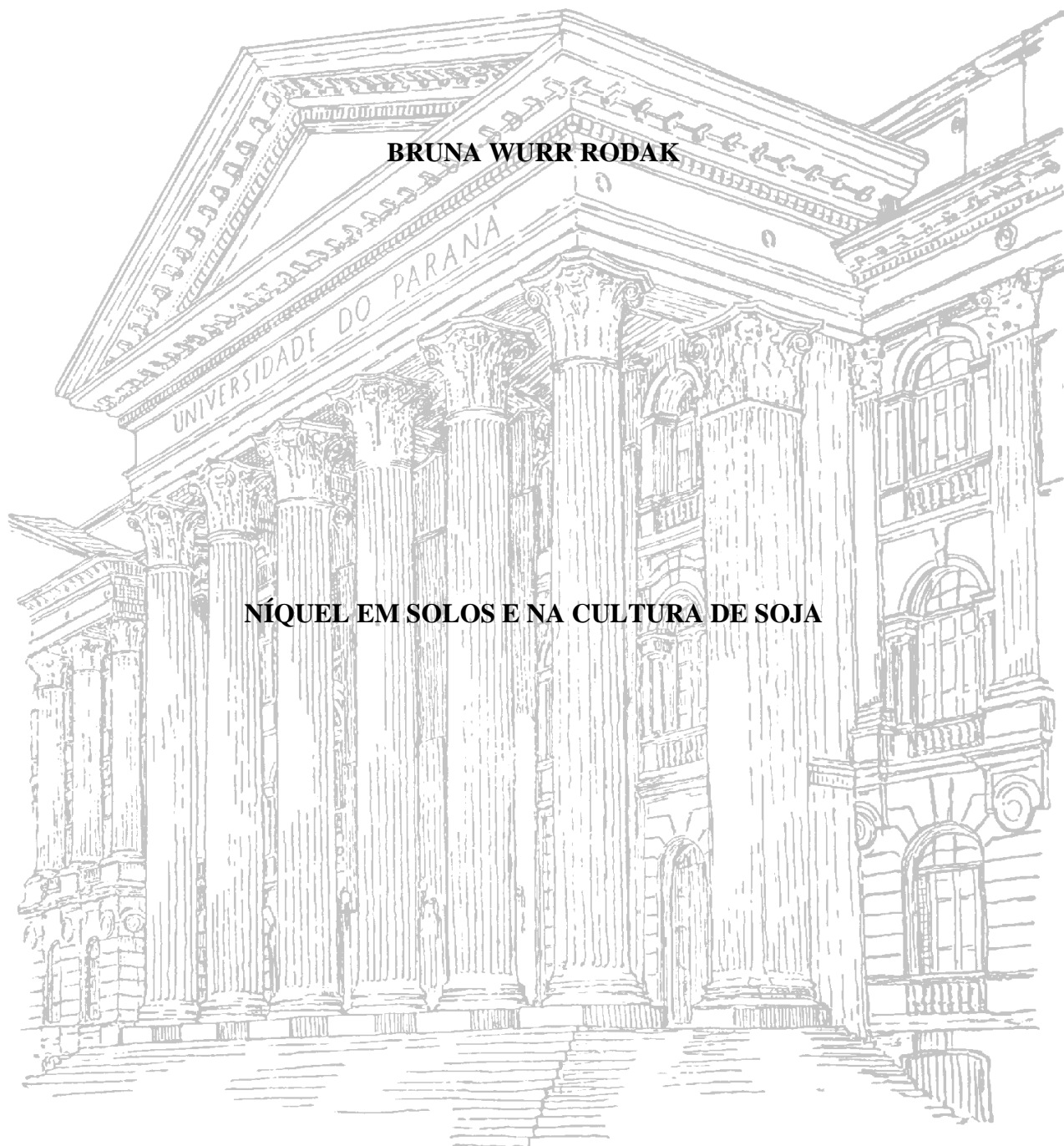


UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
SETOR DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA DO SOLO

BRUNA WURR RODAK



NÍQUEL EM SOLOS E NA CULTURA DE SOJA

CURITIBA

2014

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
SETOR DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA DO SOLO

BRUNA WURR RODAK

NÍQUEL EM SOLOS E NA CULTURA DE SOJA

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Área de Concentração Solo e Ambiente, Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Ciência do Solo.

Orientador: Prof. Dr. Milton Ferreira de Moraes
Co-orientador: Dr. Adilson de Oliveira Junior
Co-orientador: Dr. Cesar de Castro
Co-orientador: Prof. Dr. Volnei Pauletti

CURITIBA

2014



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
SETOR DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA DO SOLO
Mestrado e Doutorado



PARECER

A Banca Examinadora designada para avaliar a defesa da Dissertação de Mestrado de **BRUNA WURR RODAK**, intitulada: **Níquel em Solos e na Cultura de Soja**, do Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo do Setor de Ciências Agrárias da Universidade Federal do Paraná, após análise do texto e arguição do candidato, emitem parecer pela **“APROVAÇÃO”** da referida Dissertação. O candidato atende assim um dos requisitos para a obtenção do título de **Mestre em Ciência do Solo - Área de Concentração Solo e Ambiente**.

Secretaria do Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, em Curitiba, 20 de fevereiro de 2014.

Prof. Dr. Milton Ferreira de Moraes, Presidente

Dr. Adilson de Oliveira Junior, Iº. Examinador

Prof. Dr. Volnei Pauletti, IIº. Examinador

Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo – SCA – UFPR
Rua dos Funcionários, 1540 - Bairro Cabral
80035-050 - Curitiba - PR - Fone/Fax: (41) 3350-5648
pgcisolo@ufpr.br | www.pgcisolo.agrarias.ufpr.br



A minha mãe, Jacinta, pelo amor incondicional.
Sem você eu nada seria...

DEDICO

AGRADECIMENTOS

A Deus.

Ao Prof. Milton, meu orientador, pela maneira sabia e gentil como conduziu esse estudo, me possibilitando aprender tanto! Dois anos que serão para sempre lembrados com muito carinho!

A Universidade Federal do Paraná (UFPR), a todos os funcionários e professores do Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, em especial ao Prof. Dr. Volnei pela co-orientação e a Prof.^a Dr.^a Alessandra pela ajuda com a análise estatística.

A Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela concessão da bolsa de estudos.

A Minerais do Paraná S. A. (MINEROPAR), em especial ao Dr. Otavio pela disposição em colaborar sempre.

A Universidade Federal de Lavras (UFLA), na pessoa do Prof. Dr. Luiz Roberto pelo fornecimento das amostras de referência certificadas de solo e tecido vegetal.

A Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária / Centro Nacional de Pesquisa de Soja (EMBRAPA SOJA), especialmente ao Dr. Adilson e Dr. Cesar por toda a ajuda durante o mestrado, paciência e ensinamentos.

A galera do 'Lab', Joviano e Mariana pela paciência, por compartilharem seu conhecimento e me ensinarem tanto! 'Marianex', se não fosse Kerouac a epígrafe perfeita seria "*Não prenda a respiração, você para de pensar quando para de respirar... Respire*". A química 'Jubs' (por tudo em todos os momentos do mestrado!), a menininha Smaylla (por tornar as tardes mais divertidas!), 'Meylinzuca', Carlos, Amanda, Jhessica, Regina, Bruna, Ana, Lucas e Renan. Ao Zucca pela ajuda na coleta de solo e pela disposição sempre. A galera do 'anexo' Donizete, Mariluci e Esmael. A Larissa pelos artigos que surgiam espontaneamente na minha mochila, pelas longas conversas e risadas, incluindo as do skype nos momentos intempestuosos, enfim, pela gentileza e apoio sempre!

A Mariana, por tudo, por resolver tantos problemas, pelas risadas, pela amizade, você realmente merece um paragrafo único e exclusivo!

Ao amigo João minha grande parceria de mestrado! A galera da pós Leticia, Murilo, Maico, Giovana, Eliza, Joyce, Marilia, Reinaldo, Gilson, Caio, Steve e Wilson, em especial a 'Querubinzinha' e 'Rose' (sem palavras pra vocês duas!).

Aos outros ‘do começo’, mesmo distantes presentes, ‘Marianinha’, ‘Iresnoka’ e Prof.^a Aline.

Ao ‘NandOOO’, pela convivência no ‘apê 23’ e por tantos bons momentos!

A minha família, meus tios Lucia, padrinho ‘Chico’, ‘Carola’, Jorge, Laura e Fernando, aos primos ‘Aly’ e Flávio. Em especial a minha mãe Jacinta, por tudo, todos deveriam ter uma mãe assim como você!

E a todos que de alguma forma contribuíram para realização deste projeto.

Muito obrigada!

"Mas nesta época eles dançavam pelas ruas como piões frenéticos e eu me arrastava na mesma direção como tenho feito toda minha vida, sempre atrás de pessoas que me interessam, porque, para mim, pessoas mesmo são os loucos, os que estão loucos para viver, loucos para falar, loucos para serem salvos, que querem tudo ao mesmo tempo, aqueles que nunca bocejam e jamais falam chavões, mas queimam, queimam, queimam, como fabulosos fogos de artifício explodindo como constelações em cujo centro fervilhante – pop! – pode-se ver um brilho azul intenso até que todos caíam no aaaaaaah!"

