

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO DO SUL
CAMPUS DE CHAPADÃO DO SUL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA

SÉRGIO CARDOSO ZOCCAL

**EFEITOS FISIOLÓGICOS DA APLICAÇÃO DE NÍQUEL E
SILÍCIO NA CULTURA DA SOJA**

CHAPADÃO DO SUL – MS

2024

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO DO SUL
CAMPUS DE CHAPADÃO DO SUL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA

SÉRGIO CARODOSO ZOCCAL

**EFEITOS FISIOLÓGICOS DA APLICAÇÃO DE NÍQUEL E
SILÍCIO NA CULTURA DA SOJA**

Orientador(a): Prof. Dr. Cid Naudi Silva Campos

Dissertação apresentada à
Universidade Federal de Mato
Grosso do Sul, como parte dos
requisitos para obtenção do
título de Mestre em Agronomia,
área de concentração: Produção
Vegetal.

CHAPADÃO DO SUL – MS

2024



Serviço Público Federal
Ministério da Educação

Fundação Universidade Federal de Mato Grosso do Sul



PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

DISCENTE: Sérgio Cardoso Zoccal

ORIENTADOR: Dr. Cid Naudi Silva Campos

TÍTULO: Efeitos fisiológicos da aplicação de Níquel e Silício na cultura da soja.

AVALIADORES:

Prof. Dr. Cid Naudi Silva Campos

Prof. Dr. Rafael Felipe Ratke

Prof. Dr. Rafael Ferreira Barreto

Chapadão do Sul, 08 de fevereiro de 2024.

NOTA MÁXIMA NO MEC **UFMS É 10!!!**  Documento assinado eletronicamente por **Cid Naudi Silva Campos, Professor do Magisterio Superior**, em 08/02/2024, às 09:17, conforme horário oficial de Mato Grosso do Sul, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).

NOTA MÁXIMA NO MEC **UFMS É 10!!!**  Documento assinado eletronicamente por **Rafael Ferreira Barreto, Professor do Magisterio Superior**, em 08/02/2024, às 09:30, conforme horário oficial de Mato Grosso do Sul, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).

NOTA MÁXIMA NO MEC **UFMS É 10!!!**  Documento assinado eletronicamente por **Rafael Felipe Ratke, Professor do Magisterio Superior**, em 08/02/2024, às 09:43, conforme horário oficial de Mato Grosso do Sul, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.ufms.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **4646659** e o código CRC **AFDAE9B4**.

DEDICATÓRIA

Dedico a Deus, a meus Pais, Waldomiro Sérgio Zoccal e Tânia Maria Cardoso Zoccal, minha avó Ireniu dos Santos Cardoso, minha irmã e meu cunhado Ludimila Cardoso Zoccal Janini e Helitom Janini, minha esposa Franccis Laura Pereira Batista e ao nosso filho Carlos Eduardo Batista Zoccal.

Dedico!

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, pela minha saúde e as bênçãos e desafios que ele me submete, e sem ele nada seria possível.

A meus pais Waldomiro e Tânia por ter me dado a existência, por me darem muito afeto e carinho, sempre me apoiarem nos momentos difíceis, e me instruírem não só com palavras, mas com exemplos, para que eu buscar sempre ser uma melhor pessoa.

A minha esposa, Franciscis pela dedicação para comigo, pelo amor, afeto, carinho e reciprocidade, por me incentivar e apoiar nos momentos difíceis, e sermos sempre um pelo o outro, um com o outro e um para o outro.

A meu filho Carlos Eduardo por todo amor e carinho, pelas brincadeiras, por me proporcionar momentos únicos na vida, me encher cada vez más de vontade de viver e ser uma pessoa melhor, e fazer com que ele se torne um bom homem.

A minha irmã e cunhado, Ludimila e Helitom, pelas conversas e troca de experiências, pelos bons momentos, pela ajuda e apoio nos momentos difíceis, e por toda dedicação e carinho que eles têm comigo.

A minha querida avó Ireniu pelo seu amor e carinho comigo, pela ajuda e incentivo nos estudos, pelos ensinamentos e experiências compartilhadas, pelas broncas e disciplina que me auxiliam na vida, e pelas suas orações diárias.

A meus sogros, José e Aparecida, pela oportunidade, pelo amor, carinho e respeito com que tem comigo.

A meus cunhados Cristiam e Giselle, pelas boas experiências compartilhadas, pelo companheirismo, respeito e carinho, e por me proporcionar duas sobrinhas lindas.

Ao meu orientador nessa dissertação Cid, pela sua compreensão, por ter me aceito, pelas suas cobranças que me fizeram vivenciar esse novo desafio em minha vida, por me tornar mais dedicado e interessado para com os estudos.

A meus companheiros de serviço na Fazenda pelo apoio, pela compreensão e aos bons momentos de convívio.

Ao programa de Pós-graduação em agronomia da Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, Câmpus Chapadão do Sul.

Ao Grupo de Estudos do Cerrado em Nutrição de plantas (GECENP).

Por fim, meus agradecimentos a todos que contribuíram para a concretização desta dissertação, me apoiando emocionalmente ou de forma intelectual.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Valores de precipitação pluvial (mm) e temperaturas (°C) mensais durante o período de condução do experimento na safra de 2022/2023 para cultura da soja. Chapadão do Sul, MS.....	14
Figura 2. Teor de Clorofila (Chl <i>a</i> + <i>b</i>) (a), Carotenoides (C _x + <i>c</i>) (b) e Flavonoides (FLV) (c) de plantas de soja cultivadas sob doses de Ni.....	19
Figura 3. Fotossíntese (<i>A</i>) (a), Concentração interna de CO ₂ (<i>C_i</i>) (μmol CO ₂ mol ⁻¹) (b), Transpiração (<i>E</i>) (mmol H ₂ O m ⁻² s ⁻¹) (c), e Condutância estomática (<i>g_s</i>) (mol H ₂ O m ⁻² s ⁻¹) (d) de plantas de soja cultivadas sob doses de Ni.....	20
Figura 4. Eficiência instantânea na carboxilação (<i>ICE</i>) (<i>A/C_i</i>) [(μmol m ⁻² s ⁻¹) (μmol mol ⁻¹) ⁻¹] (a), e Eficiência instantânea no uso da água (<i>WUE</i>) (<i>A/E</i>) [(μmol m ⁻² s ⁻¹) (mmol H ₂ O m ⁻² s ⁻¹) ⁻¹] (b) de plantas de soja cultivadas sob doses de Ni.....	21
Figura 5. Produtividade de grãos de soja cultivadas sob aplicação de Ni e de Si isolados e combinados na mesma aplicação.....	21

