

Utilização níquel na cultura da soja

Nickel use in soybean crop

Daniel Fernandes Costa¹; Vanessa Júnia Machado²; Luís Henrique Soares²; Evandro Binotto Fagan²; Marina Rodrigues dos Reis³; Ellen Mayara Alves Cabral³

¹Sagra Agrícola, Patos de Minas-MG. E-mail para contato: daniel.ptm@hotmail.com

²Professores do curso de Agronomia pelo Centro Universitário de Patos de Minas (UNIPAM), Patos de Minas, MG.

³Alunas do curso de Agronomia pelo Centro Universitário de Patos de Minas (UNIPAM), Patos de Minas, MG.

Resumo: A soja [*Glycine max* (L.) Merrill] é uma das culturas mais valiosas do mundo, não apenas por ser oleaginosa e fonte de proteína na alimentação animal, mas também por ser fonte de proteínas para a dieta humana e, recentemente, como utilização de matéria prima para a produção de biodiesel. A pressão por aumentos na produtividade faz com que seja necessário o balanceamento de fornecimento de nutrientes com as necessidades da cultura, para que esta possa expressar o seu potencial produtivo. O níquel, atualmente considerado como elemento essencial para as plantas, tem importante papel na ativação da urease e na fixação simbiótica de nitrogênio, além de proporcionar efeitos indiretos que aumentam a tolerância a doenças. Recentemente, trabalhos têm mostrado que o níquel também é importante para a tolerância a estresses abióticos em plantas. Dessa forma, o micronutriente pode potencializar a produtividade da cultura, no entanto, deve ser fornecido de forma controlada para que seu excesso não provoque toxidez nas plantas, o que pode reduzir a produtividade.

Palavras-chave: Micronutriente. Fixação biológica do nitrogênio. Urease. Estresse. Doenças.

Abstract: Soybean [*Glycine max* (L.) Merrill] is one of the most valuable crops in the world, not only because it is oilseed and protein source in animal feed, but also because it is a source of protein for the human diet and, recently, as use for the production of biodiesel. The pressure for increases in productivity makes it necessary balancing nutrient supply to the needs of the culture, so that it can express its productive potential. Nickel, currently considered an essential element for plants, plays an important role in the activation of urease and symbiotic nitrogen fixation, besides providing indirect effects that increase tolerance to disease. Recently, studies have shown that nickel is also important to abiotic stress tolerance in plants. Thus, this micronutrient may enhance crop yield, however, must be supplied in a controlled manner so that its excess causes no toxicity in plants, which may reduce productivity.

Keywords: Micronutrients. Biological nitrogen fixation. Urease. Stress. Disease.

Introdução

A essencialidade dos elementos químicos às plantas está embasada em três critérios, sendo: (1) o fato desses elementos serem constituintes de um metabólito essencial ou serem requeridos para ação de um processo metabólico; (2) a planta não pode completar seu ciclo de desenvolvimento na ausência do elemento e (3) o elemento não pode ser substituído por outro. Com base nisso, os seguintes elementos minerais são considerados nutrientes de plantas: nitrogênio (N), fósforo (P), enxofre (S), potássio (K), cálcio (Ca), magnésio (Mg), ferro (Fe), manganês (Mn), cobre (Cu), zinco (Zn), molibdênio (Mo), boro (B), cloro (Cl) e níquel (Ni) (MARSCHNER, 2012).

Dessa forma, a agricultura moderna exige o uso de nutrientes em quantidades adequadas, de modo a atender critérios econômicos e, ao mesmo tempo, conservar o solo, possibilitando manter ou elevar a produtividade das culturas. Com o constante aumento do custo de produção, é necessário que se utilizem níveis mínimos de fertilizantes, que permitam boas produtividades e um retorno econômico maior. Se for feito um acompanhamento da fertilidade do solo, com análises periódicas, o produtor de soja poderá encontrar um ponto de equilíbrio dos nutrientes no solo e, com isso, fazer o uso racional de fertilizantes ou, até mesmo, suprimir o seu uso (MALAVOLTA; MORAES, 2007).

O Ni foi o último elemento a ser incluído na lista dos essenciais (BROWN *et al.*, 1987). Assim, já se conhecem alguns aspectos da importância do Ni na ativação enzimática. Sabemos que ele é indispensável para a formação da urease, enzima responsável por desdobrar a ureia em outras formas de N (WITTE, 2011).

Também há evidências de que a aplicação de Ni em soja melhora a fixação biológica de nitrogênio (FBN), a principal forma de obtenção de nitrogênio pela planta. A FBN é o processo pelo qual o nitrogênio da atmosfera (N₂) é captado e convertido por bactérias do gênero *Bradyrhizobium* sp. (que vivem em simbiose com a planta em suas raízes) em compostos nitrogenados assimiláveis pelo vegetal. Em plantações que recebem aplicações de Ni, percebe-se melhor formação de nódulos nas raízes, evidência de maior presença das bactérias ativas para suprir a demanda de nitrogênio da soja (EMERICH *et al.*, 1979; CAMARA, 2014).