(Jack Kerouac em "On the Road")

SUMÁRIO

RESUMO GERAL	X
GENERAL ABSTRACT.....	XII
INTRODUÇÃO GERAL	1
LITERATURA CITADA.....	4
1 CAPÍTULO I - AVALIAÇÃO DA DISPONIBILIDADE DE NÍQUEL EM SOLOS AGRÍCOLAS E NATURAIS	7
RESUMO.....	7
ABSTRACT	8
1.1 INTRODUÇÃO	9
1.2 MATERIAL E MÉTODOS	10
1.2.1 LOCAL	10
1.2.2 CARACTERIZAÇÃO DOS SOLOS.....	10
1.2.3 VARIÁVEIS ANÁLISADAS.....	10
1.2.3.1 Disponibilidade de Ni em Mehlich-1	12
1.2.3.2 Disponibilidade de Ni em DTPA	12
1.2.3 DELINEAMENTO EXPERIMENTAL E ANÁLISE ESTATÍSTICA.....	13
1.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO	13
1.4 CONCLUSÕES.....	23
1.5 AGRADECIMENTOS	23
1.6 LITERATURA CITADA.....	23
2 CAPÍTULO II - NÍQUEL NA SOJA CULTIVADA EM SOLOS DE CLASSES TEXTURAIS CONTRASTANTES SOB CONDIÇÕES CONTROLADAS.....	29
RESUMO.....	29
ABSTRACT	30
2.1 INTRODUÇÃO.....	31
2.2 MATERIAL E MÉTODOS.....	32
2.2.1 LOCAL	32
2.2.2 CARACTERIZAÇÃO DOS SOLOS.....	32
2.2.3 DELINEAMENTO EXPERIMENTAL E TRATAMENTOS	33
2.2.4 DESENVOLVIMENTO EXPERIMENTAL E MANEJO.....	33
2.2.5 VARIÁVEIS ANÁLISADAS.....	34

2.2.5.1 Determinação da atividade da enzima nitrato redutase	35
2.2.5.2 Determinação da atividade da enzima urease.....	35
2.2.5.3 Análises dos solos e do tecido vegetal.....	36
2.2.6 ANÁLISE ESTATÍSTICA	37
2.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	37
2.4 CONCLUSÕES.....	55
2.5 AGRADECIMENTOS	56
2.6 LITERATURA CITADA.....	56
3 CAPÍTULO III - NÍVEIS CRÍTICOS DE NÍQUEL NA PARTE AÉREA DE SOJA EM SOLOS DO ESTADO DO PARANÁ SOB CONDIÇÕES CONTROLADAS.....	64
RESUMO.....	64
ABSTRACT	65
3.1 INTRODUÇÃO	66
3.2 MATERIAL E MÉTODOS	67
3.2.1 LOCAL	67
3.2.2 CARACTERIZAÇÃO DOS SOLOS.....	67
3.2.3 DELINEAMENTO EXPERIMENTAL E TRATAMENTOS	67
3.2.4 DESENVOLVIMENTO EXPERIMENTAL E MANEJO.....	67
3.2.5 VARIÁVEIS ANÁLISADAS.....	69
3.2.5.1 Análises dos solos e do tecido vegetal.....	70
3.2.6 ANÁLISE ESTATÍSTICA	70
3.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO	71
3.4 CONCLUSÕES.....	80
3.5 AGRADECIMENTOS	80
3.6 LITERATURA CITADA.....	80
CONCLUSÃO GERAL	85
CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	86
RESUMO BIOGRÁFICO	88

NÍQUEL EM SOLOS E NA CULTURA DE SOJA ⁽¹⁾

Autora: Bruna Wurr Rodak

Orientador: Prof. Dr. Milton Ferreira de Moraes

Co-orientador: Dr. Adilson de Oliveira Junior

Co-orientador: Dr. Cesar de Castro

Co-orientador: Prof. Dr. Volnei Pauletti

RESUMO GERAL

A soja (*Glycine max* [L.] Merrill) é uma das culturas de maior importância econômica no mundo e o Brasil é o maior produtor mundial dessa leguminosa. O Ni é um micronutriente essencial às plantas por ser componente estrutural das enzimas urease e hidrogenase, entretanto, poucos são os estudos sobre seu efeito na cultura da soja. Não existem critérios para adubação com Ni e são escassas as informações sobre sua disponibilidade no solo. Desta forma, os objetivos foram estudar a adubação com esse micronutriente na cultura da soja, visando estabelecer níveis críticos de Ni no solo e na planta, bem como compreender o comportamento dos teores disponíveis de Ni em solos naturais e agrícolas. O estudo foi constituído de três experimentos, sendo o primeiro em laboratório e os outros dois em condições controladas. O primeiro estudo foi destinado à avaliar a disponibilidade de Ni utilizando os extratores Mehlich-1 e DTPA em solos naturais e agrícolas, bem como verificar a relação do Ni com os atributos químicos e texturais desses solos. Os outros dois experimentos foram destinados a verificar a resposta da cultura da soja ao Ni. No primeiro experimento em condições controladas buscou-se determinar uma dose ideal para soja. Utilizou-se o cultivar BRS 360 RR em dois solos de textura contrastante submetidos à aplicação de 0,0; 0,2; 0,4; 0,8; 1,0 e 5,0 mg dm⁻³ de Ni. Enquanto no outro experimento o mesmo cultivar de soja foi avaliado em oito solos submetidos à aplicação de 0,0 e 0,5 mg dm⁻³ de Ni. Foram avaliados atividade enzimática da urease e nitrato redutase, conteúdo de clorofila, taxa fotossintética, massa seca das plantas, componentes de produtividade, análise do solo e tecido vegetal. Foram quantificados os teores de Ni disponíveis em Mehlich-1 e DTPA, teores foliares e nos grãos. Em comparação a outros micronutrientes, os teores de Ni

⁽¹⁾ Dissertação de Mestrado em Ciência do Solo. Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná. Curitiba. (88 p.) Fevereiro, 2014.

disponíveis se mostraram bastante baixos, variando em solos agrícolas e naturais de $< 0,1$ a $0,54 \text{ mg dm}^{-3}$ em Mehlich-1 e $< 0,013$ a $0,27 \text{ mg dm}^{-3}$ em DTPA, com alto grau de dificuldade para sua determinação, evidenciando a necessidade de mais pesquisas para determinação de faixas de valores e níveis críticos nos solos agrícolas. Os atributos químicos e texturais dos solos, bem como as atividades agrícolas, influenciam diretamente nos teores disponíveis de Ni. Os extratores Mehlich-1 e DTPA apresentaram diferença quanto aos teores extraídos de Ni disponível, fato que se deve ao princípio de extração: dissociação para o Mehlich-1 e complexação no caso do extrator DTPA. Aspectos fisiológicos das plantas de soja foram potencializados com a aplicação de doses em torno de $0,5 \text{ mg dm}^{-3}$ de Ni, entretanto não contribuíram para o aumento dos componentes de produtividade. Portanto, a aplicação de Ni nas condições estudadas não se fez necessária. A exigência de Ni pelas plantas é baixa, sendo que o teor na semente pode suprir algumas gerações. Em solos com teores disponíveis mais altos de Ni pode ocorrer redução do desenvolvimento das plantas, conseqüentemente, da massa seca dos grãos de soja devido efeito excessivo/tóxico desse micronutriente. O Ni não apresentou níveis críticos para os solos estudados e para a parte aérea das plantas de soja. Entretanto, teores foliares de $0,3$ a $0,8 \text{ mg kg}^{-1}$ de Ni, teores disponíveis de $0,2$ a $0,6 \text{ mg dm}^{-3}$ de Ni em DTPA e $0,4$ a $0,8 \text{ mg dm}^{-3}$ de Ni em Mehlich-1, podem ser tomados a princípio como sugestão aproximada de níveis de referência para Ni em solos e folhas diagnóstico de soja. Estas faixas de valores estavam associadas as maiores respostas fisiológicas ao Ni nas plantas de soja. Portanto, a disponibilidade de Ni nos solos está relacionada diretamente as características inerentes de cada classe de solo, entretanto, a resposta da soja ao Ni depende não somente do teor disponível no solo, mas também dos teores das sementes e das condições do ambiente de cultivo, fatores estes que condicionam as exigências pelas plantas durante o ciclo de desenvolvimento.

Palavras chave: Micronutrientes, urease, hidrogenase, disponibilidade, *Glycine max*.

NICKEL IN SOILS AND CULTURE OF SOYBEAN ⁽²⁾

Author: Bruna Wurr Rodak

Advisor: Prof. Dr. Milton Ferreira de Moraes

Co- Advisor: Dr. Adilson de Oliveira Junior

Co- Advisor: Dr. Cesar de Castro

Co-Advisor: Prof. Dr. Volnei Pauletti

GENERAL ABSTRACT

Soybeans (*Glycine max* [L.] Merrill) is one of the most important economic crops in the world and Brazil is the largest producer of this legume. The Ni is an essential micronutrient for plants as structural component of urease and hydrogenase enzymes, however, there are few studies on its effect on soybean crop. There is no criteria for fertilization with Ni and informations about its availability in soil are scarce. Thus, the objective of this study were to assess the fertilization with Ni in soybean crop aiming to establish critical levels of Ni in soil and plant, as well as to understand the behavior of Ni available in natural and agricultural soils. The study was composed of three experiments, being the first in laboratory and other two in greenhouse conditions. The first study aimed to evaluate Ni availability using Mehlich-1 and DTPA extractants in natural and agricultural soils, as well as verify the relationship of Ni with chemical and textural attributes of these soils. Other two experiments were aimed to evaluate soybean response to Ni fertilization. First of all, in greenhouse conditions the objective was to determine an optimal dose for soybean crop. An soybean cultivar BRS 360 RR were grown in two contrasting soil texture subjected to 0.0; 0.2; 0.4; 0.8; 1.0 and 5.0 mg dm⁻³ of Ni. In another experiment the same soybean cultivar were evaluated in eight soils subjected to application of 0.0 and 0.5 mg dm⁻³ of Ni. The following evaluations were made: urease and nitrate reductase activity, chlorophyll content, photosynthetic rate, plant dry mass, components of productivity, soil and plant tissue analysis. Ni were quantified in Mehlich-1 and DTPA extractions, leaves and grains. In comparison to other micronutrients, the Ni available were quite low, varying in agricultural and natural from < 0.1 to 0.54 mg dm⁻³ in Mehlich-1 and from < 0.013 to 0.27 mg dm⁻³ in DTPA. There was

⁽²⁾ Soil Science Master Dissertation. Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná. Curitiba. (88 p.) February, 2014.

high degree of difficulty for Ni quantification, showing the need for more research to establish value ranges and critical levels in agricultural soils. The chemical and textural attributes of soils, as well as agricultural activities, influenced directly the levels Ni available. Mehlich-1 and DTPA extractants presented differences in the content of Ni available, probably due to the extraction principle of each method: dissociation for Mehlich-1 and complexation in the case of DTPA. Physiological aspects of soybean plants are enhanced by applying doses around 0.5 mg dm⁻³ of Ni, however did not contributed to the increase of productivity. Therefore, the application of Ni in the studied conditions did not required. Ni requirement by plants is low, being the content in seed enough to supply some generations. In soils with high Ni available can occur reduction of plant development and, consequently, also grain yield decrease due to excessive/toxic effect of this micronutrient. There was no critical levels for Ni in soils and plant shoot of soybean. However, foliar concentrations of 0.3 to 0.8 mg kg⁻¹ of Ni and soil available levels of 0.2 to 0.6 mg dm⁻³ of Ni in DTPA and 0.4 to 0.8 mg dm⁻³ of Ni in Mehlich-1 can be taken as reference levels for Ni in soil and soybean leaves. These range values were associated with higher nickel physiological responses. Therefore, Ni availability in soils is related directly to the characteristics of each class of soil, however, the response of soybean to Ni depends not only of the Ni available in soil, but also of initial Ni content in seeds and environment conditions of growth. These factors leading the demands of Ni by plants during the development.

Key words: Micronutrients, urease, hydrogenase, availability, *Glycine max*.