EFEITOS FISIOLÓGICOS DA APLICAÇÃO DE NÍQUEL E SILÍCIO NA CULTURA DA SOJA

RESUMO: O Níquel (Ni) tem influência sobre uma diversidade de processos fisiológicos nas plantas, o que pode promover aumento no crescimento e na produção. O Silício (Si) melhora a taxa fotossintética, eficiência na utilização da água, além de auxiliar na regulação osmótica e no sistema antioxidante das plantas. Este estudo teve como objetivo avaliar os efeitos fisiológicos da aplicação foliar de Ni e de Si, isolados e associados em plantas de soja. O experimento foi conduzido a campo na Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, Câmpus Chapadão do Sul na safra de 2022-2023. O delineamento experimental foi de blocos ao acaso, sendo quatro tratamentos T1 – aplicação de Ni, T2 – aplicação de Si, T3 – aplicação de Ni + Si, T4 – sem aplicação, dispostos com 6 repetições. As variáveis fisiológicas avaliadas foram: clorofila total, carotenoides, flavonoides, fotossíntese, concentração interna de CO₂ (*C_i*), transpiração (*E*), condutância estomática, eficiência no uso da água (*WUE*), e a eficiência instantânea na carboxilação. Além da análise da produtividade de grãos. De acordo com os tratamentos, quando se aplicou a combinação de Ni + Si, as variáveis pigmentos fotossintetizantes e trocas gasosas (clorofila, carotenoides, flavonoides, fotossíntese, condutância estomática, eficiência na carboxilação) obtiveram maiores teores e melhores eficiência para as plantas de soja, mas não se diferiu dos tratamentos Si e Ni isolados. Para a variável *C_i* não houve diferença entre os tratamentos; em relação a *E* os melhores tratamentos foram Si e Ni isolados e; para a *WUE* o melhor tratamento foi Si. A produtividade da soja não aumentou em resposta à aplicação dos tratamentos. Dessa forma a aplicação via foliar de Ni e Si, combinados ou isolados, promove melhoria nos teores de pigmentos e nas trocas gasosas em plantas de soja; no entanto, para produtividade não houve efeito da aplicação desses elementos.

Palavras-chave: Aplicação foliar; Fisiologia vegetal; Pigmentos fotossintéticos; Trocas gasosas; *Glycine max* L.

PHYSIOLOGICAL EFFECTS OF THE APPLICATION OF NICKEL AND SILICON IN SOYBEANS

ABSTRACT: Nickel (Ni) influences a variety of physiological processes in plants, which can promote an increase in growth and production. Silicon (Si) improves the photosynthetic rate, efficiency in water use, in addition to helping in the osmotic regulation and antioxidant system of plants. This study aimed to evaluate the physiological effects of foliar application of Ni and Si, isolated and associated, on soybean plants. The experiment was conducted in the field at the Federal University of Mato Grosso do Sul, Campus Chapadão do Sul in the 2022-2023 harvest. The experimental design was randomized blocks, with four treatments: T1 – application of Ni, T2 – application of Si, T3 – application of Ni + Si, T4 – no application, arranged with 6 replications. The physiological variables evaluated were: total chlorophyll, carotenoids, flavonoids, photosynthesis, internal CO₂ concentration (*C_i*), transpiration (*E*), stomatal conductance, water use efficiency (*WUE*), and instantaneous carboxylation efficiency. In addition to the analysis of grain productivity. According to the treatments, when the combination of Ni + Si was applied, the variables photosynthetic pigments and gas exchange (chlorophyll, carotenoids, flavonoids, photosynthesis, stomatal conductance, carboxylation efficiency) obtained higher levels and better efficiency for soybean plants, but did not differ from the Si and Ni treatments alone. For the variable *C_i* there was no difference between treatments; in relation to *E*, the best treatments were Si and Ni alone and; for *WUE* the best treatment was Si. Soybean productivity did not increase in response to the application of treatments. Thus, the foliar application of Ni and Si, combined or isolated, promotes improvements in pigment levels and gas exchange in soybean plants; however, for productivity there was no effect from the application of these elements.

Keywords: Foliar application; Plant physiology; Photosynthetic pigments; Gas exchange; *Glycine max L.*

SUMÁRIO

RESUMO.....	10
ABSTRACT.....	11
INTRODUÇÃO.....	12
MATERIAL E MÉTODOS.....	13
Localização e caracterização da área experimental.....	13
Delineamento experimental.....	15
Instalação do experimento e aplicação dos tratamentos.....	15
Manejo fitossanitário.....	16
Avaliações fisiológicas.....	16
Análise de pigmentos fotossintetizantes e flavonoids.....	16
Trocas gasosas.....	17
Colheita e avaliação da produtividade.....	18
Análise estatística.....	18
RESULTADOS.....	18
Pigmentos fotossintetizantes.....	18
Trocas gasosas.....	19
DISCUSSÃO.....	21
CONCLUSÕES.....	25
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	25

1. INTRODUÇÃO

O níquel (Ni), é um metal pesado, encontrado de forma abundante em nossa crosta terrestre (Sunderman & Oskarson 1991), este foi o último elemento a ser considerado essencial para planta (ESKEW et al., 1983), e o que apresenta menor exigência dentre os elementos essenciais (DIXON et al., 1975). A principal forma de fornecimento do mesmo é pela aplicação foliar, pois além de prática, tem apresentado boa eficiência (KUMAR et al., 2018). Ele apresenta redistribuição floemática e sua principal função na planta é atribuída por fazer parte da estrutura molecular da metaloenzima urease, responsável por transformar ureia em dióxido de carbono e amônia (DIXON et al., 1975).

A deficiência de Ni na cultura da soja pode ser observada com o acúmulo de ureia na ponta das folhas, o qual fará com que ocorra necrose e morte do tecido nesses locais (ESKEW et al., 1983; KERBAUY 2004). O Ni tem papel muito importante na fixação biológica do nitrogênio (FBN), atuando na hidrogenase, um teor baixo de Ni no solo pode ser fator limitante para a fixação simbiótica do N (URETA et al., 2005).

Vários estudos como o de Gomes et al.,(2023) tem demonstrado que a melhor maneira de suprir a demanda do Ni seria via foliar com dose parcelada, ela observou um incremento nas taxas de fotossíntese, melhor aproveitamento da água, ao realizar a aplicação de 80g ha¹ de Ni parcelado em duas aplicações foliares na cultura do milho; (Kumar et al., 2018) também obteve melhor resultado para os aspectos fisiológicos da cultura da cevada ao fornecer o sulfato de níquel, na dose de 0,2% do volume de calda, em três aplicações.

Os efeitos causados pelo excesso de Ni são mais comuns pelo fato dele competir pelos mesmos sítios de absorção de outros micronutrientes, dentre os sintomas de toxicidade ocorre o fechamento estomático, fazendo com que a planta capte menos CO₂ e assim realize menos o processo fotossintético (Sheoran et al., 1990, Bishnoi et al., 1993). Na cultura do milho ao realizar a aplicação foliar na dose de 160 g ha⁻¹ de Ni ocorreu um declínio nos pigmentos fotossintetizantes, o qual corroborou para que diversos processos fossem afetados (GOMES et al, 2023).

O Silício (Si) é considerado um elemento benéfico, pois não atende aos critérios de essencialidade, porém proporciona benefícios a diversas culturas. Após o processo de absorção o Si se deposita na parede celular junto aos estômatos formando uma dupla camada de sílica (Epstein, 1999; Ma & Yamji, 2006), processo que ajuda a promover uma resistência maior aos danos mecânicos causados por pragas, auxilia a planta transpirar

menos, perder menos água, e ficar menos sensível ao déficit hídrico, fato que pode tornar o processo fotossintético mais eficiente (BARBOSA FILHO et al., 2001).

O Si se acumula mais na parte aérea das gramíneas; onde consegue expressar maiores resultados (Oliveira et al.,2015). Na cultura do sorgo, em cultivo hidropônico, observou-se incremento na taxa fotossintética, tendo como melhor resultado o fornecimento de silicato de potássio na concentração 1,0 g L⁻¹ de Si, porém no estudo conduzido por Pereira Junior et al (2010) não houve diferença no fornecimento de diferentes doses de Si no sulco de plantio durante a semeadura da soja.