Além disso, observações de campo mostram que a aplicação de Ni via folha reduziu a incidência de ferrugem asiática (*Phakopsora pachyrhizi*) em campo de produção de soja. Aliado a isso, tem sido constatado que plantas de soja com menor expressão do gene que codifica a urease apresentaram redução no número de lesões, lesões com pústulas, pústulas e pústulas abertas (WIEBKE-STROHM *et al.*, 2012). Embora os autores não tenham conseguido identificar como isso é regulado, essas informações indicam que a atividade da urease é importante para diminuir a susceptibilidade da soja à ferrugem asiática e que o Ni poderia contribuir nesse processo. No entanto, existem trabalhos que afirmam que a tolerância a patógenos e também a insetos é independente da atividade ureolítica da urease (POSTAL *et al.*, 2012). Em trabalhos realizados por Bai *et al.* (2006) houve redução da produção de metabólitos secundários importantes para a defesa contra doença, embora tal redução tenha ocorrido de forma indireta.

Assim, entender o metabolismo no Ni em plantas e como isso pode contribuir para a potencialização da produtividade das culturas é fundamental para justificar a utilização desse micronutriente na agricultura. Então, o objetivo desta revisão é ressaltar os efeitos do Ni em sistemas de produção de soja.

Níquel no ambiente

O Ni, encontrado em alguns minerais, é um elemento químico, metálico, cuja concentração na superfície terrestre é da ordem de 0,008%. Tem cor branco-prateado, e suas características como ductibilidade, maleabilidade, elevado ponto de fusão, 1453° C, grande resistência mecânica à corrosão e a oxidação atribuem-lhe uma diversidade de usos (ANDRADE; SILVEIRA, 2004).

O Ni é encontrado em minerais sulfuretos, silicatados, arsenetos e oxidados. O teor de Ni no mineral e a concentração desse mineral em uma área bem definida e relativamente pequena na crosta terrestre definem os depósitos minerais que são explorados de acordo com suas reservas, e dessa forma constituem fontes de suprimento das demandas existentes (ANDRADE; SILVEIRA, 2004).

As reservas mundiais de Ni em 2003 foram definidas por depósitos minerais que ocorrem em vários países. Nesse contexto, Austrália, Cuba e Canadá representam 46% do total das reservas mundiais atualmente conhecidas (ALOVISI *et al.*, 2011). No Brasil, as reservas de Ni encontram-se nos estados de Goiás (74,0%), Pará (16,7%), Minas Gerais (5,1%) e Piauí (4,2%) (ALOVISI *et al.*, 2011).

O fator mais importante que determina a distribuição de Ni entre a fase sólida e a solúvel do solo é o pH, sendo a disponibilidade de Ni inversamente relacionada com esse índice (UREN, 1992). Anton (1990), ao trabalhar com dois solos, Latossolo Roxo Distrófico e Terra Roxa Estruturada, verificou que a calagem diminuía o teor de Ni extraível com extrator DTPA e reduzia o efeito tóxico de altas doses nas culturas.

Metabolismo do Ni em plantas

A soja é uma das culturas mais valiosas do mundo, não apenas por ser oleaginosa e fonte de proteína na alimentação animal, mas também por ser fonte de proteínas para a dieta humana e, recentemente, como utilização de matéria prima para a produção de biodiesel. Tal fato gera elevada demanda de soja no mundo, a qual pode ser saciada de duas maneiras: aumentar a área plantada ou aumentar a produtividade. Para aumentar a produtividade com intuito de atingir a demanda futura e compensar o declínio da disponibilidade de terras agricultáveis, há necessidade de mais pesquisas, no sentido de otimizar o recurso genético das plantas para expressar a máxima produtividade, utilizando melhor os recursos minerais. A adequada disponibilidade e a maior eficiência na utilização dos micronutrientes estão entre as condições necessárias para maximizar a produtividade de soja (MASUDA, 2009; ALOVISI, *et al.*, 2011).

Nos últimos anos, a utilização de microelementos tem ganhado bastante destaque na cultura de soja, especialmente o Mo, o Co e o Ni. Tal fato se deve à

importância destes principalmente na FBN, embora possam possuir outras funções na planta (CAMARA, 2014).

O Ni costumava ser classificado como não essencial ou tóxico para as plantas. Presente em grande número de plantas, o Ni foi descrito por Dixon *et al.* (1975) como componente da enzima urease, despertando na comunidade científica o interesse acerca da sua função em plantas. Desde então, diversas pesquisas relatam respostas à fertilização com Ni, principalmente em soluções nutritivas e meio de cultura (cultura de tecido) (KABATA-PENDIAS; PENDIAS, 2001). Eskew *et al.* (1983) verificaram que plantas de soja deficientes em Ni apresentam níveis tóxicos de ureia nas pontas das folhas, ocasionando necrose destas, e isso se deve à diminuição da atividade da urease. Os mesmos autores afirmaram que a falta de Ni exerce influência sobre o crescimento e senescência da planta, no metabolismo do N e na absorção de Fe.

A partir do artigo de Brown *et al.* (1987), o Ni passou a ser tido como um elemento essencial, e, na publicação de Marschner (1995), ele foi incluído na lista dos micronutrientes de plantas. Também, Raven *et al.* (2001) e Taiz e Zeiger (2013) apresentam o Ni como micronutriente.