INTRODUÇÃO GERAL

A soja (*Glycine max* [L.] Merrill) pertence à família Fabaceae e seu centro de origem e domesticação é a costa leste do continente Asiático, ao longo do Rio Amarelo, na China (Liu et al., 2008; 2011). Atualmente é a principal fonte de proteína empregada na formulação de rações animais e a segunda maior fonte de óleo vegetal. É destinada, com menor expressividade, ao consumo humano *in natura* e matéria prima de produtos alimentícios (USDA, 2013).

Essa oleaginosa é o quarto grão mais produzido no mundo, ficando atrás apenas do cultivo de milho (*Zea mays* L.), arroz (*Oryza sativa* L.) e trigo (*Triticum aestivum* L.) (FAO, 2013). Na safra agrícola 2012/13 o Brasil se tornou o maior produtor e exportador mundial de soja, com produção de aproximadamente 81 milhões de toneladas, em uma área de aproximadamente 27 milhões de hectares e produtividade média de 2.933 kg ha⁻¹ (CONAB, 2013; USDA, 2013), contudo, o país apresenta potencial para aumentar a produtividade e produção.

O fornecimento adequado de nutrientes por meio da adubação é uma das principais práticas de manejo adotada para a manutenção e aumento da produtividade da soja. Atualmente essa cultura consome aproximadamente um terço de todo fertilizante comercializado no país (Cunha et al., 2010). Recomendações inadequadas da aplicação dos fertilizantes podem causar deficiência ou excesso de nutrientes, ocasionando limitações ao crescimento das plantas, levando a perdas econômicas e impactos ambientais.

Por outro lado, a intensificação do uso das áreas agrícolas e o aumento da produtividade podem levar ao esgotamento de micronutrientes como níquel (Ni) e molibdênio (Mo) e elementos benéficos como cobalto (Co) nos solos, pois mesmo requeridos em pequenas quantias, se não repostos podem levar a deficiência. A aplicação destes elementos tem sido feita de maneira bastante empírica, com poucas informações sobre exigências nutricionais e disponibilidade nos solos, em muitos casos suprida apenas por teores residuais desses elementos contidos em insumos agrícolas comumente empregados no manejo da cultura. Ressalta-se também que os cultivares modernos de soja são mais exigentes nutricionalmente e requerem cada vez mais atenção no manejo da adubação.

O Ni foi inserido recentemente na legislação brasileira de fertilizantes na Instrução Normativa N° 05, de 23 de fevereiro de 2007 (MAPA, 2013) e os estudos a respeito de sua

exigência pelas culturas, disponibilidade no solo e forma de utilização na agricultura se encontram na fase inicial.

O Ni costumava ser classificado como não essencial ou tóxico para as plantas (Malavolta & Moraes, 2007). Entretanto, trabalhos com diversas espécies cultivadas, principalmente com pecã (*Carya illinoensis*), mostraram que ele satisfaz os critérios direto e indireto de essencialidade: (1) Direto: a urease é uma metaloenzima ubíqua contendo Ni como parte estrutural do seu grupo prostético (Dixon et al., 1975); (2) Indireto: Eskew et al. (1983, 1984) e Brown et al. (1987) cultivando soja, feijão (*Vigna unguiculata* L.) e cevada (*Hordeum vulgare* L.) em condições controladas, inseriram o Ni na lista de micronutrientes, sua essencialidade foi evidenciada em plantas de soja que apresentaram sintomatologia de deficiência, porém, a primeira espécie vegetal a não completar o ciclo devido a deficiência desse micronutriente foi a cevada.

Em plantas, após a síntese da molécula de ureia ($\text{CO}[\text{NH}_2]_2$) pela amida arginina sob ação da enzima arginase, a urease desdobra a ureia hidroliticamente em duas moléculas de amônia (NH_3) e dióxido de carbono (CO_2) no tecido vegetal. A deficiência de Ni impede a ação da urease e resulta em acúmulo de ureia, o que causa manchas necróticas nas folhas (Eskew et al., 1983; Wood et al., 2004a; 2004b). Como consequência da deficiência de Ni, o metabolismo de ureídeos, aminoácidos e de ácidos orgânicos é afetado, os ácidos oxálico e málico também podem acumular no tecido vegetal (Bai et al., 2006). Esses fatos sugerem que o Ni possa exercer múltiplos papéis nas plantas. As manchas necróticas, associadas com a deficiência, coincidem com locais de acumulação de ureia ou dos ácidos oxálico e lático, o que indica também mudanças no metabolismo do carbono (C), em particular diminuição na respiração e fotossíntese das plantas (Malavolta & Moraes, 2007). O Ni também exerce papel na produção de etileno (Singh et al., 1994; Smith & Woodburn, 1984), na germinação de sementes (Brown et al., 1987) e na resistência das plantas a doenças (Forsyth & Peturson, 1959; Graham et al., 1985; Wells & Wood, 2008).

No caso das leguminosas, como a soja, o Ni exerce influência direta no processo de fixação biológica de nitrogênio (FBN), pois é constituinte da enzima hidrogenase (Sellstedt & Smith, 1990). No processo de FBN a enzima nitrogenase realiza a quebra da tripla ligação da molécula do gás nitrogênio (N_2), por consequência, ocorre à formação obrigatória de NH_3 e do gás hidrogênio (H_2). A formação do H_2 , pela nitrogenase, indica uso ineficiente de energia que poderia ser utilizada na fixação do N_2 , além das altas concentrações do H_2 inibirem a atividade da nitrogenase, logo, reduzindo a eficiência da FBN. A enzima hidrogenase, a qual

o Ni é componente estrutural, é capaz de reprocessar parte do gás hidrogênio (H₂) em energia, essa energia por sua vez é realocada para a enzima nitrogenase, ou seja, ocorre uma recuperação energética (Evans et al., 1987; López et al., 1983). Logo, o fornecimento adequado de Ni possibilita o aumento da atividade da enzima hidrogenase nos bacterióides potencializando a nodulação, favorecendo a FBN (Bertrand & Wolf, 1954; Klucas et al., 1983; Ureta et al., 2005).

Ressalta-se que nas leguminosas o transporte do nitrogênio (N) advindo da FBN é realizado por ureídeos, que são compostos do metabolismo secundário das plantas, os quais catalisam no final do transporte a molécula da ureia, que é metabolizada posteriormente pela enzima urease, a qual o Ni faz parte do grupo prostético (McClure & Israel, 1979).

Os sintomas peculiares da deficiência de Ni nas folhas de pecã e algumas outras plantas são denominados vulgarmente de ‘orelha-de-rato’, pois a ponta das folhas novas apresentam manchas escuras em formato arredondado, o que lhes confere um aspecto parecido com da orelha de um rato (Wood et al., 2004a; 2004b; 2006), entretanto, a deficiência em condições de cultivo a campo, até o presente momento, foram relatadas apenas para duas espécies vegetais: pecã (Wood et al., 2006) e *Betula nigra* (Ruter, 2005). Sintomas de toxidez ocorrem quando teores excessivos são absorvidos pelas plantas, principalmente em solos contaminados ou com teores naturais elevados, como solos formados a partir de rochas ultramáficas, com destaque para os minerais do grupo da serpentina (Anderson et al., 1973). Tais sintomas incluem clorose, devida à menor absorção de ferro (Fe), crescimento reduzido das raízes e da parte aérea, em casos mais severos, deformação de várias partes da planta e manchas peculiares nas folhas (Mishra & Kar, 1974).

A deficiência ou toxidez de Ni nas plantas esta relacionada aos teores disponíveis no solo, todavia, características químicas e físicas inerentes do solo também podem influenciar esses teores (Uren, 1992). Condições do solo como baixo teor disponível de Ni, excesso de fósforo (P), cobre (Cu) e zinco (Zn), estiagens prolongadas, pH do solo acima de 6,5, doses excessivas ou tardias de N, calagem excessiva e presença de nematóides podem afetar a disponibilidade de Ni e provocar deficiência (Malavolta & Moraes, 2005). Contudo, os estudos sobre a disponibilidade de Ni e sua relação na nutrição das plantas, bem como em solos agrícolas, se encontram na fase inicial.

Apesar da possibilidade de resposta da soja ao Ni não existem critérios de recomendação da adubação para esse micronutriente na cultura. Portanto, desenvolver estudos para avaliar a aplicação do Ni em soja, bem como investigar os teores de Ni disponíveis nos

solos, é de fundamental importância para que os agricultores e a assistência técnica disponham de parâmetros confiáveis para recomendação do Ni, evitando problemas que atualmente são enfrentados como falsos diagnósticos e possíveis recomendações nutricionais errôneas. Os resultados obtidos no presente estudo também poderão ser úteis nos posicionamentos de recomendações de aplicação de Ni às demais culturas agrícolas, bem como, servir de base para criação ou adequação dos fertilizantes contendo Ni.

Sendo assim, objetivou-se com esse estudo:

- (a) Determinar os teores de Ni disponíveis e sua relação com os atributos químicos e texturais de amostras de solos naturais e de regiões representativas no cultivo de soja;
- (b) Verificar a influência da aplicação de Ni no desenvolvimento de plantas de soja cultivadas em solos de classes texturais contrastantes;
- (c) Estabelecer níveis críticos de Ni disponível em solos e na parte aérea de plantas de soja.

LITERATURA CITADA

ANDERSON, A.J.; MEYER, D.R. & MAYER, F.K. Heavy metal toxicities: levels of nickel, cobalt, and chromium in soil and plants associated with visual symptoms and variation in growth of an oat crop. *Australian Journal of Agricultural Research*, 24:557-571, 1973.

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*, 140(2):433-443, 2006.

BERTRAND, D. & WOLF, A. Le nickel et le cobalt des nodosites des legumineuses. *Bulletin de la Societe de Chimie Biologique*, 36(6-7):905-907, 1954.

BROWN, P.H.; WELCH, R.M. & CARY, E.E. Nickel: a micronutrient essential for higher plants. *Plant Physiology*, 85(3):801-803, 1987.

CONAB - COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. Acompanhamento da safra brasileira grãos 2012/13 - nono levantamento. Brasília, Companhia Nacional de Abastecimento, 2013. 31p.

CUNHA, J.F.; CASARIN, V. & PROCHNOW, L.I. Balanço de nutrientes na agricultura brasileira. *Informações Agronômicas*, 130:01-11, 2010.

DIXON, N.E.; GAZZOLA, C.; BLAKELEY, R.L. & ZERNER, B. Jack bean urease (EC z3.5.1.5) a metalloenzyme: simple biological role for nickel. *Journal of the American Chemical Society*, 97(14):4131-4133, 1975.

ESKEW, D.L.; WELCH, R.M. & CARY, E.E. Nickel: an essential micronutrient for legumes and possibly all higher-plants. *Science*, 222(4624):621-623, 1983.

ESKEW, D.L.; WELCH, R.M. & NORVELL, W.A. Nickel in higher plants: further evidence for an essential role. *Plant Physiology*, 76(3):691-693, 1984.