Diante disso, surgem a hipótese de que Ni em combinação com o Si aplicado via foliar promove melhoria nos teores de pigmentos, nas trocas gasosas e na produtividade em plantas de soja. Este estudo teve como objetivo avaliar os efeitos da aplicação foliar de Ni e Si, isolados e associados, na fisiologia e na produtividade da soja.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1 LOCALIZAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA EXPERIMENTAL

O experimento foi conduzido na área experimental da Universidade Federal de Mato Grosso do Sul (UFMS), Câmpus Chapadão do Sul, com coordenadas geográficas de 18°46'16" S de latitude, 52°37'22" O de longitude e com altitude média de 820 metros, na safra de 2022-2023 com a cultura da soja.

De acordo com a classificação de Köppen, o clima predominante na região é do tipo tropical úmido (AW), com estação chuvosa no verão e seca no inverno. As informações climáticas, referentes às médias de temperaturas máximas, mínimas e precipitação pluviométrica durante todo período experimental estão demonstradas na Figura 1. Durante o experimento, a temperatura média foi de 23,6 °C. A precipitação mínima foi de 0,2 mm e a máxima de 122,8 mm com total de 1.403,8 mm distribuídos em 105 dias de chuvas (Figura 1), quantidade acima da necessária para o adequado desenvolvimento das plantas de soja, pois a exigência hídrica dessa cultura varia entre 450 a 800 mm (EMBRAPA, 2005).

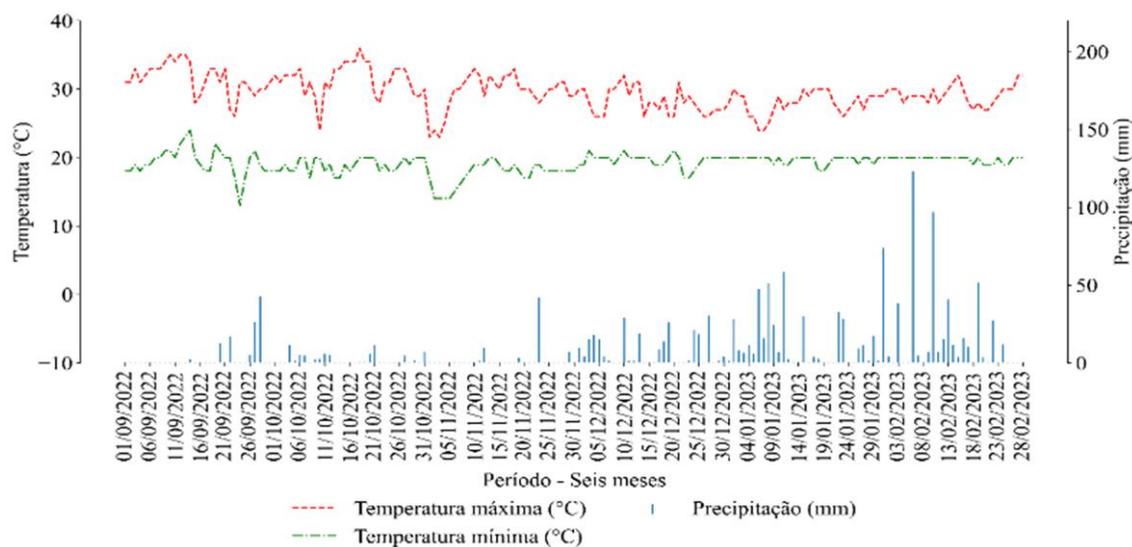


Figura 1. Valores de precipitação pluvial (mm) e temperaturas (°C) mensais durante o período de condução do experimento na safra de 2022/2023 para cultura da soja. Chapadão do Sul, MS. Fonte: AMPASUL.

Antes da instalação do experimento, foi realizada a amostragem do solo na camada de 0 a 0,2 m de profundidade. Para tanto utilizou-se trado holandês, coletou-se 12 amostras simples em pontos aleatórios da área experimental. Em seguida, procedeu-se à análise química para fins de fertilidade e granulométricas (areia, silte e argila), conforme metodologia descrita por Raij et al. (2001) e Donagema et al. (2011), respectivamente. Para a análise de granulometria, os resultados foram: 465, 50 e 485 g kg⁻¹ de argila, silte e areia, respectivamente, logo um solo com textura argilosa. Que já havia sido classificado como Latossolo Vermelho-Amarelo Distrófico de acordo com os critérios de SANTOS et al., (2018).

Os dados obtidos na análise química apresentaram os seguintes resultados: pH CaCl₂= 4,7; Al= 0,14 cmolc dm⁻³. Macronutrientes: Ca= 2,20 cmolc dm⁻³; Mg= 0,50 cmolc dm⁻³; K= 0,24 cmolc dm⁻³; P (mel)= 16,3 mg dm⁻³; S= 5,8 mg dm⁻³. Micronutrientes: B= 0,21 mg dm⁻³; Cu= 1,4 mg dm⁻³, Fe= 53 mg dm⁻³, Mn= 11,3 mg dm⁻³, Zn= 3,8 mg dm⁻³; Matéria Orgânica (M.O) = 24,2 g dm⁻³; C.O.= 14,0 g dm⁻³; capacidade de troca catiônica (CTC) = 11,7 cmolc dm⁻³; Saturação por bases= 39,0%. Relação entre bases: Ca/Mg= 4,4; Ca/K= 9,2; Mg/K= 2,1.

2.2 DELINEAMENTO EXPERIMENTAL

O delineamento experimental foi de blocos ao acaso, sendo quatro tratamentos T1 – aplicação de Ni, T2 – aplicação de Si, T3 – aplicação de Ni + Si, T4 – sem aplicação, dispostos com 6 repetições. As parcelas foram compostas por 6 linhas de 6 m de comprimento, espaçadas de 0,50 m entre si, sendo a área útil constituída pelas quatro linhas centrais com 6 m de comprimento, descartando 1,0 m de cada lado nas bordaduras.

2.3 INSTALAÇÃO DO EXPERIMENTO E APLICAÇÃO DOS TRATAMENTOS

A cultivar utilizada foi a DM69IX69 RSF I2X, recomendado para a região centro oeste, por possuir precocidade com alto potencial produtivo, Cultivar STS (soja tolerante a sulfonilureias). A semeadura foi realizada em 17 de outubro de 2022, e as sementes utilizadas foram adquiridas com o TSI (tratamento de semente industrial), com inseticida, com a combinação de dois ativos (Ciantraniliprole e Tiametoxam), com uma tecnologia que proporciona maior espectro de controle de pragas e efeito residual prolongado.

Foi aplicado carbonato de cálcio e de magnésio 60 dias antes do plantio visando elevar o V% para 60, sendo o material corretivo (33% CaCO_3 , 12% MgO e PRNT de 82%). Além disso, visando o fornecimento de enxofre, foi aplicado 300kg de sulfato de cálcio antes do plantio. No pré-plantio foi realizada a adubação com boro (B), para tanto, utilizou-se de 2 kg ha^{-1} de Boro (ulexita 10% de B), sendo aplicada em área total. Na ocasião do plantio, foram aplicados 160 kg ha^{-1} de MAP formulado 11-52-00 (N, P, K) no sulco do plantio.