O Ni tem relação com a FBN, visto que aumenta a atividade da hidrogenase em bacterióides isolados dos nódulos. Algumas bactérias fixadoras de nitrogênio, como o *Rhizobium japonicum*, são capazes de conservar energia, pois a evolução do H₂ pela nitrogenase pode consumir até 40% da energia do nódulo (EMERICH *et al.*, 1979). Essas bactérias codificam hidrogenases, as quais são dependentes de Ni, e oxidam o H₂. Foi demonstrado que baixos níveis de Ni nos solos agrícolas podem limitar a atividade da hidrogenase simbiótica de *Rhizobium leguminosarum* (KLUCAS *et al.*, 1983; URETA *et al.*, 2005).

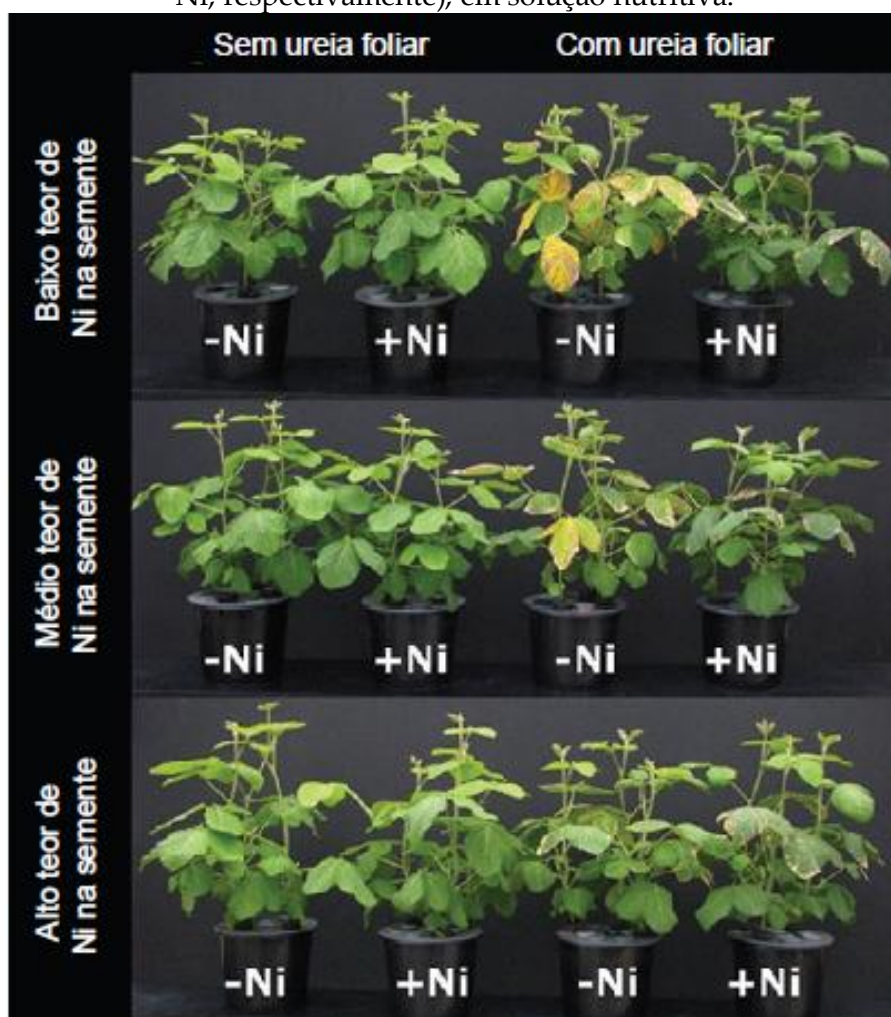
Nas sementes, o Ni apresenta relação direta com a germinação. A arginina é a principal forma de armazenamento de nitrogênio em sementes de soja. Trabalhos mostram que a arginina representa, em média, 17,3% no N total em sementes de soja. A degradação da arginina através da arginase envolve a liberação de ureia e ornitina. A ureia é catalisada pela urease, a qual requer como cofator o Ni (WITTE, 2011). Dessa forma, a utilização de Ni em sementes de soja pode, além de aumentar a eficiência da FBN, proporcionar melhor utilização das reservas contidas nas sementes, potencializando o crescimento inicial das plantas.

Recentemente o Ni tem sido relacionado com a desintoxicação das plantas submetidas a condições de estresse. Isso porque ativa a glioxalase I, necessária para a produção de D-lactato a partir do metilglioxal, metabólito produzido, principalmente, em condições de estresse que pode ser letal para as células (MUSTAFIZ *et al.*; 2014). A produção de metilglioxal incrementa drasticamente em condições de estresse devido ao aumento da produção de espécies reativas de oxigênio, desativando os mecanismos antioxidantes e interferindo com os processos de divisão celular (RAY *et al.*, 1994; MARTINS *et al.*, 2001; MAETA *et al.*, 2005; KALAPOPOS, 2008; FABIANO *et al.*, 2015). Isso sugere que o Ni é importante para a tolerância das plantas em condições de estresses.

Utilização de Ni na soja

Trabalhos realizados por Kutman *et al.* (2012) mostram que o Ni armazenado nas sementes apresenta papel importante no desenvolvimento da soja, pois quando as sementes continham baixo teor de Ni, as plantas apresentaram menor crescimento e foram mais sensíveis aos danos causados pela aplicação de ureia aplicada via folha. Dessa forma, o enriquecimento de sementes com Ni é uma estratégia para aumentar o desenvolvimento das plantas e reduzir o nível de dano causado pela ureia endógena ou por possível suplementação de ureia via folha. Além disso, a aplicação do Ni associado à ureia via folha reduz os danos causados pela ureia, mesmo em sementes com alto teor de Ni (Figura 1). Tais resultados justificam o enriquecimento de sementes, a aplicação de Ni via tratamento de sementes ou via folha para potencializar a produtividade de soja.

