



INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO PIAUÍ
CAMPUS URUÇUÍ
CURSO BACHAREL EM ENGENHARIA AGRONÔMICA

NÍVEA MARIA DE SOUSA LIMA

**EFEITO DO NÍQUEL NA FIXAÇÃO BIOLÓGICA DE NITROGÊNIO E NO
DESENVOLVIMENTO DO FEIJÃO-CAUPI**

URUÇUÍ

2024

NÍVEA MARIA DE SOUSA LIMA

**EFEITO DO NÍQUEL NA FIXAÇÃO BIOLÓGICA DE NITROGÊNIO E NO
DESENVOLVIMENTO DO FEIJÃO-CAUPI**

Trabalho de Conclusão de Curso (artigo científico)
apresentado como exigência parcial para obtenção
do diploma do Curso de Engenharia Agrônômica do
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia
do Piauí, Campus Uruçuí.

Orientador: Prof. Dr. Franklin Eduardo Melo
Santiago

URUÇUÍ

2024

EFEITO DO NÍQUEL NA FIXAÇÃO BIOLÓGICA DE NITROGÊNIO NO FEIJÃO-CAUPI

Nívea Maria de Sousa Lima¹
Franklin Eduardo Melo Santiago²

RESUMO

A aplicação de níquel no feijão-caupi exerce efeitos significativos e diretos na fixação biológica de nitrogênio e no crescimento da cultura, desempenhando um papel essencial na nodulação e no metabolismo do nitrogênio. Nesse contexto, o objetivo do presente estudo foi avaliar o efeito da aplicação de doses crescentes de Ni na fixação biológica de nitrogênio em duas cultivares de feijão-caupi. O experimento foi conduzido em delineamento inteiramente casualizado, em esquema fatorial 4 x 2, correspondendo a quatro doses de Ni (0; 0,5; 1,5 e 3,0 mg Ni kg⁻¹) e a duas cultivares de feijão-caupi (BRS Tumucumaque e BRS Xique-xique), com quatro repetições, sendo aplicado o sulfato de níquel via solo. Aos 38 dias após a emergência foram avaliados os seguintes parâmetros: número de nódulos por planta, massa seca de nódulos, número de nódulos viáveis, altura de plantas, massa seca da parte aérea e da raiz. Os resultados indicaram que o Ni, em doses moderadas, promoveu o crescimento e a nodulação, com a dose ideal variando entre as cultivares. A cultivar Tumucumaque apresentou maior nodulação na dose de 2,0 mg Ni kg⁻¹, enquanto a Xique-xique mostrou menor resposta ao elemento. Contudo, doses elevadas de Ni causaram redução na biomassa aérea e na nodulação, indicando toxicidade. Os dados confirmam que o manejo adequado do Ni pode otimizar a FBN no feijão-caupi, contribuindo para sistemas agrícolas sustentáveis e redução do uso de fertilizantes nitrogenados. A aplicação de Ni na dose de 1,0 mg Ni kg⁻¹ promoveu maior nodulação da cultivar Tumucumaque, sem reduzir o seu acúmulo de biomassa.

Palavras-chave: Ni; FBN; *Vigna unguiculata*; nodulação; agricultura sustentável.

¹Acadêmica de Engenharia Agrônômica, IFPI – Campus Uruçuí, niveamaria680@gmail.com

²Doutor em Ciência do Solo, Professor do IFPI – Campus Uruçuí, franklin.santiago@ifpi.edu.br

ABSTRACT

The application of nickel in cowpea has significant and direct effects on biological nitrogen fixation and crop growth, playing an essential role in nodulation and nitrogen metabolism. In this context, the objective of the present study was to evaluate the effect of increasing doses of Ni on biological nitrogen fixation in two cowpea cultivars. The experiment was conducted in a completely randomized design in a 4 x 2 factorial scheme, corresponding to four Ni doses (0; 0.5; 1.5; and 3.0 mg Ni kg⁻¹) and two cowpea cultivars (BRS Tumucumaque and BRS Xique-xique), with four replications, using nickel sulfate applied to the soil. At 38 days after emergence, the following parameters were evaluated: number of nodules per plant, nodule dry mass, number of viable nodules, plant height, shoot dry mass, and root dry mass. The results indicated that moderate doses of Ni promoted growth and nodulation, with the optimal dose varying between cultivars. The Tumucumaque cultivar exhibited higher nodulation at the dose of 2.0 mg Ni kg⁻¹, while the Xique-xique cultivar showed a lower response to the element. However, high doses of Ni caused reductions in shoot biomass and nodulation, indicating toxicity. The data confirm that proper Ni management can optimize biological nitrogen fixation in cowpea, contributing to sustainable agricultural systems and reducing the use of nitrogen fertilizers. The application of Ni at a dose of 1.0 mg Ni kg⁻¹ promoted greater nodulation in the Tumucumaque cultivar without reducing its biomass accumulation.

Keywords: Ni; FBN; *Vigna unguiculata*; nodulation; sustainable agriculture.