Como fonte de Ni foi utilizado sulfato de Ni ($\text{NiSO}_4 (\text{H}_2\text{O})_6$), na dose de 20 g ha^{-1} para pulverização foliar conforme estudo de Barcelos et al., (2017). A fonte de silício utilizada foi o silicato de potássio estabilizado com sorbitol (SiKE - 115 g L^{-1} de Si, 113,85 g L^{-1} de K_2O , 100 mL L^{-1} de sorbitol e pH 12,0), na dose de 72 g ha^{-1} de Si (Rocha et al., 2022). O K foi balanceado entre os diferentes tratamentos. As aplicações de Si e Ni foram realizadas na mesma calda, de acordo com o tratamento em duas pulverizações, nos estádios fenológicos de V4 (terceira folha trifoliolada completamente desenvolvida) e R1 (início do florescimento, uma flor aberta em qualquer nó sobre a haste principal).

Para a aplicação dos tratamentos, utilizou-se pulverizador costal com cilindro de alumínio com capacidade para 2 kg de CO_2 , regulador de pressão, manômetro, de 0 a 100

psi, válvula de segurança e uma barra de aplicação com 4 bicos, calibrado para uma vazão de 150 L ha⁻¹, utilizando uma pressão de 2,5 bar e pontas TTI60-110025 TeeJet®. Foi adicionado 1 ml/L de óleo vegetal em todas as aplicações.

2.4 MANEJO FITOSSANITÁRIO

As aplicações foram feitas nos estádios fenológicos V4 com o herbicida Glifosato (588 g L⁻¹); V4 e V8 com o inseticida Tiametoxam (141 g L⁻¹), Lambda-Cialotrina (106 g L⁻¹); e V6 com o inseticida Metomil (215 g L⁻¹). Além disso, foram aplicados 300 ml ha⁻¹ dos fungicidas Azoxistrobina (200 g L⁻¹), Ciproconazol (80 g L⁻¹) 40 dias após o plantio; 500 ml ha⁻¹ dos fungicidas Azoxistrobina/Flutriafol (125 g L⁻¹) 60 dias após o plantio.

2.5 AVALIAÇÕES FISIOLÓGICAS

2.5.1 Análise de pigmentos fotossintetizantes e flavonóides

Todas as avaliações fisiológicas (pigmentos e trocas gasosas) foram realizadas no mesmo estágio fenológico, o R1, 3 dias após as duas aplicações dos tratamentos de Si e Ni, para tanto, as leituras das trocas gasosas foram realizadas no terceiro trifólio completamente desenvolvido de cima para baixo da haste principal, após isso, os trifólios foram coletados e encaminhados ao laboratório para análises dos pigmentos.

A partir da amostragem de 6 folhas por parcela foram determinados os teores de clorofila total (Chl *a* + *b*), carotenoides (Cx + c), flavonoides (FLV). Os teores dos pigmentos Chl *a* + *b* e Cx + c foram determinados a partir da retirada de 0,04 g de amostra fresca das folhas; em seguida, foram adicionados em tubos de ensaio com 5 mL de acetona (80%) para extração de pigmentos fotossintéticos, e permaneceram resfriadas por cerca de uma semana. Logo após, os extratos foram mensurados através de espectrofotômetro (modelo TU-1810) de acordo com a metodologia de Lichtenthaler (1987).

Para as análises de flavonoides, as amostras vegetais foram secas e posteriormente moídas. Para a extração das isoflavonas, 50 mg das amostras foram adicionadas em eppendorf de 2 mL, no qual adicionou-se 1,5 mL de metanol 70% contendo ácido acético (0,1%). A mistura foi agitada brevemente e depois incubado por 2 horas em ultrassom. Posteriormente, as amostras foram centrifugadas a 5.000 rpm por 20 min e o sobrenadante

obtido foi filtrado por meio de uma seringa com um filtro de 0,2 μm e transferidos para vials de 1,5 mL antes da injeção em um sistema de cromatografia líquida de ultra performace (UPLC). Alíquotas de 10 μL foram utilizadas para injeção direta no equipamento. Cada amostra teve três repetições de análise (Carrão-Panizzi et al., 2002)

A separação e quantificação das isoflavonas foram realizadas em cromatógrafo líquido no sistema UPLC Waters Acquity série 1100, com injetor automático de amostras. Utilizou-se uma coluna de fase reversa do tipo HSS C18, 1,8 μm (diâmetro interno de 2,1 mm (i.d.) \times 100 mm) com uma pré-coluna Acquity HSS C18, 1,8 μm (2,1 mm i.d. \times 5 mm). Para a separação das isoflavonas, adotou-se o sistema de gradiente linear binário, tendo como fases móvel: água Milli-Q e ácido acético 0,1% como solvente A e acetonitrila e ácido acético 0,1% como solvente B. O gradiente inicial foi de 99% para o solvente A e 1,0% para o solvente B de 0 a 9 minutos, 41,2% A e 58,8% B de 9 a 9,1 minutos, 100% B de 9,1 a 11 minutos e retornando a 99% A e 1% B aos 11 minutos e permanecendo assim até 15 minutos, que foi o tempo de corrida para cada amostra (Carrão-Panizzi et al., 2002). A vazão da fase móvel foi de 0,289 mL min^{-1} e a temperatura da coluna durante a corrida foi de 30 $^{\circ}\text{C}$. A detecção das isoflavonas foi realizada utilizando o detector de arranjo de fotodiodo da marca Waters, ajustado para o comprimento de onda igual a 254 nm. Para a detecção das isoflavonas, foram utilizados padrões adquiridos comercialmente de daidzeína (D1), genisteína (G1) e genistina (G2), solubilizados em metanol 70% e ácido acético (0,1%), nas seguintes concentrações: 0,000125, 0,0002, 0,0005, 0,001, 0,01, 0,02 mg mL^{-1} ; e daidzina (D2): 0,0001, 0,000125, 0,00025, 0,0005, 0,001, 0,002 mg mL^{-1} . A identidade qualitativa e quantitativa do pico foi confirmada comparando os tempos de retenção e os espectros de UV de compostos individuais e pelo método de adição padrão.

2.5.2 Trocas gasosas

Foram realizadas as análises de trocas gasosas através do equipamento portátil de fotossíntese (Infrared Gas Analyzer - IRGA), modelo Li6400XT (LiCor Inc., Lincoln, Nebraska, USA) com fluxo de fótons fotossinteticamente ativos de 1200 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ e concentração de CO_2 ambiente de $(400 \pm 10 \text{ mols m}^{-2} \text{s}^{-1})$. As variáveis fisiológicas avaliadas foram: fotossíntese (A , $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{s}^{-1}$), concentração interna de CO_2 (C_i , $\mu\text{mol CO}_2 \text{ mol}^{-1}$), transpiração (E , $\text{mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{s}^{-1}$) e condutância estomática (g_s , $\text{mol H}_2\text{O m}^{-2} \text{s}^{-1}$). De posse destes dados, foram quantificadas a eficiência no uso de água

(*WUE*) (*A/E*) [$(\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}) (\text{mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{s}^{-1})^{-1}$] e a eficiência instantânea da carboxilação (*ICE*) (*A/Ci*) [$(\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}) (\mu\text{mol mol}^{-1})^{-1}$].

2.5.3 Colheita e avaliação da produtividade

No final do ciclo da soja, foi realizada a avaliação de produtividade de grãos por meio da colheita e trilha da área útil de cada parcela. Para calcular a produtividade após a trilha, o teor de umidade dos grãos foi corrigido para 13%, efetuando também os descontos das impurezas, sendo o resultado expresso em kg ha^{-1} .