Figura 1 - Plantas de soja aos 29 dias cultivadas a partir de sementes com baixo, médio e alto teor de Ni e submetidas a aplicação foliar de ureia e de 0 e 0,2 μ M de Ni (+Ni e -Ni, respectivamente), em solução nutritiva.

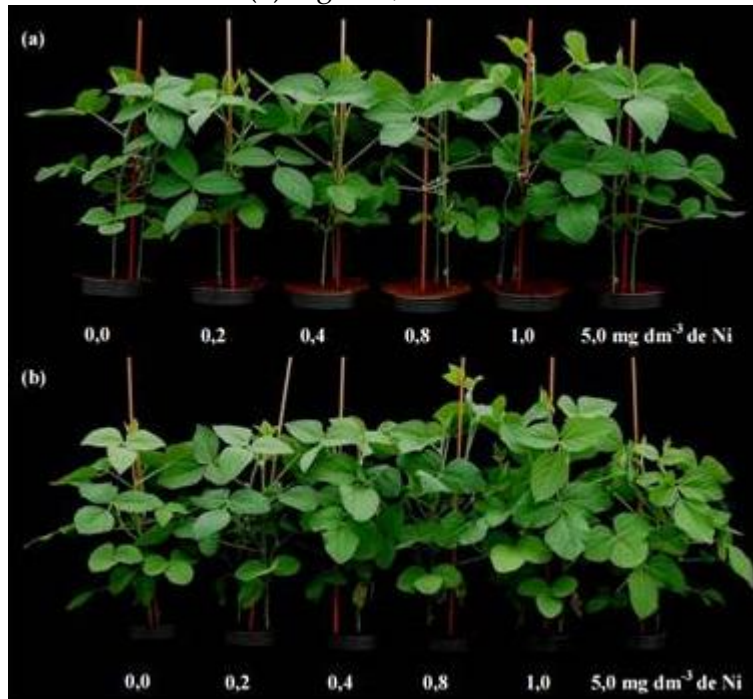


Fonte: Kutman *et al.* (2012).

Franco (2015), trabalhando com tratamento de soja com doses de Ni, concluiu que há aumento na FBN, favorecendo o acúmulo de Ni e N no grão, com aumento da atividade da urease. Segundo o mesmo autor, a aplicação de baixas doses de Ni (45 a 90 mg.kg⁻¹, o que equivale a dose entre 2,5 a 5,0 g.ha⁻¹) via sementes proporciona aumento do acúmulo de nutrientes na planta, incremento na massa seca da parte aérea, da massa seca de nódulos, aumento no teor de clorofila (índice SPAD) e da produção de grãos de soja

Trabalhos realizados por Rodak (2014) mostram que doses de 0,7 e 0,9 mg.dm⁻³ proporcionaram maior acúmulo de massa seca de raízes de soja cultivada em solo franco arenoso e argiloso, respectivamente. Tal comportamento repercutiu em incremento no acúmulo de matéria seca total. No entanto, para o solo argiloso, todas as doses de Ni reduziram o número de vagens, número de grãos e massa de grãos, fato este atribuído ao maior teor de Ni inicial neste solo. Para o solo franco arenoso, as doses de Ni não influenciaram nestes componentes de produtividade. A autora atribui este comportamento ao elevado teor de Ni inicial na semente, o qual era de 0,78 mg.kg⁻¹.

Figura 2 - Plantas de soja no início do florescimento (estádio R₁), cultivadas em solo (a) franco arenoso e (b) argiloso, submetidas a doses de Ni.



Fonte: Rodak (2014).

Esses dados apresentados mostram que a resposta da soja ao Ni é muito dependente da concentração de Ni nas sementes e do teor de Ni no solo cultivado. Dessa forma, antes da aplicação do Ni, deve ser realizada avaliação do Ni inicial, para determinar o potencial de resposta do determinado sistema de produção.

Os teores foliares de Ni na soja cultivada em Bela Vista-MS responderam positivamente à aplicação de Ni foliar, indicando que a concentração desse nutriente

na planta depende do fornecimento (ALOVISI *et al.*, 2011). Esses pesquisadores forneceram 132 g ha⁻¹ de Ni via folha, o que aumentou o teor de Ni foliar para 8,3 mg.kg⁻¹, comparado a 0,1 mg.kg⁻¹ do tratamento não aplicado, indicando assim que a correção de deficiência pode ser conseguida facilmente com a aplicação suplementar às folhas. No entanto, neste ensaio não foi verificado efeito na produtividade da cultura.

