKI, H.; AN, P.; MORITA, S.; LUXOVA, M.; LUX, A. Silicon alleviates water-deficiency stress in sorghum through improved hydraulic conductance. *Plant Production Science*, v. 8, p. 246–253, 2005.

HODSON, M. J. The comparative role of silicon in higher plants. *Journal of Plant Nutrition*, v. 28, p. 1347–1355, 2005.

HODSON, M. J. The phylogenetic distribution of plant silicon transporters. *Frontiers in Plant Science*, v. 7, p. 670, 2016.

HSIAO, T. C. Plant responses to water stress. *Annual Review of Plant Physiology*, v. 24, p. 519-570, 1973.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). Climate change 2023: synthesis report. Geneva, 2023.

JENKINS, E.; JAMJOUM, M. Phytolith evidence for irrigation practices in ancient Near Eastern agriculture. *Journal of Archaeological Science*, v. 38, p. 103–113, 2011.

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

KLUTE, A. Water retention: laboratory methods. In: BLACK, C. A. (ed.). *Methods of soil analysis*. Madison: American Society of Agronomy, p. 635–662, 1986.

KORNDÖRFER, G. H.; PEREIRA, H. S.; NOLLA, A. *Análise de Si: solo, planta e fertilizante*. Universidade Federal de Uberlândia, 2004.

KRASKA, J. E.; BREITENBECK, G. A. Simple, robust method for quantifying silicon in plant tissue. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, v. 41, p. 2075–2085, 2010.

LI, W.; LI, T.; MIAO, P.; HAO, C.; CHE, T.; ENQUANG, Z.; LEI, Z.; HONGYUN, P.; YONGCHAO, L. The spatial distribution of phytoliths and phytolith-occluded carbon in wheat (*Triticum aestivum* L.) ecosystem in China, *Science of The Total Environment*, Volume 850, 2022.

LI, Z.; GUO, F.; CORNELIS, J-T.; SONG, Z.; WANG, X.; DELVAUX, B. Combined Silicon-Phosphorus Fertilization Affects the Biomass and Phytolith Stock of Rice Plants. *Front. Plant Sci.* 11:67, 2020.

LI, Z.; SONG, Z.; JIANG, P. Biogeochemical sequestration of carbon within phytoliths of wetland plants: A case study of Xixi wetland, China. *Chin. Sci. Bull.* 58, 2480–2487, 2013.

LIU, L.; CHANG, S.X.; HUANG, C.; ZHI, Y.; JIE, Y.; YU, X.; JIANG, P. Enhancement of phytolith-occluded carbon accumulation of Moso bamboo response to temperatures elevation and different fertilization. *Front. Plant Sci.* 14:1144961, 2023.

LUYCKX, M.; HAUSMAN, J. F.; LUTTS, S.; GUERRIERO, G. Silicon and plants: current knowledge and technological perspectives. *Frontiers in Plant Science*, [s. l.], v. 8, p. 1-19, 2017.

LV, Y.; ZHOU, G.; CHEN, L.; ZHOU, Y.; GE, H.; NIU, X.; XU, L.; SHI, Y. Effects of Different Management Practices on the Increase in Phytolith-Occluded Carbon in Moso Bamboo Forests. *Frontiers in Plant Science*, v. 11, art. 591852, p. 1-13, 2020.

MA, J. F.; YAMAJI, N. A cooperative system of silicon transport in plants. *Trends in Plant Science*, v. 20, n. 7, p. 435-442, 2015.

MADELLA, M.; ALEXANDRE, A.; BALL, T. International code for phytolith nomenclature (ICPN 1.0). *Annals of Botany*, v. 104, p. 475–487, 2009.

MEUNIER, J. D.; BARBONI, D.; ANWAR-UL-HAQ, M.; LEVARD, C.; CHAURAND, P.; VIDAL, V.; GRAUBY, O.; HUC, R.; LAFFONT-SCHWOB, I.; RABIER, J.; KELLER, C. Effect of phytoliths for mitigating water stress in durum wheat. *New Phytologist*, v. 215, n. 1, p. 229–239, 2017.