2.6 Análise estatística

Os dados foram submetidos a análise de variância (ANOVA). As variáveis significativas submetidas a análise de comparação de médias pelo teste de Scott-knott em nível de 0,05% de probabilidade.

3. RESULTADOS

3.1 Pigmentos fotossintetizantes

A combinação de Ni + Si proporcionou maior teor de clorofila total (*Chl a + b*) com a média de $2,1 \text{ mg g}^{-1}$, porém não se diferiu dos tratamentos de Ni e Si isolados com teores em torno de $1,75 \text{ mg g}^{-1}$ (Figura 2a). A aplicação de Ni isolada apresentou um declínio para o teor de carotenoide, os demais tratamentos não apresentaram diferença estatisticamente (Figura 2b). Os flavonoides (FLV) tiveram maiores teores quando se combinou Ni + Si e, aplicou-se Ni, apresentando 2000 e 1750 mg 100g MS^{-1} (Figura 2c), porém não se diferiu do tratamento Ni isolado.

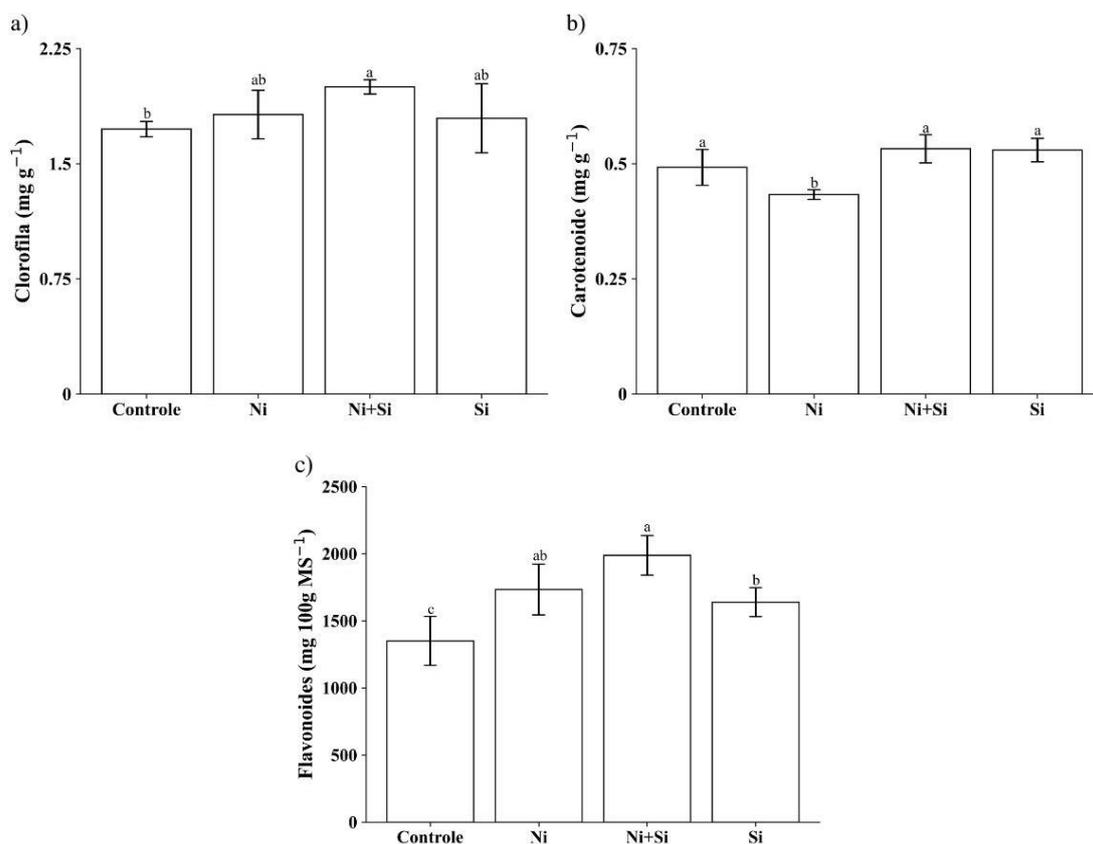


Figura 2. Teor de Clorofila (Chl *a* + *b*) (a), Carotenoides (Cx + c) (b) e Flavonoides (FLV) (c) de plantas de soja cultivadas sob aplicação de Ni e de Si isolados e combinados na mesma aplicação. As médias seguidas pelas mesmas letras não diferem entre si pelo teste de Scott-Knott a 5% de probabilidade.

3.2 Trocas gasosas

Tanto a aplicação de Ni e Si isolados ou em conjunto aumentaram a fotossíntese (A) comparadas ao controle; O Si apresentou o melhor resultado com $24 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$, mas não houve diferença estatística em relação aos tratamentos de Ni + Si e, Ni isolado com valores de 23 e $22 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ (Figura 3a). Para concentração interna de CO_2 (*C_i*) (Figura 3b) não existe diferença entre os tratamentos, tendo valores entre 284 – 267 $\mu\text{mol CO}_2 \text{ mol}^{-1}$. A aplicação de Si favoreceu a transpiração (*E*) com a média de $8,5 \text{ mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ (Figura 3c), entretanto não se diferenciou da aplicação de Ni ($6,88 \text{ mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$), já aplicação de Ni + Si foi a que apresentou menor resultado. A condutância estomática (*g_s*) foi maior quando se aplicou a combinação de Ni + Si (Figura 3d) em torno de $0,42 \text{ mol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$, não diferindo dos tratamentos de Ni e Si isolados, ambos com $0,38 \text{ mol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$