Ni e doenças de plantas

Existem relatos na literatura sobre o efeito no Ni na incidência de doenças (WOOD; REILLY, 2007). No campo, observações mostram que a aplicação de Ni reduz a severidade da ferrugem asiática em soja. Aliado a isso, tem sido mostrado que a aplicação de Ni pode induzir a produção de fitoalexinas, as quais protegem as plantas contra patógenos (WOOD; REILLY, 2007). Trabalhos realizados por Bai *et al.* (2006) mostram que a deficiência de Ni reduz a atividade da acetil CoA sintase, o que causa redução na produção de compostos do metabolismo secundário. Além disso, tem sido especulado que o elevado acúmulo de metais, como o Ni, em plantas é uma estratégia para aumentar a tolerância a insetos e patógenos (FONES; PRISTON, 2013).

Trabalhos realizados por Bruce Wood nos Estados Unidos mostram que a aplicação de Ni promove resistência contra o fungo *Fusicladosporium caryigenum*, causador da ferrugem em pecã (*Carya illinoensis*), além de corrigir os sintomas de orelha-de-rato, característicos da deficiência de Ni (REIS *et al.*, 2014) (Figura 3).

Figura 3 - Efeito da concentração de Ni na incidência de ferrugem em pecã (*Fusicladosporium caryigenum*).

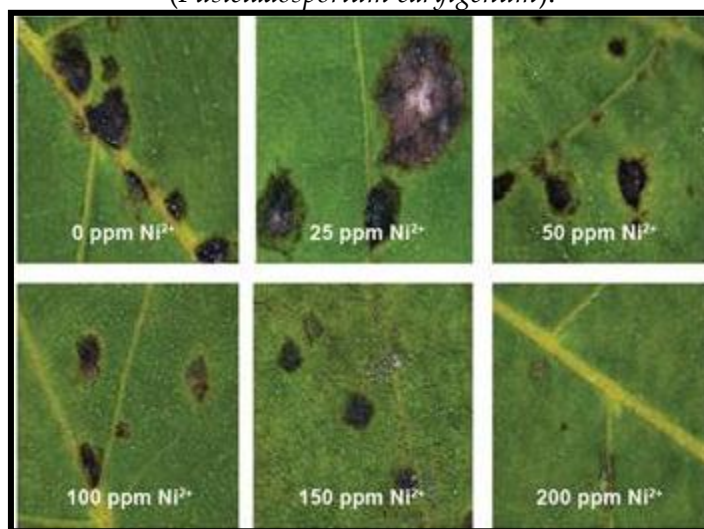


Foto de Bruce Wood.

Fonte: Reis *et al.* (2014).

Em plantas com menor expressão do gene que codifica a urease foi observada redução no número de lesões, lesões com pústulas, pústulas e pústulas abertas (WIEBKE-STROHM *et al.*, 2012). Aliado a isso, genótipos de *Glycine tomentella* infectadas com ferrugem asiática apresentaram alteração na expressão da UreG (proteína acessória da urease) e da glutamina sintase, as quais estão envolvidas no

metabolismo da ureia em plantas (PANTHEE *et al.* 2009; SORIA-GUERRA *et al.* 2010). Além disso, a liberação de amônia (NH₃) pela urease pode contribuir pela menor severidade dos patógenos devido à toxicidade da NH₃ (CARLINI; POLACCO 2008). Essas informações sugerem que a atividade da urease é importante para a tolerância das plantas a doenças e que o Ni poderia contribuir nesse processo.

No entanto, o efeito tóxico da urease em patógenos e pragas persistiu mesmo depois da inibição irreversível da atividade ureolítica da enzima, demonstrando que outros efeitos além da atividade ureolítica estão envolvidos no papel da urease em tolerância a estresses bióticos (PANTHEE *et al.* 2009; SORIA-GUERRA *et al.* 2010). A canotoxina, uma isoforma da urease identificada em sementes de *Canavalia ensiformis* (feijão-de-porco), produz peptídeos que causam toxidez a insetos e patógenos. Estes apresentam entomotoxicidade a *Rhodnius prolixus* (barbeiro), *Callosobruchus maculatus* (caruncho-de-feijão), *Nezara viridula* (percevejo verde) e *Dysdercus peruvianus* (percevejo manchador do algodão) (CARLINI *et al.*, 1997; CARLINI; GROSSI-DE-SÁ, 2002; STANISÇUASKI *et al.*, 2005) e fungitoxicidade a *Mucor sp.*, *Rhizoctonia solani* e *Penicillium herguei* (POSTAL *et al.*, 2012).

Toxidez e deficiência de Ni

A fitotoxicidade do Ni é resultado de sua ação no fotossistema, causando distúrbios no ciclo de Calvin e inibição do transporte elétrico por causa das quantidades excessivas de ATP e NADPH acumuladas pela ineficiência das reações de escuro (KRUPA *et al.*, 1993). Além disso, o Ni, quando em altas concentrações no meio, pode inibir a absorção de micronutrientes metálicos, como Fe, Mn, Zn e Cu, o que causa deficiências dos mesmos.

No entanto, uma leve redução na absorção de Fe poderia proporcionar menor produção de etileno, responsável pela senescência, visto que o Fe desempenha papel na via de produção de tal hormônio. Aliado a isso, o Ni pode inibir a atividade da enzima ácido 1-carboxílico-1-amino ciclopropano oxidase (ACC oxidase) (LAU; YANG, 1976) e, dessa forma, reduzir a síntese de etileno. Dessa forma, a redução da produção de etileno poderia reduzir a senescência das folhas, mantendo estas verdes por maior período de tempo, ou seja, mantendo a produção de energia durante o enchimento dos grãos, período fundamental para determinação da massa dos grãos e da produtividade de soja.