Data de aprovação: 06/12/2024 (data de apresentação do TCC).

1. INTRODUÇÃO

O feijão-caupi é uma leguminosa amplamente cultivada em regiões tropicais e subtropicais, desempenha um papel crucial na segurança alimentar e na subsistência de milhões de pessoas ao redor do mundo. No Brasil, a região Nordeste destaca-se como a principal produtora e consumidora, sendo responsável, na safra brasileira de 2022/2023, com 1.273,2 mil hectares plantados, a produção total foi de 622,2 mil toneladas, e produtividade média de 489 kg/ha (CONAB, 2023). Além de sua importância socioeconômica como componente-chave nos sistemas de produção agrícola, o feijão-caupi é valorizado por seu alto valor nutritivo (ALMEIDA et al., 2010).

Estudos recentes destacam a importância do níquel (Ni) na otimização do processo de FBN com resultados promissores na cultura da soja (*Glycine max* L. Merrill) e do feijão-caupi (*Vigna unguiculata* L. Walp). Bosse et al. (2024), avaliando a aplicação de Ni na soja, verificaram uma correlação positiva entre a concentração de flavonoides (daidzeína), nodulação, ureídeos e rendimento de sementes. Mendes et al. (2023) traz evidências sobre a importância do Ni no feijão-caupi, e concluiu que a dose 0,5 mg Ni kg⁻¹ favoreceu a nodulação, mostrando melhora na nodulação em comparação ao controle, pois o Ni aumenta a concentração de flavonoides, como a daidzeína, cruciais para a formação dos nódulos nas raízes das plantas.

O Ni foi um dos últimos micronutrientes reconhecidos como essenciais para o desenvolvimento das plantas (RODAK et al., 2013). Sua atuação é de grande relevância no metabolismo vegetal, especialmente no metabolismo de aminoácidos e ácidos orgânicos, além de desempenhar um papel importante na regulação da produção de etileno, hormônio que impacta diretamente diversos processos fisiológicos nas plantas. Promove a germinação das sementes, aumenta a resistência das plantas a doenças e auxilia na conservação pós-colheita de frutos, prolongando sua qualidade e viabilidade (SOBRAL; SILVA, 2021).

Entretanto, na situação de deficiência de Ni, as plantas sofrem com crescimento reduzido, senescência, distúrbios na assimilação de nitrogênio (N) e comprometimento da absorção de ferro (WOOD et al., 2006; BAI et al., 2006). Por outro lado, em altas concentrações podem provocar distúrbios fisiológicos graves, até mesmo a morte de plantas e diminuição da biomassa microbiana prejudicando a vida no solo (BERTON et al., 2006).

O Ni desempenha um papel direto no metabolismo do N e na fixação biológica de nitrogênio (FBN), e consequentemente beneficiando uma ampla gama de processos fisiológicos e desenvolvimento vegetal, contribuindo para o aumento das produtividades das culturas (LAVRES et al., 2016; FREITAS et al., 2018). É constituinte da metaloenzima urease que

desdobra a ureia $[\text{CO}(\text{NH}_2)_2]$ hidroliticamente em amônia (NH_3) e dióxido de carbono (CO_2), permitindo aos organismos o uso de ureia gerada interna e externamente como fonte de N (RODAK et al. 2013). Sua deficiência, ligada a baixa atividade da urease, pode afetar o metabolismo do N e levar ao acúmulo de níveis tóxicos de ureia nos brotos, interrompendo o crescimento e a produtividade das plantas (BOSSE et al. 2021).

Além disso, o Ni desempenha um papel na regulação da expressão da síntese de hidrogenase, que é responsável pela reciclagem de hidrogênio (H_2) produzido por uma reação lateral da nitrogenase, aumentando a eficiência da fixação de N, sendo muito exigido pelas bactérias fixadoras de N_2 (BAGYINKA, 2014). Quando suprido adequadamente, a expressão da hidrogenase é regulada, permitindo uma melhor captação e utilização de H_2 , o que resulta em uma maior eficiência na FBN. Esse processo reduz a perda de energia e melhora a produtividade das plantas hospedeiras, especialmente em leguminosas que mantêm uma relação simbiótica com rizóbios (BRAZZOLOTTO et al., 2016).

Assim, o Ni está diretamente relacionado à nitrogenase desempenhando um papel na captura e transformação de N atmosférico em NH_3 em plantas *Fabaceae* (BARCELOS et al., 2018; SIQUEIRA FREITAS et al., 2018). Sua presença é essencial para otimizar o desempenho das bactérias fixadoras de N_2 , potencializando a FBN e contribuindo para uma agricultura mais produtiva e menos dependente de fertilizantes químicos. No feijão-caupi, a aplicação de Ni aumenta a biomassa e o rendimento, além de melhorar a qualidade das sementes ao aumentar a concentração de ferro (Fe), manganês (Mn) e zinco (Zn) (GOSWAMI et al., 2022). A associação com outros nutrientes, como a aplicação de molibdênio (Mo) e níquel (Ni), pode aumentar o rendimento e o teor de proteína em plantas *Fabaceae* (CARLIM et al., 2019).