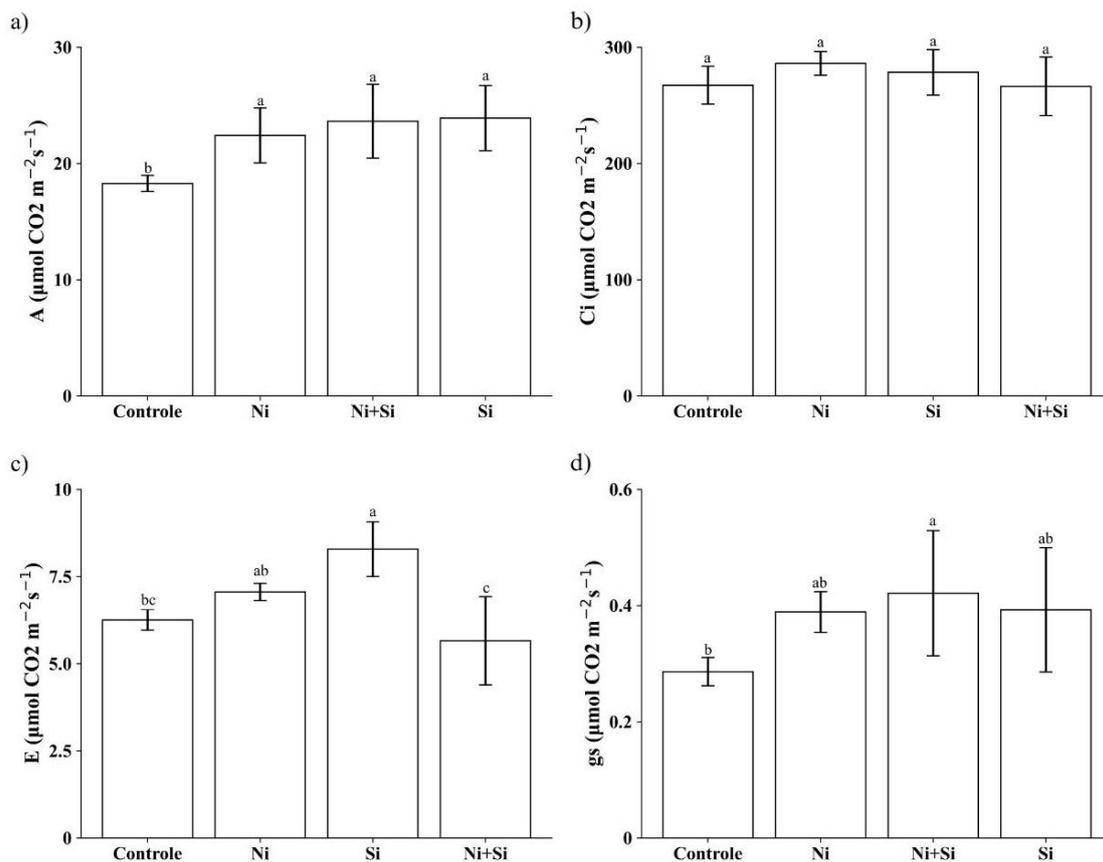


Figura 3. Fotossíntese (*A*) (a), Concentração interna de CO_2 (*Ci*) ($\mu\text{mol CO}_2 \text{ mol}^{-1}$) (b), Transpiração (*E*) ($\text{mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) (c), e Condutância estomática (g_s) ($\text{mol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) (d) de plantas de soja cultivadas sob aplicação de Ni e de Si isolados e combinados na mesma aplicação. doses de Ni. As médias seguidas pelas mesmas letras não diferem entre si pelo teste de Scott-Knott a 5% de probabilidade.

A eficiência instantânea da carboxilação (*ICE*) (Figura 4a) foi maior quando aplicado os tratamentos de Si e Ni + Si atingindo média de 106 e 86 [$(\mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}) (\mu\text{mol mol}^{-1})^{-1}$]. Já a eficiência do uso da água (*WUE*) foi melhor na aplicação de Si com o valor de 4,5 [$(\mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}) (\text{mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1})^{-1}$] (Figura 4b).

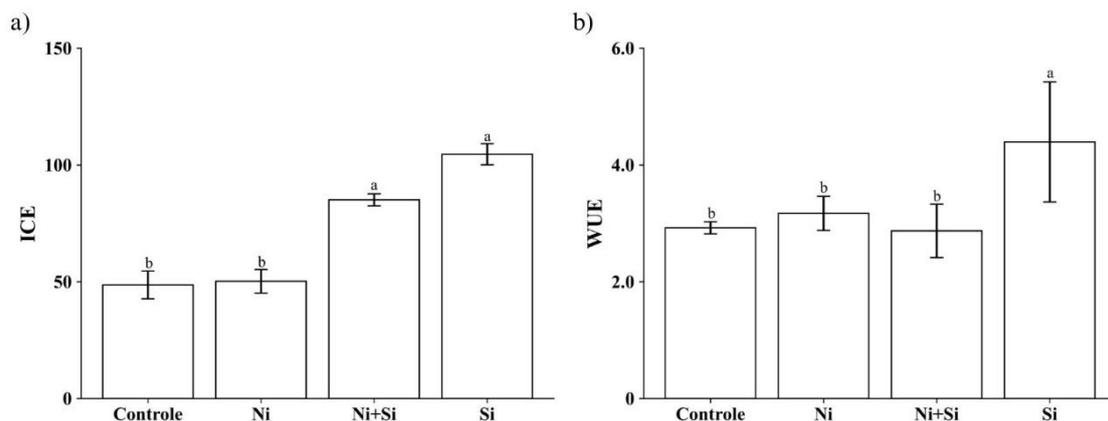


Figura 4. Eficiência instantânea na carboxilação (*ICE*) (A/C_i) [$(\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}) (\mu\text{mol mol}^{-1})^{-1}$] (a), e Eficiência instantânea no uso da água (*WUE*) (A/E) [$(\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}) (\text{mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{s}^{-1})^{-1}$] (b) de plantas de soja cultivadas sob aplicação de Ni e de Si isolados e combinados na mesma aplicação.

As médias seguidas pelas mesmas letras não diferem entre si pelo teste de Scott-Knott a 5% de probabilidade.

Quando foi aplicado Ni e Si isolados ou combinados e compara com o tratamento controle, não há diferença na produtividade (PROD) de grãos, tendo as médias entre 3500 - 3800 (Figura 5).

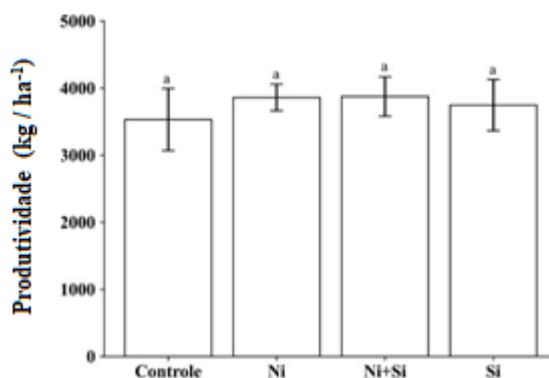


Figura 5. Produtividade de grãos de soja cultivadas sob aplicação de Ni e de Si isolados e combinados na mesma aplicação. As médias seguidas pelas mesmas letras não diferem entre si pelo teste de Scott-Knott a 5% de probabilidade (PROD, kg ha^{-1}).

3. DISCUSSÃO

Conforme avaliado no presente estudo, a utilização de Si e Ni na cultura da soja proporcionou um complemento para pigmentos fotossintetizantes, os melhores resultados para essa variável foram obtidos quando se aplicou a combinação de Ni + Si. O aumento dos pigmentos fotossintéticos é essencial para o processo da fotossíntese, fixação do CO₂ e produção de carboidratos (HALL; RAO, 1980; SUN et al., 1998). O Ni tem ação sobre enzimas que participam da rota fotossintética a exemplo das enzimas Rubisco e Aldolases (SHEORANT et al., 1990), a Rubisco é responsável pela carboxilação da molécula de dióxido de carbono durante a fotossíntese em plantas, e é considerada uma das enzimas mais importantes nesse processo, pois é responsável pela fixação do carbono atmosférico e, conseqüentemente, pela produção de carboidratos. Portanto, o Ni pode afetar a eficiência instantânea da carboxilação, e conseqüentemente produção de carboidratos em plantas, que por sua vez pode ter um impacto significativo na produtividade e na sustentabilidade agrícola.

Para os carotenoides as aplicações de Ni+Si e Si isolado não diferiram do controle, diferente de Lima (2006) o qual observou um aumento no teor do mesmo quando realizou a aplicação de silicato de potássio na cultura da soja, o maior teor desse pigmento beneficia a eliminação do dano oxidativo causado por metais pesados, por outro lado, o aumento desses pigmentos nas plantas de soja pode ser considerado como um mecanismo de regulação fisiológica entre sua captação para A que acabou sendo aumentada e a dissipação do excesso de energia de excitação e, portanto, um mecanismo de fotoproteção (GOMES, et al., 2023).

o Ni isolado proporcionou um declínio no teor de carotenoide, isso se torna prejudicial para cultura já que os mesmos possuem função no complexo de captação de luz e na fotoproteção dos fotossistemas, a concentração deste pigmento é benéfica para invalidar os danos oxidativos ocasionados pelo excesso de luz (ZEESHAN et al., 2020). Moura et al (2021) não observou diferença quanto a forma de fornecimento do Ni, na semente, foliar ou ambos combinados, todos apresentaram resultado estatisticamente iguais para o teor de carotenoides na cultura da soja.