EVANS, H.J.; HARKER, A.R.; PAPEN, H.; RUSSELL, S.A.; HANUS, F.J. & ZUBER, M. Physiology, biochemistry and genetics of the uptake hydrogenase in rhizobia. *Annual Review of Microbiology*, 41:335-361, 1987.

FAO - FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS. Faostat. 2013. Disponível em: <<http://faostat.fao.org/site/567/default.aspx#ancor>>. Acesso em 24 jun. 2013.

FORSYTH, F.R. & PETURSON, B. Chemical control of cereal rust. IV. The influence of Ni compounds on wheat, oat and sunflower rusts in greenhouse. *Phytopathology*, 49:1-3, 1959.

GRAHAM, R.D.; WELCH, R.M. & WALKER, C.D. A role for nickel in the resistance of plants to rust. In: AUSTRALIAN AGRONOMY CONFERENCE, 3., 1985, Hobart. Proceedings... Hobart: Australian Society of Agronomy, 1985. 337p.

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. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 80(8):2253-2257, 1983.

LIU, L.; GE, W.; BESTEL, S.; JONES, D.; SHI, J.; SONG, Y. & CHEN, X. Plant exploitation of the last foragers at Shizitan in the Middle Yellow River Valley China: evidence from grinding stones. *Journal of Archaeological Science*, 38:3524-3532, 2011.

LIU, X.; JIN, J.; WANG, G. & HERBERT, S.J. Soybean yield physiology and development of high-yielding practices in Northeast China. *Field Crops Research*, 105:157-171, 2008.

LÓPEZ, M.; CARBONERO, V.; CABRERA, E. & RUIZ-ARGÜESO, T. Effects of host on the expression of the H₂-uptake hydrogenase of *Rhizobium* in legume nodules. *Plant Science Letters*, 29:191-199, 1983.

MALAVOLTA, E. & MORAES, M.F. Nickel - from toxic to essential nutrient. *Better Crops*, 91(3):26-27, 2007.

MALAVOLTA, E. & MORAES, M.F. Orelha de rato. *Informações Agronômicas*, 112:8, 2005.

MAPA - MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, PECUÁRIA E ABASTECIMENTO. Instrução Normativa MAPA 5/2007 (D.O.U. 01/03/2007). 2013. Disponível em:<<http://sistemasweb.agricultura.gov.br/sislegis/action/detalhaAto.do?method=recuperarTextoAtoTematicaPortal&codigoTematica=1229260>>. Acesso em 24 jun. 2013.

- McCLURE, P.R. & ISRAEL, D.W. Transport of nitrogen in the xilem of soybean. *Plant Physiology*, 64:411-416, 1979.
- MISHRA, D. & KAR, M. Nickel in plant growth and metabolism. *Botanical Review*, 40(4):395-452, 1974.
- RUTER, J.M. Effect of nickel applications for the control of mouse ear disorder on river birch. *Journal of Environmental Horticulture*, 23(1):17-20, 2005.
- SELLSTEDT, A. & SMITH, G.D. Nickel is essential for active hydrogenase in free-living *Frankia* isolated from *Casuarina*. *Federation of European Microbiological Societies Microbiology Letters*, 70:137-140, 1990.
- SINGH, Z.; SINGH, L.; ARORA, C.L. & DHILLON, B.S. Effect of cobalt, cadmium and nickel as inhibitors of ethylene biosynthesis on floral malformation, yield and fruit quality of mango. *Journal of Plant Nutrition*, 17(10):1659-1670, 1994.
- SMITH, N.G. & WOODBURN, J. Nickel and ethylene involvement in the senescence of leaves and flowers. *Naturwissenschaften*, 71(4):210-211, 1984.
- UREN, N.C. Forms, reaction and availability of nickel in soils. *Advances in Agronomy*, 48:141-203, 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*, 71(11):7603-7606, 2005.
- USDA - UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE. Oilseeds: world markets and trade. 2013. Disponível em: <<http://www.ers.usda.gov/topics/crops/soybeans-oil-crops.aspx#UU-Mwxdwd6g>>. Acesso em 24 jun. 2013.
- WELLS, M.L. & WOOD, B.W. Foliar boron and nickel applications reduce water-stage fruit-split of pecan. *HortScience*, 43(5):1437-1440, 2008.
- WOOD, B.W.; REILLY, C.C. & NYCZEPIR, A.P. Mouse-ear of pecan: I. Symptomatology and occurrence. *HortScience*, 39(1):87-94, 2004a.
- WOOD, B.W.; REILLY, C.C. & NYCZEPIR, A.P. Mouse-ear of pecan: II. Influence of nutrient applications. *HortScience*, 39(1):95-100, 2004b.
- WOOD, B.W.; REILLY, C.C. & NYCZEPIR, A.P. Field deficiency of nickel in trees: symptoms and causes. *Acta Horticulturae*, 721:83-97, 2006.

CAPÍTULO I - AVALIAÇÃO DA DISPONIBILIDADE DE NÍQUEL EM SOLOS AGRÍCOLAS E NATURAIS

RESUMO

Compreender a disponibilidade do micronutriente Ni nos solos se faz necessário para adequação da sua utilização em programas de adubação na cultura da soja (*Glycine max* [L.] Merrill). O objetivo do trabalho foi determinar os teores de Ni disponíveis com distintos extratores, bem como sua relação com os atributos químicos e texturais de solos naturais do horizonte B do estado do Paraná e de regiões representativas no cultivo de soja no Brasil. Foi realizada caracterização química e textural de 41 amostras de solo naturais do horizonte B e oito amostras de solos agrícolas de horizontes superficiais. O teor de Ni disponível no solo foi analisado por extrações simples em Mehlich-1 e DTPA e quantificado em ICP-OES. Os resultados foram analisados pelo teste de correlação de Pearson e análise de componentes principais (ACP). Os teores disponíveis de Ni em solos agrícolas e naturais variaram de $< 0,1$ a $0,54 \text{ mg dm}^{-3}$ em Mehlich-1 e $< 0,013$ a $0,27 \text{ mg dm}^{-3}$ em DTPA. Esses extratores apresentaram diferença quanto aos teores extraídos de Ni disponível, fato que se deve ao princípio de extração: dissociação para o Mehlich-1 e complexação no caso do extrator DTPA. Os extratores Mehlich-1 e DTPA apresentaram correlação significativa e positiva, evidenciando que ambos podem ser utilizados para quantificação da disponibilidade de Ni. Os teores totais apresentam baixa correlação e contraste com os teores disponíveis e são condicionados pelo material de origem dos solos. A disponibilidade de Ni das amostras de solos agrícolas da camada superficial foi maior que a verificada nas amostras de solos naturais do horizonte B. Os atributos químicos e texturais dos solos, bem como as atividades agrícolas, influenciam diretamente nos teores disponíveis de Ni. A estreita faixa de variação do pH nas amostras de solo estudadas não possibilitaram verificar a relação inversa com a disponibilidade de Ni. Em comparação a outros micronutrientes, os teores de Ni disponíveis se mostraram bastante baixos, com alto grau de dificuldade para sua determinação, evidenciando a necessidade de mais pesquisas para determinação de faixas de valores e níveis críticos nos solos agrícolas.

Palavras chaves: Micronutrientes, DTPA, Mehlich-1, Paraná, *Glycine max*.

CAPÍTULO I - EVALUATION OF NICKEL AVAILABILITY IN AGRICULTURAL AND NATURAL SOILS

ABSTRACT

There is need to understand the Ni availability in soils in order to adequate fertilization programs with Ni for soybean (*Glycine max* [L.] Merrill) crop. The objective of this work was to determine the levels of Ni available with different extractors, as well as their relationship with chemical and textural attributes in horizon B of natural soils from Paraná state and representative regions of soybean crop in Brazil. Chemical and textural characterization was performed in 41 samples horizon B of natural soils and eight samples of agricultural soils from surface horizons. Ni available in soil was analyzed by simple extractions with Mehlich-1 and DTPA extractants and quantified in ICP-OES. The results were analyzed by Pearson's correlation test and principal component analysis (PCA). Ni available in agricultural and natural soils ranged from < 0.1 to 0.54 mg dm^{-3} in Mehlich-1 and from < 0.013 to 0.27 mg dm^{-3} in DTPA. These extractants showed differences regarding the contents Ni extracted, probably due to the extraction principle of each method: dissociation for Mehlich-1 and complexation in the case of DTPA. The extractants Mehlich-1 and DTPA presented significant and positive correlation, showing that both can be used to quantify Ni availability. Total concentration of Ni presented low correlation and contrast with Ni available and are most related with soil parent material. The availability of Ni in agricultural soils samples from surface layer was higher than observed in soil samples from natural horizon B. Chemical and textural attributes of soils, as well as agricultural activities, directly influence Ni available. The narrow pH variation in soil samples do not enabled to assess the inverse relationship between pH and Ni availability. In comparison to other micronutrients, the levels of Ni available were quite low, with high degree of difficulty for its determination, showing the need for more research to establish values and critical levels of Ni in agricultural soils.

Key words: Micronutrients, DTPA, Mehlich-1, Paraná, *Glycine max*.

1.1 INTRODUÇÃO

O níquel (Ni) é o vigésimo terceiro elemento mais abundante na crosta terrestre. A concentração total de Ni nos solos varia de 5 a 500 mg kg⁻¹, com valor médio de 40 mg kg⁻¹ (Liu et al., 2011). Solos derivados de rochas ultramáficas ricas em minerais do grupo serpentina podem apresentar concentrações de até 7.100 mg kg⁻¹ (Brooks, 1987; Turekian & Wedepohl, 1961; Kabata-Pendias & Mukherjee, 2007).

Os teores disponíveis de Ni no solo dependem de diversos fatores, tais como os teores de argila, matéria orgânica do solo (MOS), óxidos de ferro (Fe) e manganês (Mn), pH, competição pelos sítios de adsorção, reações de complexação e constituição mineralógica do solo (Adriano, 2001). Uren (1992) relata que os teores solúveis correspondem a 0,001% dos teores totais, na maioria das vezes, segundo Vanselow (1966) com teores abaixo de 1 mg dm⁻³.

São escassas as informações referentes à disponibilidade de Ni e sua interação com os atributos químicos e texturais em solos agrícolas brasileiros, pois, os poucos estudos realizados até o momento foram voltados principalmente para solos naturais ou contaminados. A pouca quantidade de estudos com Ni na nutrição de plantas está relacionada ao fato de que até 2003, o mesmo era considerado como elemento tóxico ou benéfico para grande maioria dos cientistas. Todavia, Wood et al. (2004) identificaram pela primeira vez a sintomatologia de deficiência de Ni em condições de campo nos Estados Unidos na cultura da pecã (*Carya illinoensis*). Desde então, as pesquisas sobre a importância do Ni na nutrição das plantas tem crescido em todo o mundo.