Dessa maneira, compreender como a suplementação com Ni afeta a FBN no feijão-caupi pode ter impactos significativos tanto na produtividade e qualidade da cultura, bem como apoiar práticas agrícolas mais sustentáveis, otimizando o uso de fertilizantes nitrogenados e, assim, reduzindo custos de produção e contribuindo para um desenvolvimento agrícola mais eficiente e sustentável. Porém ainda são escassos os estudos que buscam compreender como o Ni afeta a FBN no feijão-caupi. Nesse contexto, o objetivo do presente estudo foi avaliar o efeito da aplicação de doses crescentes de Ni na fixação biológica de nitrogênio em duas cultivares de feijão-caupi.

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1. Localização e caracterização da área experimental

A pesquisa foi conduzida em casa de vegetação no Departamento Fazenda Escola do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Piauí, Campus Uruçuí, localizado no município de Uruçuí, mesorregião do Cerrado do Sudoeste do Estado do Piauí (7° 29' S, 44° 14' W), com altitude de 470 m.

O clima da região é do tipo Aw no sistema Köppen, com temperatura média anual de 27,2 °C, precipitação anual de 1.069 mm, com estação chuvosa de outubro a abril, sendo janeiro a março o trimestre mais chuvoso, com ocorrência de veranicos (FRANÇA et al, 2017). O solo da área experimental foi classificado, conforme metodologia da Embrapa (2013), como Latossolo Amarelo Distrófico de textura média.

2.2. Delineamento experimental e tratamentos

O experimento foi conduzido em delineamento inteiramente casualizado, em esquema fatorial 4 x 2, correspondendo a quatro doses de Ni (0; 0,5; 1,5 e 3,0 mg Ni kg⁻¹) e a duas cultivares de feijão-caupi, escolhidas devido às suas características agrônômicas diferenciadas, adaptabilidade e resistência, (BRS Tumucumaque e BRS Xique-xique), com quatro repetições (BOSSE et al., 2024; MENDES et al., 2023).

2.3. Condução do experimento

O solo coletado foi seco ao ar, destorroado, passado em peneira de 4 mm de abertura e depositado em cada vaso a quantidade de 5 kg de solo da camada superficial (0-20 cm) de um Latossolo Amarelo distrófico com textura média, retirado de uma área nativa da Fazenda Escola do Campus. A calagem foi realizada para elevar a saturação por base a 80%, com aplicação de calcário dolomítico tipo FILLER com PRNT de 99%. A adubação de base foi constituída de 170 kg ha⁻¹ de cloreto de potássio e 300 kg ha⁻¹ de superfosfato triplo. Foram realizadas a adubação de cobertura aos 30 e 60 dias após a semeadura aplicando 170 kg ha⁻¹ de K (Anexo 1). O Ni foi aplicado na forma de sulfato de níquel (NiSO₄.6H₂O) em doses crescentes no solo.

A semeadura foi realizada utilizando três sementes por vaso, com posterior desbaste aos dez dias após a emergência, mantendo-se duas plantas por vaso. As sementes foram inoculadas com o BiomaBrady – Líquido, formulado com as estirpes SEMIA 5079 e SEMIA 5080 de *Bradyrhizobium japonicum*, que apresenta densidade de 1,03 g ml⁻¹ e garantia de 7,2 x 10⁹ células viáveis ml⁻¹. A inoculação foi realizada de acordo com a recomendação do fabricante, com a dose de 50 ml ha⁻¹, o equivalente a utilização de 1ml/1kg de sementes. Realizou-se a

irrigação diariamente mantendo o solo próximo a capacidade de campo. Além disso, foi realizado o monitoramento diário de pragas e doenças, e o controle quando necessário.

2.4. Parâmetros avaliados

Aos 38 dias após a semeadura, no início da floração, as plantas foram coletadas, separadas em parte aérea e raiz e avaliadas quanto aos seguintes parâmetros: (a) número de nódulos por planta: foram quantificados todos os nódulos presentes nas raízes com tamanho igual ou superior a 2 mm; (b) massa seca de nódulos: determinada após secagem em estufa de circulação forçada de ar a $65 \pm 5^{\circ}\text{C}$ por 72 horas; e (c) número de nódulos viáveis: foram quantificados os 20 nódulos mais semelhantes e verificado sua viabilidade; (d) altura de plantas; (e) massa seca da parte aérea e da raiz: determinada após as plantas terem permanecido em estufa de circulação de ar forçada a $65 \pm 5^{\circ}\text{C}$ por 72 horas (BETTIOL, 2019).

2.5. Estatística

Os dados foram submetidos à análise de variância ($p < 0,05$) e análise de regressão utilizando o software estatístico R 3.2.3 (R CORE TEAM, 2018).