Para os teores de flavonoides os melhores tratamentos foram obtidos com a aplicação isolada de Ni e de Si+Ni demonstrando a necessidade de mais estudos sobre o mesmo na literatura. A aplicação de Ni afetou positivamente a fisiologia e o crescimento da soja, fato esse que pode ser atribuído por um aumento do metabolismo do nitrogênio (N); em particular, os nódulos apresentaram maior atividade de nitrogenase associada a

maiores concentrações de Ni em áreas de maior atividade metabólica (FREITAS et al., 2019).

Já os resultados positivos obtidos pelo Si nos pigmentos fotossintetizantes também já foram relatados mesmo sob deficiência de N (ARAÚJO et al., 2022) e sob estresse por Al em plantas de trigo sarraceno comum (*F. esculentum* M.) (DAR et al., 2022). O Si aplicado de forma isolada foi o que apresentou melhores resultados para eficiência instantânea da carboxilação e para eficiência do uso da água, fato esse que pode ser atribuído ao fato do acúmulo de Si na parede celular (órgãos de transpiração) formar uma dupla camada de cutícula de Si (sílica (SiO₂)) que reduz a perda de água por transpiração podendo ser uma adaptação ao estresse hídrico (BIANCHINI; MARQUES, 2019), aumentando a eficiência do uso da água. O Si auxilia no aumento do teor relativo de água, além da presença nas células epidérmicas das folhas, seguido pelas células corticais e do feixe vascular das folhas, auxiliando para o fluxo de nutrientes através de seus vasos (JAVAID et al., 2019).

Ao aplicar Si, ele mantém as folhas mais eretas, ou seja, efeito físico na planta, por aumentar significativamente a deposição de compostos orgânicos e Si abaixo da cutícula (YOSHIDA et al., 1969), o que aumenta a rigidez da parede celular, melhorando arquitetura foliar e podendo aumentar a capacidade fotossintética das plantas.

Já o Ni ao ser aplicado de forma isolada apresentou os piores resultados para eficiência instantânea na carboxilação e eficiência instantânea no uso da água, não diferindo nem do controle o qual não foi feita nenhuma aplicação, isso se dá pelo fato do Ni não causar efeito sob a abertura estomática (Papazoglou et al., 2007), e se acumular nas células subsidiárias, sem modificações nas células guardas como observado em folhas de *Thlaspi montanum*, uma planta hiperacumuladora deste micronutriente (HEATH e PACKER, 1968).

O excesso de Ni está associado a muitos efeitos adversos nas plantas, como redução na germinação (RAO E SRESTY, 2000), crescimento das plantas (MOLAS, 2002), divisão celular (RAO E SRESTY, 2000), produção de biomassa (NAKAZAWA et al., 2004), nutrientes absorção (NEDHI et al., 1990), A e E (LEVY, 2013), clorose foliar e necrose (Hassan, 2019), além de efeitos na atividade mitótica e enzimáticas (PACHECO, 2015). Portanto, todos os efeitos tóxicos devido ao estresse por Ni reduzem o rendimento e a qualidade das culturas (AHMAD et al., 2007; DUARTE et al., 2007). Sendo assim requer muita atenção no uso desse micronutriente, a fim de, evitar doses muito elevadas que possam culminar em toxicidade às plantas.

A toxicidade de Ni podem ocasionar estresse nas plantas, diminuindo os teores de Chl total os $Cx+c$ (Seregin e Kozhevnikova 2006) e as variáveis de trocas gasosas em plantas de milho (Rehman et al., 2016), incluindo inibição enzimática, funcionamento dos estômatos (reduz a estabilidade da membrana e leva à perda de osmólitos e da pressão de turgor celular) (HASSAN et al., 2019), transporte fotossintético de elétrons e degradação de moléculas de Chl, germinação das sementes e o crescimento das raízes, reduzindo assim a absorção de água, nutrientes, A e rendimento biológico das plantas (YUSUF et al., 2011).

O Si alivia a fitotoxicidade causada pelos íons Al e também promove a produção de compostos fenólicos e FLV, estimulando a via dos fenilpropanóides. Os FLV são uma classe importante de compostos polifenólicos que são liberados pelas raízes das plantas na rizosfera (CESCO et al., 2012). Eles podem entrar no solo como resultado da renovação radicular, lesão radicular, decomposição radicular ou através da exsudação radicular (SHAW et al., 2006). Na rizosfera, os FLV liberados pelas raízes podem desempenhar funções multifuncionais, como proteger as plantas contra pragas e patógenos, regular o crescimento e as funções das raízes, influenciar os ciclos de nutrientes, interagir com proteínas e tornar a proteína N mais resistente à degradação microbiana, influenciando o crescimento e atividades de microrganismos e indução de efeitos de crescimento alelopáticos (CESCO et al., 2012).

O aumento na taxa de assimilação de CO_2 está relacionado à maior concentração de CO_2 constatada no interior das folhas segundo Jadoski et al. (2005), o que pode decorrer do fechamento estomático em resposta aos estresses abióticos. A C_i é importante porque a produtividade de uma planta pode ser analisada como o produto da energia solar interceptada e, do CO_2 fixado durante um período, de acordo com Taiz e Zeiger (2006). Na presença de quantidade adequada de luz e ausência de estresse, como déficit hídrico, concentrações mais altas de CO_2 sustentam taxas fotossintéticas elevadas, enquanto que em concentrações intercelulares de CO_2 muito baixas a fotossíntese é limitada (DALASTRA et al., 2014). O aumento verificado na ICE , deve-se, sobretudo, aos ganhos na taxa de assimilação de CO_2 , uma vez que, a ICE está intimamente relacionada com a concentração intracelular de CO_2 e com a taxa de assimilação de CO_2 (MACHADO et al., 2005).

A relação entre a fotossíntese e a transpiração é dita como WUE , que expressam os valores adquiridos da quantidade de carbono que a planta fixa por cada unidade de H_2O que libera por meio dos estômatos (JAIMEZ et al., 2005). A compreensão da WUE é

eficaz para aliviar o estresse das culturas no campo em condições de seca onde a água é um fator limitante. A *WUE* em plantas é influenciada por uma série de fatores, incluindo a capacidade das plantas para regular a abertura e fechamento dos estômatos, a taxa de *E*, a absorção e transporte de nutrientes, entre outros (VIEIRA et al., 2010).

4. CONCLUSÕES

Dessa forma a aplicação via foliar de Ni e Si, combinados ou isolados, promoveu melhorias em aspectos fisiológicos como nos teores de pigmentos fotossintetizantes, trocas gasosas, isso colaborou para que a cultura da soja conseguisse obter uma menor taxa de transpiração e um maior aproveitamento da água.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ARAÚJO, W. B. S. et al. Silicon attenuates the nutritional stress of nitrogen, phosphorus and calcium deficiency in two forage plants. *Scientific reports* 12, 6611 (2022). Disponível em: <<https://doi.org/10.1038/s41598-022-10615-z>>.

AHMAD, M. S. A.; HUSSAIN, M.; SADDIQ, R.; ALVI, A. K. (2007) Mungbean: a nickel indicator, accumulator or excluder. *Bull Environ Contam Toxicol* 78:319–324.