Recentemente, o Ni foi inserido na legislação brasileira de fertilizantes na Instrução Normativa N^o 05, de 23 de fevereiro de 2007 (MAPA, 2013), pois é um micronutriente essencial para o desenvolvimento das plantas por ser componente estrutural da enzima urease (Brown et al., 1987; Eskew et al., 1983; 1984). Entretanto, ainda não existem recomendações oficiais para sua utilização em programas de adubação, especialmente para a cultura da soja (*Glycine max* [L.] Merrill) que é o principal grão produzido no Brasil (CONAB, 2013). A adequação da adubação com Ni depende da compreensão da sua disponibilidade no solo.

Os métodos de avaliação da disponibilidade de um elemento no solo se relacionam diretamente ao extrator empregado, ou seja, que melhor quantifica os teores acessíveis às raízes das plantas. Os extratores como Mehlich-1 e DTPA são os comumente empregados para avaliação da disponibilidade dos micronutrientes Fe, Mn, cobre (Cu) e zinco (Zn) no

Brasil (EMBRAPA, 2009; Raij et al., 2001). Entretanto, a eficiência desses extratores não esta bem elucidada para determinação da disponibilidade de Ni.

O objetivo desse estudo foi determinar os teores de Ni disponíveis em Mehlich-1 e DTPA, bem como sua relação com os atributos químicos e texturais de solos naturais do horizonte B do estado do Paraná (PR) e de regiões representativas no cultivo de soja no Brasil.

1.2 MATERIAL E MÉTODOS

1.2.1 LOCAL

O experimento foi realizado no Laboratório de Solo e Tecido Vegetal na Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária / Centro Nacional de Pesquisa de Soja (EMBRAPA SOJA), Londrina, PR, Brasil.

1.2.2 CARACTERIZAÇÃO DOS SOLOS

Foram estudadas 41 amostras compostas de solos naturais do horizonte B do estado do PR (24° 36' 0" S e 51° 23' 0" W). Cada amostra composta de solo representa uma sub-célula do *Global Geochemical Reference Network* (GGRN) (Darnley, 1995) e foram produzidas a partir de 307 pontos amostrais (Figura 1). As amostras compostas foram cedidas pela Minerais do Paraná S.A. (MINEROPAR) do Projeto Geoquímica de Solos - Horizonte B (MINEROPAR, 2005a, 2005b).

Também foram estudadas oito amostras de solos agrícolas, coletadas na camada de 0 a 20 cm de profundidade, em regiões representativas de cultivo de soja no Brasil (Figura 2). Os solos foram classificados segundo EMBRAPA SOLOS (2006).

1.2.3 VARIÁVEIS ANÁLISADAS

Os atributos químicos das amostras dos solos agrícolas pH, alumínio (Al), Al + hidrogênio (H), fósforo (P), potássio (K), cálcio (Ca), magnésio (Mg), Cu, Fe, Mn, Zn e Ni (Mehlich-1) foram analisados segundo metodologia da EMBRAPA (2009), enquanto carbono (C), enxofre (S-SO₄), boro (B) e Ni (DTPA) foram analisados segundo metodologia de Raij et al. (2001). Os atributos químicos das amostras de solos naturais foram analisados segundo metodologia de EMBRAPA (1999) pela MINEROPAR (MINEROPAR, 2005a; 2005b), com exceção dos teores de Ni disponível analisado segundo metodologia anteriormente descrita. A

textura foi determinada pelo método da pipeta conforme descrito em Camargo et al. (1986), utilizando como dispersante químico o hidróxido de sódio (NaOH) e hexametáfosfato de sódio ($\text{Na}[\text{NaPO}_3]_n\text{ONa}$).

Para as 41 amostras de solos naturais do estado do PR o teor de Ni total foi extraído com uma mistura de ácido clorídrico (HCl $0,5 \text{ mol L}^{-1}$), ácido nítrico (HNO_3 $0,08 \text{ mol L}^{-1}$) e ácido perclórico (HClO_4 $0,05 \text{ mol L}^{-1}$) aquecidos até surgirem vapores brancos e o desaparecimento dos mesmos. Em seguida as amostras foram resfriadas, adicionou-se água régia ($0,06 \text{ mol L}^{-1}$) e novamente foram aquecidas lentamente durante 10 a 20 minutos. Após deixadas evaporar, acrescentou-se água régia ($0,1 \text{ mol L}^{-1}$ a 5%) e procedeu-se quantificação em espectrografia óptica de emissão com plasma induzido (MINEROPAR, 2005a; 2005b).

Amostras de referência certificadas pela *European Commission - Joint Research Centre, Institute for Reference Materials and Measurements* (BCR[®] - 142R) foram utilizadas para o controle de qualidade das análises.

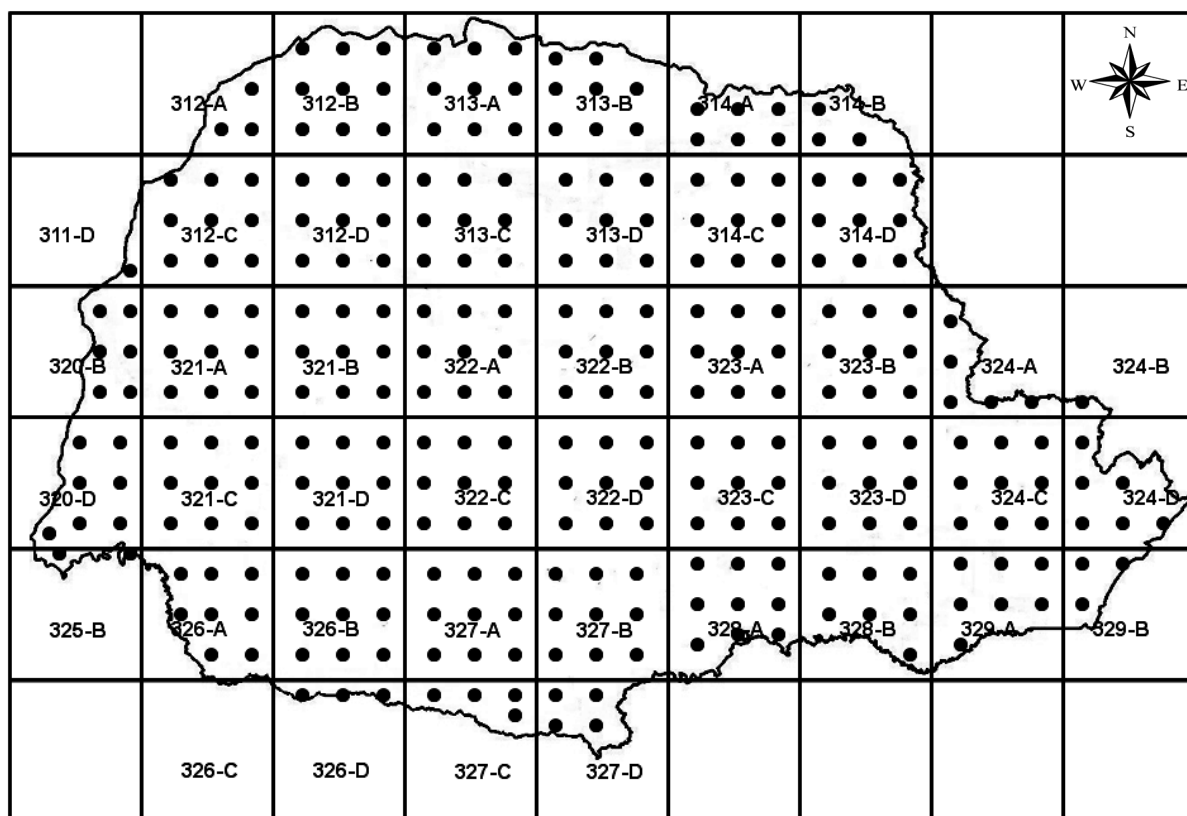


FIGURA 1. Pontos amostrais de coleta (●) e sua distribuição nas 41 sub-células da *Global Geochemical Reference Network* (GGRN) no estado do Paraná (PR) (as células do GGRN são identificadas pelo código numérico estabelecido para o Brasil e suas sub-células no estado do PR pelas letras A, B, C e D).

FONTE: Adaptado de MINEROPAR (2005b).

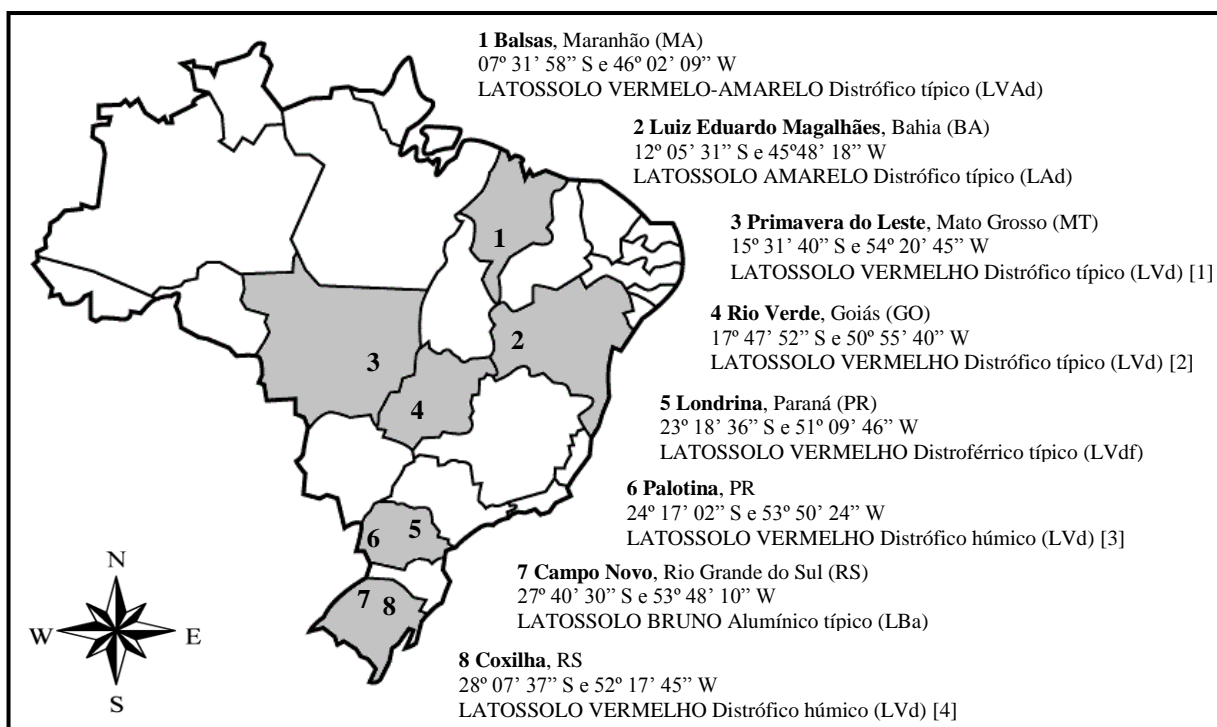


FIGURA 2. Localização e classificação dos solos agrícolas.