3. RESULTADOS

3.1. Efeito do Ni na nodulação do feijão-caupi

A aplicação de doses crescentes de Ni afetou significativamente as variáveis número de nódulos e massa seca de nódulos, entretanto não teve efeito para o número de nódulos viáveis das cultivares de feijão-caupi avaliadas (Figura 1).

As cultivares de feijão-caupi apresentaram respostas variadas para o número de nódulos em função da aplicação de Ni (Figura 1a). A cultivar Tumucumaque respondeu positivamente a aplicação de Ni com aumento no número de nódulos, com máxima de 25 nódulos na dose de $2,0 \text{ mg Ni kg}^{-1}$, enquanto a cultivar Xique-xique alcançou apenas 15 nódulos na mesma dose (Figura 1a).

Em relação à massa seca de nódulos, ambas as cultivares, Xique-xique e Tumucumaque, mostram um comportamento bifásico em resposta ao aumento da concentração de Ni (Figura 1b). Na cultivar Xique-xique, observa-se uma redução inicial na massa seca de nódulos com o aumento das doses de Ni, atingindo um mínimo em torno de $1,5 \text{ mg kg}^{-1}$, com aproximadamente 0,03 g por planta. Já a cultivar Tumucumaque apresenta um padrão similar, porém mais acentuado, com uma queda inicial mais pronunciada, seguida por uma recuperação rápida e

significativa acima de $1,5 \text{ mg kg}^{-1}$, alcançando cerca de 0,1 g por planta em concentrações mais altas (Figura 1b).

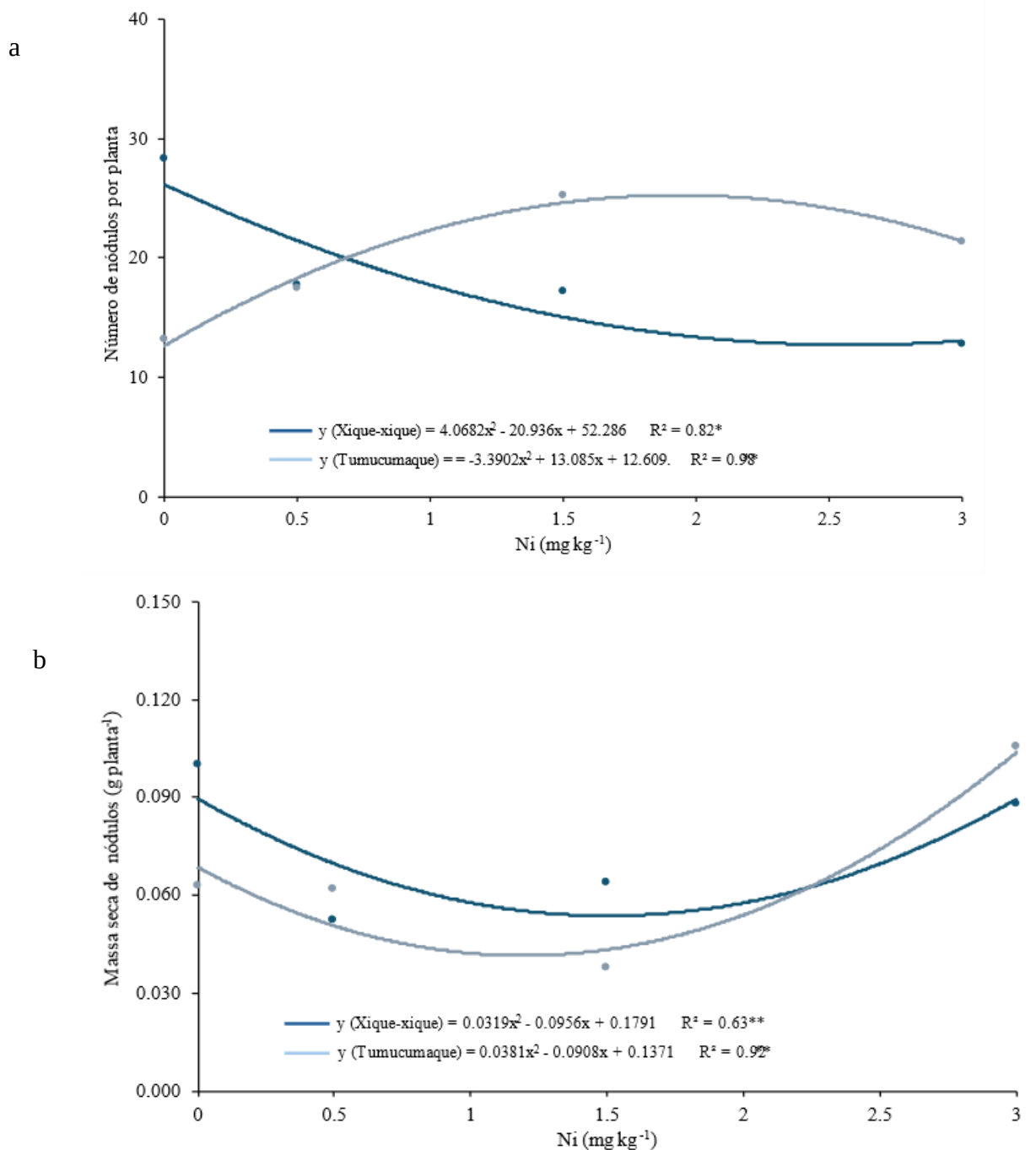


Figura 1. Número nódulos por planta (a) e massa seca de nódulos (b) de cultivares de feijão-caupi em função de doses de Ni. Significativo de acordo com o teste F a $p < 0,05^*$ e $p < 0,01^{**}$.