BARBOSA FILHO, M.P.; SNYDER, G.H.; FAGERIA, N.K.; DATNOFF, L.E.; SILVA, O.F. Silicato de cálcio como fonte de silício para o arroz de sequeiro. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.25, p.325-30, 2001.

BIANCHINI, H. C.; MARQUES, D. J. Tolerance to hydric stress on cultivars of silicon-fertilized corn crops: absorption and water-use efficiency. *Bioscience journal (Online)*, p. 527–539, 2019.

DALASTRA, G. M. et al. Trocas gasosas e produtividade de três cultivares de meloeiro conduzidas com um e dois frutos por planta. *Bragantia*, v. 73, n. 4, p. 365–371, 28 out. 2014.

DAR, F. A. et al. Silicon Application Enhances the Photosynthetic Pigments and Phenolic/Flavonoid Content by Modulating the Phenylpropanoid Pathway in Common Buckwheat under Aluminium Stress. *Silicon*, v. 14, n. 1, p. 323–334, jan. 2022.

DONAGEMA, G. K. et al. Manual de métodos de análise de solo. Embrapa Solos-Documentos (INFOTECA-E), 2011.

DRAŹKIEWICZ, M.; BASZYŃSKI, T. Interference of nickel with the photosynthetic apparatus of *Zea mays*. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, v. 73, n. 5, p. 982-986, 2010.

DUARTE, B.; DELGADO, M. Caador I (2007) The role of citric acid in cadmium and nickel uptake and translocation, in *Halimione portulacoides*. *Chemosphere* 69:836–840.

EPSTEIN, E. *Annu. Rev. Plant Physiol. Plant Mol. Biol.*, 50, 641–664.1999.

ESKEW, D.L., WELCH, R.M., CARY, E.E. (1983) Níquel: um micronutriente essencial para leguminosas e possivelmente todas as plantas superiores. *Ciência* 222:621–623.

FREITAS, D. S. et al. How does Ni fertilization affect a responsive soybean genotype? A dose studies. *Plant and Soil*, v. 441, n. 1, p. 567-586, 2019.

HALL, D. O.; RAO, K. K. Coleção Temas de Biologia: Fotossíntese. Editora Pedagógica e Universitária Ltda, São Paulo. p.89, 1980.

HASSAN, M. U. et al. Nickel toxicity in plants: reasons, toxic effects, tolerance mechanisms, and remediation possibilities a review. *Environmental Science and Pollution Research*, v. 26, n. 13, p. 12673-12688, 2019.

HEATH, R. L.; PACKER, L. Photoperoxidation in isolated chloroplast. I. Kinetics and stoichiometry of fatty acid peroxidation. Archives in Biochemistry Biophysics, Dusseldorf, v. 125, p. 2141-2145, 1968.

JADOSKI, S.O.; KLAR, A.E.; SALVADOR, E.D. Relações hídricas e fisiológicas em plantas de pimentão ao longo de um dia. *Ambiência*, v.1, p.11-19, 2005.

JAIMEZ, R. E. et al. Seasonal variations in leaf gas exchange of plantain cv. 'Hartón' (Musa AAB) under different soil water conditions in a humid tropical region. *Scientia Horticulturae*, Amsterdam, v. 104, n. 1, p. 79-89, 2005.

JAVOID, T. et al. Silicon nutrition improves growth of salt-stressed wheat by modulating flows and partitioning of Na⁺, Cl⁻ and mineral ions. *Plant Physiology and Biochemistry*, 141 (2019), p. 291-299, 10.1016/j.plaphy.2019.06.010.

KUMAR, O. et al. Foliar fertilization of nickel affects growth, yield component and micronutrient status of barley (*Hordeum vulgare* L.) grown on low nickel soil. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 64, n. 10, p. 1407-1418, 2018.

LICHTENTHALER, H. K. Chlorophylls and carotenoids: Pigments of photosynthetic biomembranes. *Methods in Enzymology*, v. 148, p. 350-382, 1987.

LIMA, L.M. Manejo da ferrugem da soja (*Phakopsora pachyrhizi* Sydow & P. Sydow). 2006. 81p. Dissertação (Mestrado)-Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2006.

MACHADO, E. C. et al. Respostas da fotossíntese de três espécies de citros a fatores ambientais. *Pesquisa agropecuária brasileira*, v. 40, n. 12, p. 1161-1170, 2005.

MA, J. F., YAMAJI, N., 2006. Silicon uptake and accumulation in higher plants. *Trends in Plant Sci.* 11, 392–397.

MOLAS, J. (2002) Changes of chloroplast ultrastructure and total chlorophyll concentration in cabbage leaves caused by excess of organic Ni II complexes. *Environ Exp Bot* 47:115–126.

MOURA, M.J.A, CAZETTA, J.O.; Métodos de aplicação de níquel e seus efeitos sobre as características agronômicas e teor de proteína na soja – Jaboticabal – SP, 2021.

PACHECO, J. M. A. S. Concentração de metais pesados em espécies hortícolas em agricultura urbana. Tese de Doutorado. Universidade de Lisboa (Portugal), 2015.

PAPAZOGLU, E. G. et al. Impact of high cadmium and nickel soil concentration on selected physiological parameters of *Arundo donax* L. *European journal of soil biology*, Montrouge, v. 43, p. 207-215, 2007.

PEREIRA JÚNIOR, P. et al. Efeito de doses de silício sobre a produtividade e características agronômicas da soja [*Glycine max* (L.) Merrill]. *Ciência e Agrotecnologia*, Lavras, v.34, n.4, p.908-913, 2010.

RAIJ, B. V. Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais. Campinas: Instituto Agronômico, p. 285, 2001.

REHMAN, M. Z.U. et al. Contrasting effects of biochar, compost and farm manure on alleviation of nickel toxicity in maize (*Zea mays* L.) in relation to plant growth, photosynthesis and metal uptake. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, v. 133, p. 218-225, 2016.

SANTOS, H. G. et al. Sistema brasileiro de classificação de solos. Brasília, DF: Embrapa. 2018.

SEREGIN, I. V.; KOZHEVNIKOVA, A. D. Physiological role of nickel and its toxic effects on higher plants. *Russian Journal of Plant Physiology*, Moscow, v. 53, n. 2, p. 257-277, 2006.

SHAHZAD, B. Nickel; whether toxic or essential for plants and environment-A review. *Plant Physiology and Biochemistry*, 132, 641-651, 2018.

SUN, J. et al. 1998. Green light drives CO₂ fixation deep within leaves. *Plant Cell Physiology*, v. 39, n. 10, p. 1020-1026, 1998.

TAIZ, L.,; ZEIGER, E. (2006) *Plant physiology*, 4rd edn. Sinauer Associates, Sunderland, MA, pp 607–611

VIEIRA, E. L. et al. *Manual de fisiologia vegetal*. Edufma, 2010.

YOSHIDA, S.; NAVASERO, A. S.; RAMIREZ, E. A. (1969) Effects of silica and nitrogen supply on some leaf characters of the rice plant. *Plant and Soil*, Dordrecht, v.31, n.1, p.48-56, 1969. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/BF01373025>.

YUSUF, M. et al. Nickel: an overview of uptake, essentiality and toxicity in plants. *Bulletin of environmental contamination and toxicology*, v. 86, p. 1-17, 2011.

ZEESHAN, M. et al. Phytostabalization of the heavy metals in the soil with biochar applications, the impact on chlorophyll, carotene, soil fertility and tomato crop yield. *Journal of Cleaner Production*, v. 255, p. 120318, 2020.