Segundo Barton *et al.* (2006), os sintomas de toxidez de Ni não estão bem definidos para os estádios iniciais de toxicidade, porém nos estádios moderados e agudos, a toxidez produz clorose, geralmente semelhante aos sintomas de deficiência de Fe. Nas dicotiledôneas, aparecem manchas cloróticas entre as nervuras das folhas, semelhantes aos sintomas de deficiência de Mn (MALAVOLTA; MORAES, 2007; RODAK, 2014) (Figura 4). Tal efeito ocorre devido ao fato de que estes micronutrientes são absorvidos pelo mesmo transportador, denominado *IRT1* (*iron related transporter 1*) (VERT, 2002). Dessa forma, quando algum deste apresenta elevada concentração, há redução na absorção dos demais, o que justifica a necessidade de aplicação balanceada de Ni.

Figura 4 - Sintomas da toxidez de Ni em soja cultivada em solo argiloso submetido à aplicação de $5,0 \text{ mg.dm}^{-3}$.



Fonte: Rodak (2014).

Liu e Wang (1993) estudaram a fitotoxicidade de Ni em arroz (*Oryza sativa* L.) e milho (*Zea mays* L.) e concluíram que houve redução de produção com as doses de Ni entre 14 e 403 mg.kg^{-1} de solo, sendo este efeito mais acentuado para o milho. Piccini e Malavolta (1992) avaliaram a toxidez de Ni em diferentes cultivares de feijão (*Phaseolus vulgaris* L.), utilizando solução nutritiva. A produção de feijão foi inversamente proporcional à concentração de Ni na solução. Na dose máxima, 4 mg.L^{-1} de Ni em solução, as cultivares não produziram sementes. Os mesmos autores observaram queda na produtividade de arroz e feijão cultivados em vasos, quando a dose de Ni estava acima de 30 mg.kg^{-1} .

Foi relatada por Alovisei *et al.* (2011) pequena toxidez por Ni quando utilizado doses acima de 44 g ha^{-1} , embora não tenham apresentado efeito visual, sendo detectada por análise foliar. Segundo pesquisa realizada por Berton *et al.* (2006), a aplicação de 210 mg.kg^{-1} de Ni na forma de $\text{NiSO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ é letal para plantas de feijão, quando semeado poucos dias depois da adição desse elemento ao solo, independentemente da elevação ou não da saturação por bases para 70% da CTC.

O sintoma característico da deficiência de Ni é a redução do tamanho da folha e abortamento da ponta das folhas ou dos folíolos, sendo que a intensidade do abortamento da ponta dos folíolos ou folhas é dependente do nível de deficiência. Normalmente, o ápice foliar apresenta forma obtusa (WOOD *et al.*, 2006) (Figura 5).

Figura 5 - Sintomas de deficiência de Ni em pecã (*Carya illinoensis*) cultivada em condições de campo, popularmente como orelha-de-rato.



Fonte: Wood *et al.* (2006).

Considerações finais

A soja é um dos símbolos da exploração agrícola do Cerrado e, por isso, tem sido intensamente estudada. Os conhecimentos da nutrição mineral e da adubação da cultura vêm sendo aprimorados a cada dia. Tendo em vista a necessidade de maior produção de grãos por área agricultável nos dias de hoje e ainda a necessidade de maior rentabilidade por área, a utilização do Ni pode resultar no aumento na produtividade, podendo ser alternativa para fortalecer a atividade agrícola. Atualmente, sabemos que o Ni potencializa a fixação biológica, além de ser essencial para a atividade da urease, sendo que estas funções justificam a sua utilização para maximizar a eficiência de utilização do N. Além disso, outros trabalhos mostram papel do Ni na tolerância a patógenos e estresses ambientais. Dessa forma, novos estudos devem ser realizados para elucidar como este micronutriente poderia contribuir no aumento da tolerância a estresses bióticos e abióticos nos sistemas de produção.

Referências

- ALOVISI, A.M.T.; MAGRI, J.; DUTRA, J.E.; MAGRI, E.; SANTOS, M.J.G.; ALOSIVI, A.A. Adubação foliar com sulfato de níquel na cultura da soja. *Ensaio e Ciência: Ciências Biológicas, Agrárias e da Saúde*. v. 15, n. 2, p. 25-32, 2011.
- ANDRADE, S.A.L.; SILVEIRA, A.P.D. Biomassa e atividades microbianas do solo sob influência de chumbo e da rizosfera da soja micorrizada. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v. 39, p. 1191-1198, 2004.
- ANTON, D.F.P. *Toxidez do níquel em arroz e feijão*. 1990. 144p. Tese (Doutorado) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1990.
- BAI, C.; REILLY, C.C.; WOOD, B. W. Nickel deficiency disrupts metabolism of ureides, amino acids, and organic acids of young pecan foliage. *Plant Physiology*, v. 140, p. 433-443, 2006.

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*, Brasília, v. 41, n. 8, p.1305-1312, 2006.

BROWN, P.H.; WELCH, R.M.; CARY, E.E. Nickel: a micronutrient essential for higher plants. *Plant Physiology*. Rockville, v. 85, p. 801–803, 1987.

CÂMARA, G.M.S. Fixação biológica do nitrogênio em soja. *Informações Agronômicas*, n. 147, p. 1-9, 2014.