3.2. Efeito do Ni no crescimento e desenvolvimento inicial do feijão-caupi

A aplicação de Ni apresentou efeito para a altura de planta e massa seca da parte aérea, porém não afetou a massa seca de raiz das plantas de feijão-caupi (Figura 2).

Para a altura das plantas, ambas as cultivares apresentaram respostas quadráticas com a aplicação de doses crescentes de Ni (Figura 2a). A cultivar Tumucumaque apresentou o maior crescimento, alcançando 38,8 cm, na dose de 1,0 mg kg⁻¹ (Figura 2a). Enquanto a cultivar Xique-xique atingiu a altura máxima de 34,5 cm na dose estimada de 1,3 mg kg⁻¹ (Figura 2a).

Em relação à massa seca da parte aérea foi observada uma resposta contrastante entre as cultivares na presença de Ni (Figura 2b). A cultivar Tumucumaque exibiu um aumento consistente da biomassa com o aumento das doses de Ni, alcançando máximo acúmulo de 3,8 g planta⁻¹ na dose de 3,0 mg kg⁻¹ (Figura 2b). Já a cultivar Xique-xique teve redução linear, atingindo mínimos de 1,8 g planta⁻¹ na dose de 3,0 mg Ni kg⁻¹ (Figura 2b).

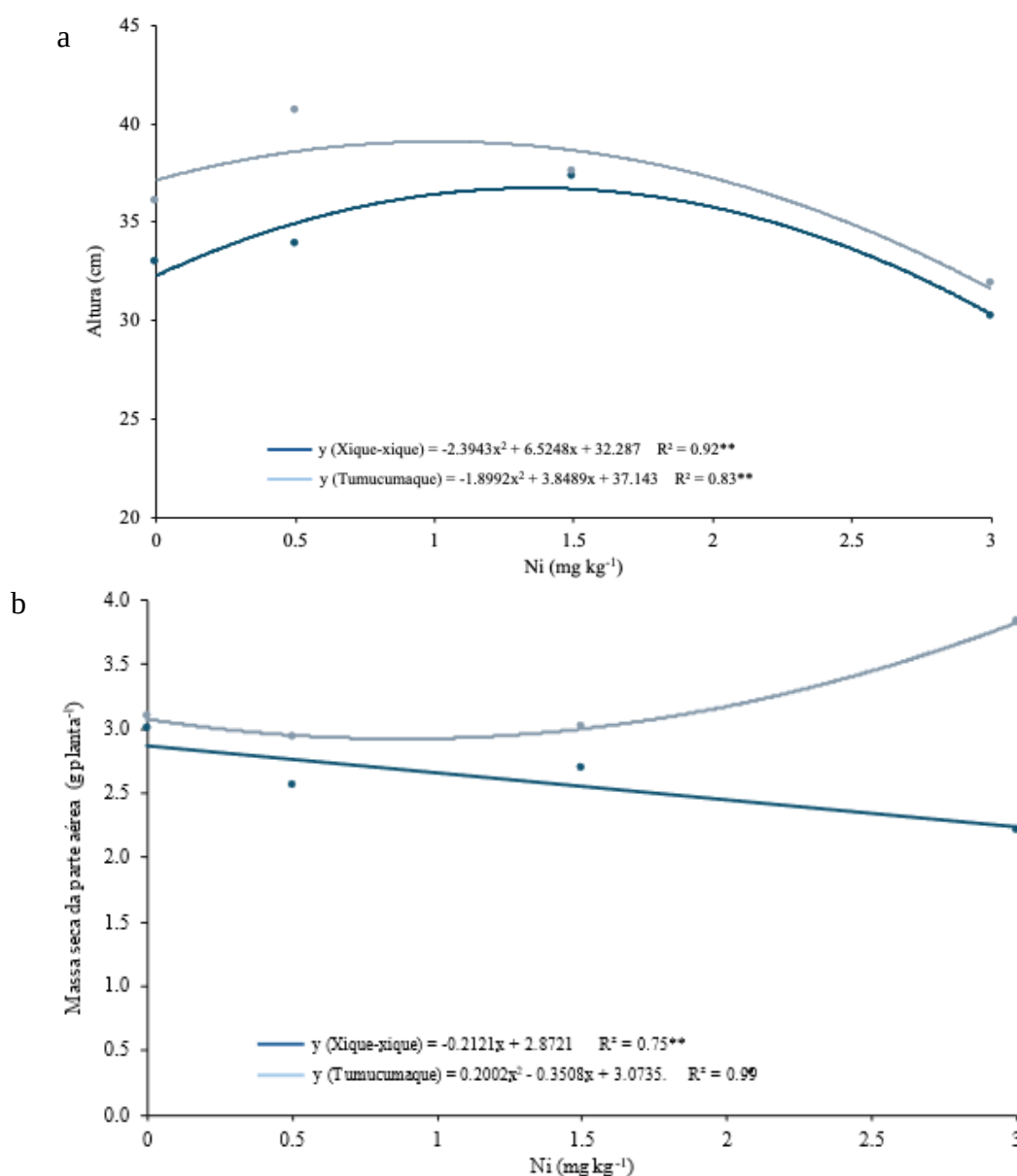


Figura 2. Altura de plantas (a) e massa seca da parte aérea (b) de cultivares de feijão-caupi em função de doses de níquel. Significativo de acordo com o teste *F* a $p < 0,05^*$ e $p < 0,01^{**}$.

4. DISCUSSÃO

O Ni é um micronutriente que está diretamente ligado ao metabolismo do N e a FBN nas leguminosas (RODAK et al. 2024). Nesse contexto, para avaliarmos o efeito do Ni na FBN de cultivares de feijão-caupi, conduzimos um experimento em condições de casa de vegetação com a aplicação de doses crescentes de sulfato de níquel e avaliamos a nodulação e crescimento inicial das plantas (Figura 1e 2).

Na cultivar Tumucumaque a aplicação de Ni (2,0 mg Ni kg⁻¹) aumentou em 92% o número de nódulos por planta em relação ao tratamento controle (0 mg Ni kg⁻¹) (Figura 1a). Estes resultados evidenciam a relevância do Ni na FBN das plantas de feijão-caupi. O Ni, em doses moderadas, melhora a FBN por atuar como cofator da urease e participar da síntese de enzimas ligadas ao metabolismo do N, como a nitrogenase, essencial para o