1.2.3.1 Disponibilidade de Ni em Mehlich-1

Foram cachimbados 5 cm⁻³ de solo e adicionados 50 mL da solução extratora de Mehlich-1. Posteriormente as amostras foram agitadas por 10 minutos a 200 rpm. A suspensão foi deixada em repouso por 16 horas, para decantar. Uma alíquota do sobrenadante da amostra foi quantificada em espectrometria de emissão atômica (ICP-OES) modelo PerkinElmer Optima 8300 DV.

A solução extratora Mehlich-1 consistia da mistura de ácido clorídrico (HCl 0,05 mol L⁻¹) e ácido sulfúrico (H₂SO₄ 0,012 mol L⁻¹).

O limite de quantificação em Mehlich-1 foi de 0,1 mg dm⁻³ de Ni.

1.2.3.2 Disponibilidade de Ni em DTPA

Foram cachimbados 10 cm⁻³ de solo e adicionados 20 mL da solução extratora de DTPA. Posteriormente as amostras foram agitadas por duas horas a 220 rpm. A suspensão foi filtrada imediatamente em papel filtro quantitativo faixa azul e quantificada em ICP-OES.

A solução extratora DTPA consistia da mistura de ácido dietilenotriaminopentaacético (DTPA 0,005 mol L⁻¹), trietanolamina (TEA 0,1 mol L⁻¹) e cloreto de cálcio (CaCl₂.2H₂O 0,01 mol L⁻¹) a pH 7,3 corrigido com solução de ácido clorídrico (HCl 4 mol L⁻¹).

O limite de quantificação em DTPA foi de 0,013 mg dm⁻³ de Ni.

1.2.3 DELINEAMENTO EXPERIMENTAL E ANÁLISE ESTATÍSTICA

O delineamento experimental empregado foi inteiramente casualizado (DIC) e cada amostra de solo foi analisada em triplicata.

Os teores disponíveis de Ni em Mehlich-1 e DTPA foram correlacionados pelo teste linear de Pearson utilizando o software Statistica 7 (Stat Soft, 2004).

Foi realizada análise de componentes principais (ACP) entre os teores disponíveis e totais de Ni com os atributos químicos e texturais das amostras de solo, utilizando o software CANOCO versão 4.5 (Ter Braak & Smilauer, 1988). O conjunto original de dados foi mantido, não sendo eliminados os fatores inflacionários da ACP.

O delineamento experimental e as análises estatísticas das 41 amostras de solo naturais do estado do PR e das oito amostras de solos agrícolas foram realizados de maneira independente.

1.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os teores disponíveis de Ni nas amostras de solos naturais do estado do PR variaram de $< 0,1$ a $0,54 \text{ mg dm}^{-3}$ e $< 0,013$ a $0,19 \text{ mg dm}^{-3}$ em Mehlich-1 e DTPA, respectivamente, com correlação (r) entre os extratores de $0,47^{**}$ ($p < 0,01$) (Tabela 1 e Figura 3). Os teores disponíveis nas amostras agrícolas variaram de $< 0,1$ a $0,46 \text{ mg dm}^{-3}$ e $< 0,013$ a $0,27 \text{ mg dm}^{-3}$ em Mehlich-1 e DTPA, respectivamente, apresentando correlação entre os extratores de $r = 0,91^{**}$ (Tabela 1 e Figura 4).

Resultados semelhantes foram obtidos por Rovers et al. (1983) estudando 38 amostras de solos naturais do estado de São Paulo (SP), nos quais os teores disponíveis em DTPA variaram de $< 0,5 \text{ mg dm}^{-3}$ a $1,4 \text{ mg dm}^{-3}$, sendo que 90% das amostras apresentaram teores disponíveis inferiores a $0,5 \text{ mg dm}^{-3}$. Whitby et al. (1978) estudaram 26 amostras de solo de regiões agrícolas do Canadá e verificaram teores disponíveis extraídos em DTPA entre $0,05$ a $1,94 \text{ mg dm}^{-3}$, com teores médios de $0,44 \text{ mg dm}^{-3}$. Teores esses que correspondem a $0,5$ a 2% dos teores totais de Ni no solo. Resultados similares foram verificados por Elrashidi et al. (1979) em solos do Egito, nos quais os teores disponíveis de Ni em DTPA correspondiam a 7% dos teores totais de Ni no solo. Dalton et al. (1985) utilizaram dez amostras de solo da Carolina do Norte para estudar o efeito do Ni em aspectos fisiológicos de plantas de soja. Esses solos apresentaram teores disponíveis extraídos em DTPA de $0,08$ a $0,5 \text{ mg dm}^{-3}$ de Ni, com exceção de uma amostra que apresentou teor disponível de $188,68 \text{ mg dm}^{-3}$, sendo o teor

total de 3.491 mg kg^{-1} de Ni, fato que se deve ao material originário desse solo ser derivado de rochas ultrabásicas com altas concentrações de minerais de serpentina. Bei et al. (1997) verificaram em solos da China teores disponíveis entre $0,06$ a $0,1 \text{ mg dm}^{-3}$ de Ni extraído em Mehlich-1. Os solos dos pomares de pecã nos Estados Unidos, em que a sintomatologia de deficiência do Ni foi observada nas plantas, apresentaram faixa similar de concentração com teores entre $0,2$ e $0,7 \text{ mg dm}^{-3}$ (autor não menciona extrator utilizado) (Wood et al., 2006). Logo, pode-se constatar que a disponibilidade de Ni no solo pode apresentar ampla variabilidade, entretanto, geralmente ocorre em teores traços.

Os teores disponíveis de Ni nas amostras de solos naturais, de maneira geral, foram menores que os verificados nas amostras agrícolas, para ambos os extratores. Esses valores se devem a profundidade em que as amostras de solo foram coletadas, ou seja, amostras naturais do horizonte B. Rovers et al. (1983) verificaram em solos do estado de SP diminuição dos teores disponíveis de Ni em profundidade, atribuindo esse comportamento a distribuição da MOS no perfil. Memon et al. (1980) verificaram no horizonte A de solos japoneses teor médio disponível em DTPA de $0,52 \text{ mg dm}^{-3}$ de Ni, enquanto, nos horizontes sub superficiais os teores foram $\leq 0,1 \text{ mg dm}^{-3}$. Resultados similares foram verificados por Whitby et al. (1978), nos quais os solos agrícolas do Canadá apresentaram teores médios em DTPA de $0,44$ e $0,11 \text{ mg dm}^{-3}$ no horizonte A e B, respectivamente. Logo, a baixa correlação verificada entre os extratores nas amostras naturais de solos, se deve provavelmente a essa baixa disponibilidade do Ni, provocando maior dificuldade na sua quantificação.

Os teores de Ni determinados pela extração com Mehlich-1 na maioria das situações avaliadas foram maiores que os obtidos em DTPA (Tabela 1, Figuras 3 e 4). Provavelmente a solução de Mehlich-1 tenha extraído parte do Ni do solo ligado ou adsorvido aos óxidos de Fe e Mn, em razão do efeito solubilizante dos ácidos que compõem essa solução (Raij & Bataglia, 1991). Ressalta-se também, que o princípio da extração por DTPA é a complexação do Ni, ou seja, o agente quelante reage com os íons de Ni livres na solução, formando complexos solúveis, que resulta em redução da atividade do Ni em solução. Para manutenção do equilíbrio químico, íons de Ni adsorvidos dissolvem para a solução do solo (Lindsay & Norvell, 1978). Entretanto, esse processo é realizado com o extrator ajustado em pH 7,3, valor esse que reduz a disponibilidade de Ni, uma vez que o mesmo é um micronutriente catiônico e sua disponibilidade é inversamente proporcional ao aumento de pH (Siebielec & Chaney, 2006; Uren, 1992; Weng et al., 2004).

Menzies et al. (2007) avaliaram amostras de solo contaminados com metais pesados e quantificaram a disponibilidade de Ni em diversos extratores, incluindo Mehlich-1 e DTPA. Os autores concluíram que, embora não haja consenso na literatura, os extratores de sais neutros, como cloreto de cálcio (CaCl_2 0,01 mol L⁻¹), nitrato de sódio (NaNO_3 0,1 mol L⁻¹) e acetato de amônio (NH_4OAc 1 mol L⁻¹), conseguem avaliar a disponibilidade do Ni no solo e apresentam melhores correlações com teores fitodisponíveis. Entretanto, esses autores não verificaram diferença na eficiência de extração entre Mehlich-1 e DTPA para disponibilidade de Ni. Por outro lado, O'Connor (1998) verificou que a disponibilidade de metais pesados determinada com extração em DTPA apresenta as melhores correlações com os teores nas plantas. No entanto, as conclusões favoráveis ao emprego desses extratores são devidas, em parte, ao número limitado de estudos até o presente momento. Assim, mais estudos são necessários para investigar a eficiência desses e de demais extratores, principalmente em solos naturais e agrícolas não contaminados.

Nas amostras de solos naturais os teores totais e disponíveis de Ni apresentaram baixa correlação com os extratores Mehlich-1 ($r = 0,19^*$) e DTPA ($-0,05^{\text{ns}}$) (Figura 5). O contraste entre teores de Ni extraídos com ataque forte e com extratores fracos, ou seja, a razão entre os teores disponíveis e total de Ni são extremamente baixos (0,0052 Mehlich-1 e 0,0013 DTPA). Esses resultados permitem inferir que o Ni no solo encontra-se principalmente na forma mineral e foi pouco extraída pelo Mehlich-1 e DTPA, fato esse, que provavelmente é responsável pela sua baixa mobilidade e disponibilidade nos solos.

A ACP das amostras de solos naturais e agrícolas não demonstra a relação inversa entre os teores disponíveis de Ni e pH como relatado anteriormente (Figuras 6 e 7). Acredita-se que esse comportamento se deva a estreita amplitude do pH das amostras de solo estudadas, que variaram de 3,95 a 5,71 e 3,9 a 5,37 em solos naturais e agrícolas, respectivamente, sendo que 80% das amostras apresentavam pH na faixa de quatro (Tabela 1). Desta forma, a variação do pH das amostras estudadas foi baixa, provavelmente, não possibilitando verificar a relação inversa entre a disponibilidade de Ni e pH. Ressalta-se que solos agrícolas geralmente apresentam valores similares aos estudados.