MITANI-UENO, N., MA, J. F. (2021). Linking transport system of silicon with its accumulation in different plant species. *Soil Science and Plant Nutrition*, v. 67, n. 1, p. 10–17, 2021.

MOTOMURA, H.; FUJII, T.; SUZUKI, M. Silica deposition in leaf blades of Poaceae, with emphasis on bamboo. *Annals of Botany*, [s. l.], v. 94, n. 1, p. 7-14, 2004.

NOVÁK, M.; VIDOVIC, J. Silicon uptake in maize under water stress. *Plant and Soil*, v. 257, p. 217–226, 2003.

PARR, J. F.; SULLIVAN, L. A. Phytolith-occluded carbon as a mechanism for long-term carbon sequestration in Spanish soils. *Global Change Biology*, v. 17, n. 2, p. 861-864, 2011.

PARR, J. F.; SULLIVAN, L. A. Soil carbon sequestration through phytolith carbon occlusion. *Global Change Biology*, v. 11, p. 1317–1323, 2005.

PIPERNO, D. R. *Phytoliths: a comprehensive guide for archaeologists and paleoecologists*. Oxford: AltaMira Press, 2006.

PRADO, R.M. (ed.). *Benefits of silicon in the nutrition of plants*. Cham: Springer, 2023.

PUPPE, D.; LEUE, M. Physicochemical surface properties of biogenic silicon structures (phytoliths) and their relevance for research on the silicon cycle. *Biogeochemistry*, v. 137, n. 3, p. 345-353, 2018.

RAIJ, B. van; ANDRADE, J.C.; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J.A. *Análise Química para Avaliação da Fertilidade de Solos Tropicais*. Campinas, Instituto Agrônômico, 285p, 2001.

REHMAN, A. I. U.; MALIK, M. A.; RASHID, I.; SHEERGOJRI, I. A.; DAR, R. A. Silicon fertilization increases carbon sequestration by augmenting PhytOC production in wheat. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, v. 23, n. 1, p. 1149–1155, 2023.

ROSEN, A. M.; WEINER, S. Identifying ancient irrigation through phytolith analysis. *Journal of Archaeological Science*, v. 21, p. 125–135, 1994.

SCHOLANDER, P. F.; HAMMEL, H. T.; BRADSTREET, E. D.; HEMMINGSEN, E. A. Sap pressure in vascular plants. *Science*, 148(3668): 339–346, 1965.

SINGLETON, V. L.; ROSSI, J. A. Colorimetry of total phenolics with phosphomolybdic-phosphotungstic acid reagents. *American Journal of Enology and Viticulture*, Davis, v. 16, n. 3, p. 144–158, 1965.

SONG, Z.; LIU, H.; LI, B.; YANG, X.; ZHANG, X.; PARR, J. F.; WANG, H.; LIANG, C.; TANG, L.; LI, Z. Silicon fertilization promotes PhytOC accumulation in rice paddies. *Biogeosciences*, v. 12, n. 6, p. 1687–1697, 2015.

SONG, Z.; LIU, H.; ZHENG, X. The role of phytolith carbon in global carbon sequestration. *Earth-Science Reviews*, v. 123, p. 59–68, 2013.

SONG, Z.; WANG, H.; STRÖMBERG, C. A. E. Carbon occlusion in phytoliths: implications for long-term carbon storage. *Global Change Biology*, v. 20, p. 3473–3484, 2014.

SONG, Z.; MCGROUTHER, K.; WANG, H. Silicon cycling and carbon sequestration in terrestrial ecosystems. *Scientific Reports*, v. 6, p. 21476, 2016.