processo de nodulação (RODAK et al., 2024; SHAHZAD et al., 2018). Por outro lado, a redução na nodulação da cultivar Xique-xique com o aumento das doses de Ni pode estar associada à maior sensibilidade dessa cultivar ao excesso de Ni, que pode provocar estresse oxidativo e prejudicar a sinalização entre a planta e os rizóbios (Figura 1a) (RIZWAN et al., 2018).

A massa seca de nódulos é um importante indicador da eficiência da FBN, visto que plantas com uma baixa massa de nódulos pode diminuir em até 25% o acúmulo de nitrogênio (SHIMOIA et al., 2019). O comportamento bifásico observado nas duas cultivares em relação à massa seca de nódulos é típico de uma resposta adaptativa ao Ni (Figura 1b). No caso da cultivar Tumucumaque, a rápida recuperação da massa seca acima de 1,5 mg kg⁻¹ sugere maior tolerância ao estresse inicial e uma eficiência metabólica para utilizar o Ni em concentrações elevadas. Estudos indicam que plantas mais tolerantes conseguem sequestrar Ni em compartimentos celulares específicos, reduzindo sua toxicidade e promovendo maior atividade nodular em doses mais altas (SHAHZAD et al., 2018; ZUFFO et al., 2019). Para a cultivar Xique-xique, a redução inicial e a posterior recuperação podem refletir a ativação de mecanismos de defesa tardios, como a produção de antioxidantes ou alterações na estrutura dos nódulos, permitindo a reativação parcial da FBN em concentrações mais elevadas (RIZWAN et al., 2018; MENDES et al., 2023).

Estudos realizados por Ferreira et al., (2015), corroboram com essa perspectiva, destacando que o uso de Ni em doses mais elevadas afeta negativamente a nodulação, com impactos na produção de biomassa dos nódulos. Esses autores citam que em concentrações superiores a 1 mg dm⁻³, observa-se uma redução na biomassa nodular e na eficiência da FBN, um processo fundamental para o fornecimento de nitrogênio às leguminosas. Essa relação entre a dose de Ni e os efeitos tóxicos nas plantas sublinha a importância de se controlar

adequadamente a aplicação desse micronutriente, para que ele favoreça a nodulação sem comprometer o desenvolvimento da planta.