A disponibilidade de Ni nos solos naturais apresentou relação com os teores totais de Ni quando esses encontravam-se em altas concentrações (Figura 6). Os teores totais variaram de 9 a 87 mg kg⁻¹ de Ni (Tabela 1), sendo que os maiores teores foram encontrados nas amostras de solo 321, 322 e 326, que coincidem com o material geológico do Grupo São Bento, de solos desenvolvidos de derrames efusivos de rochas basálticas (MINEROPAR,

2005a) - rochas ultrabásicas ricas em Ni (Brooks, 1987; Kabata-Pendias & Mukherjee, 2007; Protasova & Kopayeva, 1985; Turekian & Wedepohl, 1961). Os teores totais de Ni relatados mundialmente apresentam ampla faixa de variação, entre 0,2 a 450 mg kg⁻¹ (Kabata-Pendias & Mukherjee, 2007). Comumente variando entre 19 e 22 mg kg⁻¹, com valores médios entre 20 a 40 mg kg⁻¹ (Adriano, 2001). Rovers et al. (1983) verificaram em amostras naturais do estado de SP teores totais variando de < 10 a 127 mg kg⁻¹ de Ni, semelhantes aos obtidos nesse estudo e que também se relacionavam com material de origem.

Para garantir a qualidade do solo e evitar problemas de uso de solos contaminados para produção de alimentos, órgãos ambientais tem fixado valores de referência de qualidade (VRQ) para elementos potencialmente tóxicos, incluindo Ni. Até o presente momento, para Ni em solos brasileiros foram sugeridos teores totais de: estado de Minas Gerais (MG) de 21,5 mg kg⁻¹ (Caires, 2009), Espírito Santo de (ES) 9,17 mg kg⁻¹ (Paye et al., 2010), Rondônia (RO) e Mato Grosso (MT) de 2,1 mg kg⁻¹ (Biondi, 2010), SP de 13 mg kg⁻¹ (CETESB, 2005) e Planície Litorânea do PR de 17,22 mg kg⁻¹ (Buschle, 2013). Estudando as mesmas amostras do horizonte B do estado do PR empregadas nesse estudo Licht et al. (2006) obtiveram VRQ de 17 mg kg⁻¹. O Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) definiu como valores de prevenção e investigação os valores de 30 mg kg⁻¹ e 70 mg kg⁻¹, respectivamente (CONAMA, 2009). Teores de Ni total no solo acima do valor de investigação são considerados com risco potencial, direto ou indireto, à saúde humana. Observar que alguns solos naturais do PR (Tabela 1) apresentaram teores totais de Ni acima de 70 mg kg⁻¹, embora não tenha tido a mesma variação no teor disponível. Isso evidencia a necessidade dos órgãos ambientais de se determinar também valores fitodisponíveis, em adição aos teores totais. A variabilidade desses teores deve-se principalmente a diferenças na composição do material de origem dos solos, além de outros fatores e processos pedogenéticos de formação dos solos, destacando novamente a importância do material de origem geológico.

A classe textural do solo é fator importante no controle dos teores totais e disponíveis de Ni. Os teores de argila se relacionam positivamente com os de Ni, em contra partida, a relação é negativa para a fração areia (Figura 6). As partículas mais finas têm concentrações mais altas de Ni, devido a maior área superficial específica (ASE) e maior quantidade de cargas negativas na superfície, ou seja, maior capacidade de troca catiônica (CTC) (Caridad-Cancela et al., 2005; Förstner & Salomons, 1980; LeRiche & Weir, 1963; Painter et al., 1953; Qian et al. 1996; Tiller, 1958).

TABELA 1. Teores médios dos atributos químicos, texturais e de níquel (Ni) nas amostras de solos naturais e agrícolas.

Solo	C	pH	H + Al	Al	Ca	Mg	K	S-SO ₄	P	Cu	Zn	Fe	Mn	B	Ni-MI ⁽³⁾	Ni-DTPA ⁽⁴⁾	Ni total ⁽⁵⁾	Argila ⁽⁶⁾	Silte	Areia
	g dm ⁻³	CaCl ₂	.....	cmolc dm ⁻³	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	mg kg ⁻¹	.....	g kg ⁻¹	.....
<i>Naturais⁽¹⁾</i>																				
312 A	2,63	4,97	2,37	0,06	1,16	0,3	0,06	2,4	0,47	1,56	0,37	8,82	4,92	0,07	0,1	0,04	15	25,67	3,67	70,67
312 B	2,77	4,87	2,48	0,18	0,77	0,24	0,06	7,83	0,6	1,17	0,44	8,08	3,2	0,07	< 0,1	< 0,013	12	20,78	3	76,22
312 C	2,26	5,01	2,3	0,17	0,75	0,11	0,06	7,1	1	1,3	0,19	6,68	2,35	0,05	< 0,1	< 0,013	9	14,33	6,45	79,22
312 D	3,6	4,39	4,55	1,1	0,78	0,17	0,05	17,19	0,6	1,12	0,31	9,97	1,63	0,05	< 0,1	< 0,013	14	23,67	6,11	70,22
313 A	3,13	4,68	2,75	0,52	1,19	0,25	0,03	10,26	0,65	1,05	0,21	9,8	1,66	0,05	< 0,1	0,02	14	24,33	5,11	70,56
313 B	6,2	5,35	3,12	0,04	5,29	0,7	0,04	13,8	1,53	4,93	1,53	25,1	1,17	0,21	0,15	0,03	43	52,78	10,11	37,11
313 C	5,76	4,96	3,85	0,16	3,11	1,23	0,15	13,82	4,07	12,8	0,78	27,72	2,97	0,11	< 0,1	< 0,013	55	78,89	14	7,11
313 D	9,86	4,73	5,2	0,41	5,29	1,45	0,08	10,04	2,7	15,69	1,19	30,72	1,49	0,08	< 0,1	0,02	42	69,11	18,56	12,33
314 A	4,98	5,72	2,99	0,02	5,31	1,57	0,26	4,47	3,63	21,09	4,36	40,03	0,17	0,43	0,54	0,13	47	70,17	13,33	16,5
314 B	9,77	4,63	3,48	0,14	2,33	0,54	0,15	5,89	2,3	2,45	0,63	12,66	1,4	0,09	0,34	0,19	18	34,67	5	60,33
314 C	12,99	4,38	8,64	1,81	2,87	0,53	0,21	15,29	2,66	3,09	0,69	23,27	2,95	0,15	0,23	0,07	23	73,78	11,89	14,33
314 D	8,4	4,53	8,29	2	1,63	1,36	0,2	23,55	1,12	2,75	1,6	17,36	0,71	0,12	0,16	0,02	14	55,56	26,66	17,77
320 B	3,28	4,77	3,96	0,18	1,86	1,25	0,05	20,86	1,27	9,16	0,63	16,1	2,27	0,19	< 0,1	0,06	40	78,67	13	8,33
320 D	12,51	4,69	5,37	0,99	3,68	1,3	0,17	11,56	1,49	13,47	1,36	21,82	12,16	0,21	0,14	< 0,013	54	78,28	11,56	10,17
321 A	3,69	4,9	3,78	0,31	2,07	0,65	0,16	10	1,4	3,75	0,59	20,44	1,98	0,16	< 0,1	< 0,013	36	74,89	9,97	15,14
321 B	5,08	4,93	5,72	0,43	2,68	1,24	0,1	7,66	1,19	8,8	0,42	21,19	3,82	0,12	< 0,1	< 0,013	58	66,33	10,89	22,78
321 C	11,37	4,55	6,92	1,13	1,43	1,32	0,33	10,77	1,45	11,32	1,1	21,56	15,36	0,15	< 0,1	0,08	55	78,89	12,67	8,45
321 D	7,93	4,65	6,39	0,84	2,47	1,74	0,06	7,4	2,26	10	2	24,4	2,38	0,11	0,35	< 0,013	76	67,56	20,55	11,89
322 A	5,15	5,01	4,42	0,07	2,72	1,51	0,33	5,04	2,77	10,61	0,72	29,76	5,71	0,15	< 0,1	< 0,013	73	77,44	14,89	7,67
322 B	6,21	4,55	5,29	0,72	0,73	0,32	0,06	6,92	2,22	3,69	0,33	20,66	0,28	0,13	< 0,1	< 0,013	25	71,89	18,45	9,66
322 C	11,11	4,59	6,57	0,3	2,5	1,36	0,1	3,9	1,3	10,01	0,6	29,27	2,66	0,06	0,11	< 0,013	69	67,55	19,56	12,89
322 D	11,95	4,16	9,83	1,85	0,71	0,26	0,12	3,37	1,15	5,27	0,4	25,39	3,17	0,08	< 0,1	< 0,013	22	53,44	16,33	30,22
323 A	7,29	4,24	7,6	1,23	0,3	0,17	0,05	0,88	0,31	1,31	0,18	17,45	1,44	0,07	< 0,1	< 0,013	22	60,11	14,55	25,34
323 B	10,11	4,43	5,35	0,34	0,32	0,27	0,07	4,15	0,38	1,06	0,21	19,91	1,07	0,09	< 0,1	0,02	25	67,78	7,46	24,76
323 C	11,53	4,23	12,13	3,80	0,55	0,25	0,06	2,92	0,39	1,42	0,35	24,3	2,82	0,07	< 0,1	0,02	26	53,67	20,89	25,45
323 D	11,73	4,2	7,83	1,17	0,35	0,2	0,1	2,6	0,57	2,2	0,27	32,47	3,43	0,1	< 0,1	0,16	19	39,33	13	47,67
324 A	7,36	4,33	7,56	1,74	0,15	0,09	0,06	6,08	0,38	1,03	0,39	28,67	0,32	0,08	0,3	< 0,013	19	35	13,67	51,33
324 C	3,43	4,3	7,87	1,73	0,33	0,23	0,01	29,23	0,47	0,9	0,3	22,87	0,37	0,1	< 0,1	< 0,013	26	48	23,67	28,33
324 D	4,19	4,27	4,75	0,47	0,2	0,17	0,03	53,76	0,53	0,51	0,12	15,98	0,14	0,09	< 0,1	0,09	55	53,83	15,67	30,5
325 B	18,71	4,7	6,2	0,08	5,74	1,45	0,3	6,22	1,4	10,35	2,97	12,35	8,87	0,21	0,23	0,06	53	69	20,67	10,33
326 A	10	4,93	5,92	1,12	4,45	1,5	0,13	11,87	3,4	10,74	1,48	19,45	3,4	0,18	0,21	< 0,013	87	65,39	18,89	15,72
326 B	11,06	4,5	6,74	0,38	2,29	1,03	0,18	10,71	1,48	11,03	0,67	22	2,73	0,13	< 0,1	< 0,013	53	73,89	14,22	11,89

Continuação...