CARLINI, C.R.; GROSSI-DE-SÁ, M.F. Plant toxic proteins with insecticidal properties. A review on their potentialities as bioinsecticides. *Toxicon*, v. 40, p. 1515–1539, 2002.

CARLINI, C.R.; OLIVEIRA, A.E.; AZAMBUJA, P.; XAVIER-FILHO, J.; WELLS, M.A. Biological effects of canatoxin in different insect models. Evidence for a proteolytic activation of the toxin by insect cathepsin-like enzymes. *Journal of Economic Entomology*, v. 90, p. 340–348, 1997.

CARLINI, C.R.; POLACCO, J.C. Toxic properties of urease. *Crop Science*, v. 48, p. 1665–1672, 2008.

DIXON, N.E.; GAZZOLA, C.; BLAKELEY, R.L.; ZERNER, B. Jack bean urease (EC 3.5.1.5). A metalloenzyme. A simple biological role for nickel. *Journal of The American Chemistry Society*, v. 97, :p. 4131-4133, 1975.

EMERICH, D.W.; RUIZ-ARGÜESO, T.; CHING, T.M.; EVANS, H.J. Hydrogen-dependent nitrogenase activity and ATP formation in *Rhizobium japonicum* bacteroids. *Journal of Bacteriology*, v. 137, p. 153-160, 1979.

ESKEW, D.L.; WELCH, R.M.; CARY, E.E. Nickel: An essential micronutrient for legumes and possibly all higher plants. *Science*, v. 222, p. 621-623, 1983.

FABIANO, C.C.; TEZOTTO, T.; FAVARIN, J.L.; POLACCO, J.C.; MAZZAFERA, P. Essentiality on nickel in plants: a role in plant stresses. *Fontiers in Plant Science*, v. 6, p. 1-4, 2015.

FONTES, H.; PRESTON, G.M. The impact of transition metal on bacterial plant disease. *FEMS Microbiology Reviews*, v. 37, p. 495-519, 2013.

FRANCO, G.C. *Tratamento de sementes de soja com níquel para o aumento da fixação biológica e atividade da urease*. 2015. Dissertação (Mestrado em Energia Nuclear na Agricultura e no Ambiente) – Centro de Energia Nuclear na Agricultura, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2015. Disponível em:

<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/64/64134/tde-19052015-143424/>> Acesso em: 23 de novembro de 2015.

KABATA-PENDIAS, A.; PENDIAS, H. *Trace elements in soils and plants*. 3. ed. Boca Raton, CRC Press, 2001. 413p.

KLUCAS, R.V.; HANUS, F.J.; RUSSELL, S.A.; EVANS, H.J. Nickel: a micronutrient element for hydrogen-dependent growth of *Rhizobium japonicum* and for expression of urease activity in soybean leaves. *Proceeding of the National Academy of Sciences of the United States of America*, v. 80, n. 8, p. 2253-2257, 1983.

KRUPA, Z.; SIEDLECKA, A.; MAKSYMIEC, W.; BASZYŃSKI, T. In vivo response of photosynthetic apparatus of *Phaseolus vulgaris* L. to nickel toxicity. *Journal of Plant Physiology*, v. 142, p. 664-668, 1993.

KUTMAN, B.Y.; KUTMAN, U.B.; ÇAKMAK, I. Nickel-enriched seed and externally supplied nickel improve growth and alleviate foliar urea damage in soybean. *Plant and Soil*, v. 1007, p. 1-15, 2012.

LAU, O-L.; YANG, S.F. Inhibition of ethylene production by cobaltous ion. *Plant Physiology*, Rockville, v. 58, p. 144-117, 1976.

LIU, C.L.; WANG, Y.P. Effect of nickel contamination in different soils on the growth of crops. *Journal of the Chinese Agricultural Chemical Society*, v. 31, p. 172-182, 1993.

MAETA, K.; IZAWA, S.; INOUE, Y. Methylglyoxal, a metabolite derived from glycolysis, functions as a signal initiator of the high osmolarity glycerol-mitogen-activated protein kinase cascade and calcineurin/Crz1-mediated pathway in *Saccharomyces cerevisiae*. *The Journal of Biological Chemistry*. v. 280, p. 253-260, 2005.

MALAVOLTA; E.; MORAES, F.M. Níquel: de tóxico a essencial. *Informações Agronômicas*, n. 118, p. 1-3, 2017.

MARSCHNER, H. *Mineral nutrition of higher plants*. 2nded. London, Academic Press, 1995. 889 p.

MARSCHNER, P. *Mineral nutrition of higher plants*. 3rd ed. Amsterdam: Elsevier, 2012. 643 p.

MARTINS, A.M.; CORDEIRO, C.A.; PONCES-FREIRE, A.M. In situ analysis of methylglyoxal metabolism in *Saccharomyces cerevisiae*. *FEBS Letters*, n. 499, p. 41-44, 2001.

MASUDA, T. *Produção mundial*. Rondonópolis : Fundação MT, 2009. 42p. (Fundação MT. Boletim de Pesquisa de Soja, 13).