A aplicação de baixas doses de Ni favoreceu o crescimento vegetal das cultivares de feijão-caupi, com ambas apresentando crescimento máximo em altura até a dose aproximada de $1,3 \text{ mg kg}^{-1}$ de Ni (Figura 2a). O Ni desempenha papel essencial no funcionamento da urease e na facilitação da absorção de outros nutrientes, contribuindo positivamente para o crescimento e o desenvolvimento das plantas (SHAHZAD et al., 2018). Contudo, o acúmulo de biomassa da parte aérea apresentou respostas contrastantes entre as cultivares. Enquanto a cultivar Tumucumaque mostrou aumento na massa seca da parte aérea com o incremento das doses de Ni, a cultivar Xique-xique apresentou tendência oposta, com redução dessa variável (Figura 2b). Esses resultados destacam diferenças genotípicas em relação à tolerância a altas doses de Ni entre as cultivares (Figura 2b). Além disso, a menor fixação e assimilação de N podem estar associadas a essas diferenças, já que a cultivar Xique-xique registrou uma redução considerável no número de nódulos à medida que as doses de Ni aumentaram (Figura 1a).

A maior tolerância da cultivar Tumucumaque a doses elevadas de Ni pode ser explicada por sua eficiência em aproveitar o elemento em processos metabólicos essenciais, como a FBN. O Ni atua como cofator da enzima urease e é indispensável para o metabolismo do nitrogênio, o que favorece a assimilação eficiente desse nutriente e a formação de biomassa. Essa capacidade adaptativa permite que a cultivar suporte concentrações mais altas de Ni sem comprometer seu desenvolvimento, otimizando processos relacionados à nodulação e ao crescimento (TAIZ et al., 2017). Já a redução na biomassa da cultivar Xique-xique sugere maior sensibilidade à toxicidade com o aumento das doses de Ni, uma vez que concentrações elevadas de Ni podem causar estresse oxidativo, prejudicando o metabolismo fotossintético e interferindo na absorção de outros nutrientes, como ferro e manganês (RIZWAN et al., 2018).

Os resultados destacam a relevância do Ni na FBN no feijão-caupi, evidenciando seu papel como elemento essencial em doses moderadas. Na cultivar Tumucumaque, o aumento de 92% no número de nódulos com $2,0 \text{ mg Ni kg}^{-1}$ reforça sua importância para a nodulação eficiente e o metabolismo do N. Por outro lado, o comportamento bifásico observado para a massa seca de nódulos nas cultivares Tumucumaque e Xique-xique reflete adaptações diferenciadas ao Ni, indicando maior tolerância da Tumucumaque a doses elevadas e uma sensibilidade maior da Xique-xique ao estresse por excesso de Ni. Esses achados ressaltam o equilíbrio necessário na aplicação de Ni para otimizar a FBN, maximizando o benefício agrônomo enquanto minimiza efeitos adversos em cultivares sensíveis.

5. CONCLUSÃO

1. A aplicação de Ni na dose de 1,0 mg Ni kg⁻¹ promove maior nodulação da cultivar Tumucumaque, sem reduzir o seu acúmulo de biomassa.
2. A cultivar Xique-xique demonstrou ser mais sensível a toxidez de Ni em comparação a cultivar Tumucumaque.
3. Estes resultados sugerem que o manejo nutricional do Ni pode contribuir para o aumento da eficiência da FBN na cultura do feijão-caupi.

6. REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, A. L. G.; ALCÂNTARA ROSA, M. C. M.; NOBREGA, R. S. A.; LEITE, L. F. C.; SILVA, J. A. L. Produtividade do feijão-caupi cv. BR 17 Gurguéia inoculado com bactérias diazotróficas simbióticas no Piauí. *Revista Brasileira de Ciências Agrárias*, v. 5, n. 3, p. 364-369, 2010.
- BAGYINKA, C. How the [NiFe] hydrogenase enzyme works. *International Journal of Hydrogen Energy*, v. 39, n. 32, p. 18521-18532, 2014.
- BAI, C.; REILLY, C. C.; WOOD, B. W. Nickel deficiency disrupts ureide, amino acid, and organic acid metabolism in young pecan foliage. *Plant Physiology*, v. 140, p. 433-443, 2006.
- BARCELOS, J. P. Q.; REIS, H. P. G.; GODOY, C. V.; GRATÃO, P. L.; FURLANI JUNIOR, E.; PUTTI, F. F.; REIS, A. R. Impacto da aplicação foliar de níquel na atividade da urease, no metabolismo antioxidante e no controle do oídio (*Microsphaera diffusa*) em plantas de soja. *Journal of Plant Nutrition*, 2018.
- BERTON, R. S.; PIRES, A. M. M.; ANDRADE, S. A. L.; ABREU, C. A.; AMBROSANO, E. J.; SILVEIRA, A. P. D. Toxicidade do níquel em plantas de feijão e efeitos sobre a microbiota do solo. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v. 41, p. 1305-1312, 2006.
- BOSSE, M. A.; DA SILVA, M. B.; DE OLIVEIRA, N. G. R. M.; DE ARAUJO, M. A.; RODRIGUES, C.; DE AZEVEDO, J. P.; DOS REIS, A. R. Flavonoid-induced physiological impacts on urease metabolism and nodulation in plants. *Plant Physiology and Biochemistry*, v. 166, p. 512-521, 2021.
- BOSSE, M. A.; MENDES, N. A. C.; VICENTE, E. F.; TEZOTTO, T.; REIS, A. R. The impact of nickel on daidzein biosynthesis, nodulation, biological nitrogen fixation, and seed production in soybean plants. *Elsevier*, 2024.
- BRAZZOLOTTO, D.; GENNARI, M.; QUEYRIAUX, N.; SIMMONS, T. R.; PÉCAUT, J.; DEMESHKO, S.; MEYER, F.; ORIO, M.; ARTERO, V.; DUBOC, C. Nickel-centred proton reduction catalysis in a model of [NiFe] hydrogenase. *Nature Chemistry*, v. 8, p. 1054-1060, 2016.
- CARLIM, E. L.; MEERT, L.; REIS, B.; ERCOLI ALLEMAN, L. Nickel and molybdenum fertilization in soybean: Effects on agronomic characteristics and grain quality. *Terra Latinoamericana*, v. 37, p. 217-222, 2019.