SONG, Z.; PARR, J. F.; GUO, F. Potential of global cropland phytolith carbon sink from optimization of cropping system and fertilization. *Scientific Reports*, v. 3, n. 1, p. 2956, 2013.

STEDUTO, P.; HSIAO, T. C.; FERERES, E.; RAES, D. Yield response to water. Rome: FAO, 2012. (Irrigation and Drainage Paper, 66).

STRÖMBERG, C. A. E.; JENKINS, E.; KELLER, C. Environmental control of phytolith formation. *Review of Palaeobotany and Palynology*, v. 162, p. 129–145, 2010.

SUN, X.; LIU, Q.; GU, J.; CHEN, J.; GUO, X. Silicon fertilizer application promotes phytolith-occluded carbon storage in rice soils. *Science of The Total Environment*, v. 650, p. 2693–2699, 2019.

SUN, X.; SONG, Z.; LI, B. Long-term effects of silicon fertilization on PhytOC in rice. *Plant and Soil*, v. 446, p. 273–285, 2019.

TAKÁCS, Z.; SZÉKELY, A.; KOVÁCS, K.; SZALAI, G.; JANDA, T. Approaches to studying wheat and maize drought stress responses. *Journal of Agronomy and Crop Science*, v. 211, n. 1, p. 11–26, 2025.

VICHROVÁ, M.; POKORNÝ, J. Polymerization of monosilicic acid in irrigation solutions. *Journal of Soils and Sediments*, v. 21, p. 305–315, 2021.

WALKLEY, A.; BLACK, I. A. An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter. *Soil Science*, v. 37, p. 29–38, 1934.

WANG, Y.; SHENG, L. Silicon fertilization and carbon sequestration in wheat ecosystems. *Plant and Soil*, v. 466, p. 211–225, 2022.

WANG, Y.; SONG, Z.; LI, Z.; PARR, J. F. Effects of water management on phytolith and phytolith-occluded carbon production in rice. *Scientific Online Letters on the Atmosphere (SOLA)*, v. 11, p. 113–117, 2015.

WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION (WMO). State of the global climate 2023. Geneva, 2023.

XU, Z.; MA, J.; XIE, J.; CAO, S.; TANG, N.; ZHANG, X.; LIANG, Y. Silicon alleviates drought stress in plants: Algorithms for determining the role of silicon

in the soil-plant-atmosphere continuum. *Frontiers in Plant Science*, [s. l.], v. 13, p. 1-15, 2022.

YIN, L.; WANG, S.; LI, J.; TANG, K.; SHEN, M. Silicon-mediated changes in polyamine and 1-aminocyclopropane-1-carboxylic acid are involved in silicon-induced drought tolerance in *Sorghum bicolor*. *Journal of Plant Physiology*, v. 171, n. 1, p. 56-65, 2014.

9. Considerações Finais

As conclusões desse trabalho mostram que a associação entre a adubação silicatada, a formação de fitólitos e o acúmulo de PhytOC demonstra que o manejo do Si potencializa o sequestro de carbono na cultura do milho, evidenciando o papel dos fitólitos na oclusão de carbono.

Embora os avanços científicos tenham ampliado o conhecimento sobre a formação de fitólitos e do PhytOC, e sua contribuição para o armazenamento de carbono em sistemas agrícolas, ainda são necessários estudos que integrem esses processos à dinâmica do carbono no solo em condições de campo e de longo prazo.

Nesse contexto, pesquisas futuras deverão concentrar esforços em estudar de forma integrada a formação de fitólitos, o acúmulo de PhytOC, a ciclagem do Si no solo e, as emissões de CO₂, permitindo compreender de forma mais abrangente a contribuição do Si para a viabilização do sequestro de C em sistemas agrícolas e sua contribuição para mitigação de CO₂.

Espera-se que os resultados desse trabalho contribuam para estimular novas pesquisas e fortaleçam as bases científicas para o uso do silício como estratégia de manejo voltada à agricultura sustentável e à mitigação das mudanças climáticas.