MUSTAFIZ, A.; GHOSH, A.; TRIPATHI, A.K.; KAUR, C.; GANGULY, A.K.; BHAVESH, N. S.; TRIPATHI, J.K.; PAREEK, S.; SOPORY, S.K.; SINGLA-PAREEK, S.L. A unique Ni²⁺-dependent and methylglyoxal-inducible rice glyoxalase I possesses a single active site and functions in abiotic stress response. *Plant Journal*, v. 78, p. 951–963, 2014.

PANTHEE, D.R.; MAROIS, J.J.; WRIGHT, D.L.; NARVAEZ, D.; YUAN, J.S.; STEWART JUNIOR, C.N. Differential expression of genes in soybean in response to the causal agent of Asian soybean rust (*Phakopsora pachyrhizi* Sydow) is soybean growth stage-specific. *Theoretical and Applied Genetics*, v. 118, p. 359–370, 2009.

PICCINI, D.F.; MALAVOLTA, E. Effect of nickel on two common bean cultivars. *Journal of Plant Nutrition*, v. 15, p. 2343-2350, 1992.

POSTAL, M.; MARTINELLI, A.H.S.; BECKER-RITT, A.B.; LIGABUE-BRAUN, R.; DEMARTINI, D.R.; RIBEIRO, S.F.F.; PASQUALI, G.; GOMES, V.M.; CARLINI, C.R. Antifungal properties of *Canavalia ensiformis* urease and derived peptides. *Peptides*, v. 38, n. 1, p. 22-33, 2012.

RAVEN, P.D.; EVERT, R.F.; EICHHORN, S.E. *Biologia vegetal*. 6. ed. Rio de Janeiro, Guanabara Koogan, 2001. 906p.

RAY, S.; DUTTA, S.; HALDER, J.; RAY, M. Inhibition of electron flow through complex I of the mitochondrial respiratory chain of Ehrlich ascites carcinoma cells by methylglyoxal. *Biochemical Journal*, v. 303 (Pt1), p. 69–72, 1994.

REIS, A.R.; RODAK, B.W.; PUTTI, F.F.; MORAES, M.F. Papel fisiológico do níquel: essencialidade e toxicidade em plantas. *Informações Agronômicas*, n. 147, p. 10-24, 2014.

RODAK, B.W. *Níquel em solos na cultura de soja*. 2014, 100p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2014.

SORIA-GUERRA, R.E.; ROSALES-MENDOZA, S.; CHANG, S.; HAUDENSHIELD, J.S.; PADMANABAN, A.; RODRIGUEZ-ZAS, S.; HARTMAN, G.L.; GHABRIAL, S.A.; KORBAN, S.S. Transcriptome analysis of resistant and susceptible genotypes of *Glycine tomentella* during *Phakopsora pachyrhizi* infection reveals novel rust resistance genes. *Theoretical and Applied Genetics*, v. 120, p. 1315–1333, 2010.

STANISÇUASKI, F.; FERREIRA-DA-SILVA, C.T.; MULINARI, F.; PIRES-ALVES, M.; CARLINI, C.R. Insecticidal effects of canatoxin on the cotton stainer bug *Dysdercus peruvianus* (Hemiptera: Pyrrhocoridae). *Toxicon*, v. 45, p. 753–760, 2005.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. *Fisiologia vegetal*. 5. ed. Porto Alegre, Artmed, 2013. 918p.

UREN, N.C. Forms, reaction and availability of nickel in soils. *Advances in Agronomy*, v.48, p.141-203, 1992.

URETA, A.C.; IMPERIAL, J. RUIZ-ARGÜESO, T.; PALACIOS, J.M. *Rhizobium leguminosarum* biovar viciae symbiotic hydrogenase activity and processing are limited by the level of nickel in agricultural soils. *Applied and Environmental Microbiology*, v. 71, p. 7603-7606, 2005.

VERT, G.; GROTZ, N.; DÉDALDÉCHAMP, F.; GAYMARD, F.; GUERINOT, M.L.; BRIAT, J.F.; CURIE, C. IRT1, an Arabidopsis transporter essential for iron uptake from the soil and for plant growth. *Plant and Cell*, v. 4, n. 6, p. 1223-1233, 2002.

WIEBKE-STROHM, B.; PASQUALI, G.; MARGIS-PINHEIRO, M.; BENCKE, M.; BÜCKER-NETO, L.; BECKER-RITT, A.B.; MARTINELLI, A.H.S; RECHENMACHER, C.; POLACCO, J.C.; STOLF, R.; MARCELINO, F.C.; ABDELNOOR, R.V.; HOMRICH, M.S.; Del PONTE, E.M.; CARLINI, C.R.; CARVALHO, M.C.C.G.; BODANESE-ZANETTINI, M.H.C. Ubiquitous urease affects soybean susceptibility to fungi. *Plant Molecular Biology*, v.79, p.75-87, 2012.

WITTE, C-P. Urea metabolism in plants. *Plant Science*, Cambridge, v. 180, p. 431-438, 2011.

WOOD, B.W.; REILLY, C.C. Nickel and plant disease. In: DATNOFF, L.E.; ELMER, W.H.; HUBER, D.M. (Ed.). *Mineral nutrition and plant disease*. The American Phytopathological Society, 2007. p. 215-231.

WOOD, B.W.; REILLY, C.C.; NYCZEPIR, A.P. Field deficiency on nickel in tress: symptoms and causes. *Acta Horticulturae*, v. 721, p. 83-97, 2006.