CONAB - Companhia Nacional de Abastecimento. Brasil – Safra 2023/2024. Boletim de dezembro, 2023.

FERREIRA, N. S.; RIOS, R. M.; MELÉM JÚNIOR, N. J.; BORGES, W. L. Fixação biológica de nitrogênio em diferentes genótipos de feijão-caupi. Embrapa Amapá, 2015.

FREITAS, D. S.; RODAK, B. W.; REIS, A., et al. Nickel hidden deficiency. Soil-applied nickel fertilization improves nitrogen metabolism and grain yield in soybean genotypes. *Frontiers in Plant Science*, v. 9, p. 1–16, 2018.

GOSWAMI, S.; SINGH, S. K.; PATRA, A.; DUTTA, A.; MOHAPATRA, K. K. Residual effects of nickel and its interaction with applied zinc and NPK improve growth, yield, and nutritional quality of cowpea. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, v. 22, p. 4262–4272, 2022.

LAVRES, J.; FRANCO, G. C.; DE SOUSA CAMARA, G. M. Nickel seed treatment in soybean enhances biological nitrogen fixation and urease activity. *Frontiers in Environmental Science*, v. 4, p. 1–11, 2016.

MENDES, N. A. C.; CUNHA, M. L. O.; BOSSE, V. M. S.; MORO, A. L.; AGATHOKLEOUS, E.; VICENTE, E. F.; REIS, A. R. Physiological and biochemical role of nickel in nodulation and biological nitrogen fixation in *Vigna unguiculata* L. Walp. *Scientific Reports*, 2023.

RIZWAN, M., et al. Nitric oxide induces rice tolerance to nickel toxicity by regulating nickel uptake, detoxification of reactive oxygen species, and defense-related gene expression. *Chemosphere*, v. 191, p. 23-35, 2018.

RODAK, B. W.; FREITAS, D. S.; ROSSI, M. L.; LINHARES, F. S.; MORO, E.; CAMPOS, C. N. S.; REIS, A. R.; GUILHERME, L. R. G.; LAVRES, J. Nickel application methods to optimize soybean growth. *Scientific Reports*, 2024.

SHAHZAD, B.; TANVEER, M.; REHMAN, A.; CHEEMA, S. A.; FAHAD, S.; REHMAN, S.; SHARMA, A. Nickel: toxic or essential for plants and environment – A review. *Physiology and Biochemistry*, v. 132, p. 641–651, 2018.

SHIMOIA, E. P.; SILVA, C. J.; POSSO, D. A.; AGUALONGO, D. A. P.; AMARANTE, L. Nodulation parameters and root protein content in soybean plants associated with *Bradyrhizobium* and co-inoculated with *Azospirillum*. 5ª Semana Integrada UFPEL, 2019.

SIQUEIRA FREITAS, D.; WURR RODAK, B.; RODRIGUES DOS REIS, A.; DE BARROS REIS, F.; SOARES DE CARVALHO, T.; SCHULZE, J.; GUIMARAES GUILHERME, L. R. Nickel hidden deficiency: Soil-applied nickel fertilization improves nitrogen metabolism and grain yield in soybean. *Frontiers in Plant Science*, v. 9, p. 614, 2018.

SOBRAL, M. C. A.; DA SILVA, W. F. Níquel na agricultura: Uma revisão de literatura. *Revista Agroveterinária, Negócios e Tecnologias*, v. 6, n. 2, p. 50-59, 2021.

TAIZ, L.; ZEIGER, E.; MOLLER, I. M.; MURPHY, A. Nutrição mineral. In: *Fisiologia e desenvolvimento vegetal*. 6. ed. Porto Alegre: Artmed, 2017. p. 858.

WOOD, B. W.; REILLY, C. C.; NYCZEPIR, A. P. Nickel deficiency in field-grown trees: Symptoms and causes. *Acta Horticulturae*, v. 721, p. 83–97, 2006.

ZUFFO, A. M., et al. Nitrogen fertilization in soybeans inhibits nodulation and does not improve initial plant growth. *Revista em Agronegócio e Meio Ambiente*, v. 12, n. 2, p. 333-349, 2019.