Solo	C g dm ⁻³	pH CaCl ₂	H + Al	Al	Ca cmolc dm ⁻³	Mg	K	S-SO ₄	P	Cu	Zn	Fe	Mn mg dm ⁻³	B	Ni-M1 ⁽³⁾	Ni-DTPA ⁽⁴⁾	Ni total ⁽⁵⁾ mg kg ⁻¹	Argila ⁽⁶⁾	Silte g kg ⁻¹	Areia
<i>Naturais⁽¹⁾</i>																				
326 D	9,8	4,23	11,27	2,18	1,72	0,64	0,17	5,62	2,1	14,61	0,51	25,33	1,99	0,08	0,1	< 0,013	48	67,33	17,67	15
327 A	14,84	4,32	8,53	2,11	0,61	0,22	0,1	4,78	0,65	2,18	0,51	35,69	1,35	0,09	< 0,1	< 0,013	19	67,78	16,22	16
327 B	10,94	4,17	8,21	1,89	1,17	0,27	0,15	6,01	1,33	3,95	0,34	21,73	1,31	0,09	< 0,1	< 0,013	32	61,78	15,45	22,77
327 C	14,68	4,07	22,64	2,15	0,26	0,11	0,04	2,32	1,22	2,09	0,1	36,28	0,55	0,08	< 0,1	< 0,013	17	71,67	12,67	15,67
327 D	7,45	3,97	17,76	3,18	0,23	0,09	0,1	5,98	0,93	4,5	0,39	29,38	4,53	0,08	< 0,1	< 0,013	44	63,67	18,33	18
328 A	5,91	3,96	16,95	5,7	0,47	0,22	0,14	14,54	0,56	1,19	0,24	28,95	0,98	0,08	< 0,1	0,05	40	52	21	27
328 B	5,15	4,06	10,18	3,91	0,32	0,18	0,11	10,7	0,69	0,69	0,18	22,23	0,66	0,09	0,1	< 0,013	20	39,56	20,22	40,22
329 A	5,23	4,35	5,78	1,13	0,44	0,18	0,04	17,93	0,3	0,8	0,65	33,4	1,32	0,07	< 0,1	0,02	17	51,06	18,33	30,61
329 B	3,69	4,1	10,09	2,37	0,18	0,15	0,03	29	1,4	0,72	0,16	42,34	0,18	0,07	< 0,1	0,02	16	48,67	10,67	40,67
<i>Agrícolas⁽²⁾</i>																				
LAd	5,41	4,77	2,37	0	0,57	0,57	0,02	1,78	18,5	0,13	0,17	42,08	2,37	0,24	< 0,1	< 0,013	-	11,5	0,57	87,93
LVad	7,51	3,9	6,01	1,09	0	0,12	0,03	26,98	1,93	0,12	0,06	161,35	1,51	0,48	< 0,1	< 0,013	-	30,43	2,92	66,65
LVd [4]	17,12	4,48	6,49	0,68	3,6	1,99	0,31	6,77	23,95	5,29	0,81	38,78	85,49	0,51	0,13	0,07	-	51,37	15,92	32,72
LVd [1]	30,72	5,13	3,96	0	2,73	0,61	0,07	3,77	7,43	2,21	32,04	23,62	48,78	0,26	0,14	0,09	-	59,68	7,95	32,37
LBa	20,81	4,57	8,09	0,29	4,58	1,92	0,43	8,94	21,26	8,03	1,49	32,03	132,25	0,55	0,16	0,08	-	69,37	18,37	12,27
LVd [2]	21,03	5,37	3,1	0	2,3	0,78	0,22	57,25	18,16	3,05	6,49	48,3	42,55	0,51	0,27	0,11	-	40,87	11,52	47,62
LVd [3]	11,42	4,6	6,5	0,04	3,64	1,3	0,56	44,41	22,45	17,97	3,03	39,23	203,05	0,87	0,41	0,27	-	72,77	12,3	14,93
LVdf	14,15	5,36	5,1	0	4,31	1,56	0,71	14,12	32,17	22,43	4,12	44,45	451,55	0,68	0,46	0,19	-	73,37	15,58	11,05

⁽¹⁾ MINEROPAR (2005a; 2005b; 2013); Os elementos foram extraídos conforme a seguir: Al, Ca e Mg - Cloreto de potássio; P e K - Mehlich-1; C - Walkley-Black; H + Al - Solução tampão SMP; Cu, Zn e Fe - Ácido clorídrico; Mn - Acetato de amônio; S-SO₄ - Fosfato mono cálcico e ácido acético; B - Ácido clorídrico; Ni total - Ácido clorídrico, ácido nítrico, ácido perclórico e água régia (determinação em ICP-OES com plasma induzido); ⁽²⁾ Al, Ca e Mg - Cloreto de potássio; P, K, Cu, Zn, Fe e Mn - Mehlich-1; C - Colorimetria; H + Al - Solução tampão SMP; S-SO₄ Fosfato mono cálcico; B - Cloreto de bário; ⁽³⁾ Ni disponível extraído com Mehlich-1 (determinação em ICP-OES); ⁽⁴⁾ Ni disponível extraído com DTPA (determinação em ICP-OES); ⁽⁵⁾ Não determinado nas amostras de solos agrícolas; ⁽⁶⁾ Camargo et al. (1986); LVAd - LATOSSOLO AMARELO Distrófico típico (Balsas - MA); LAd - LATOSSOLO AMARELO Distrófico típico (Luiz Eduardo Magalhães - BA); LVd - LATOSSOLO VERMELHO Distrófico típico (Coxilha - RS [4], Palotina-PR [3], Primavera do Leste - MT [1] e Rio Verde - GO [2]); LVdf - LATOSSOLO VERMELHO Distroférico típico (Londrina - PR); LBa - LATOSSOLO BRUNO Alumínico típico (Campo Novo - RS).

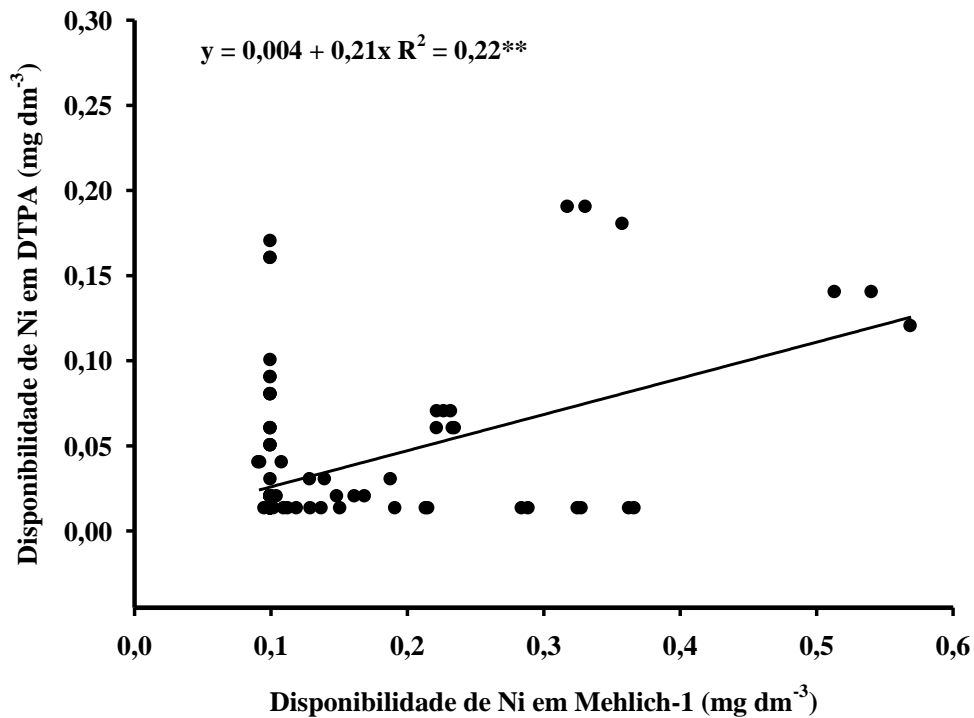


FIGURA 3. Relação entre teores disponíveis de níquel (Ni) extraídos em DTPA e Mehlich-1 nas amostras de solos naturais do horizonte B do estado do Paraná (** significativo ao nível de $p < 0,01$ pelo coeficiente de correlação linear de Pearson).

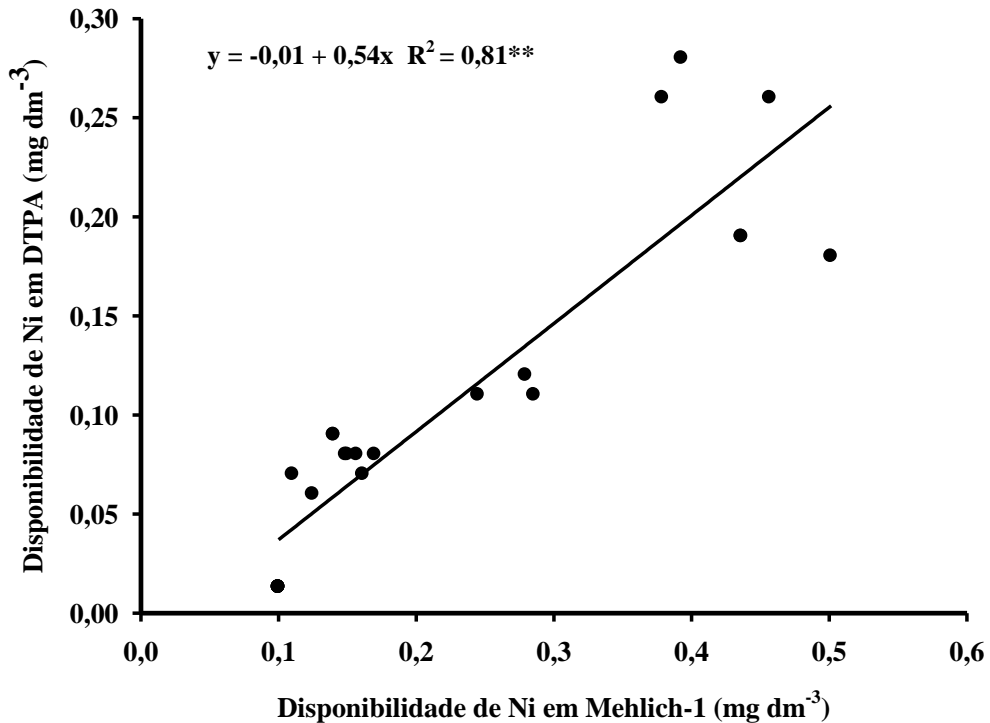


FIGURA 4. Relação entre teores disponíveis de níquel (Ni) extraídos em DTPA e Mehlich-1 em amostras de solos agrícolas (** significativo ao nível de $p < 0,01$ pelo coeficiente de correlação linear de Pearson).

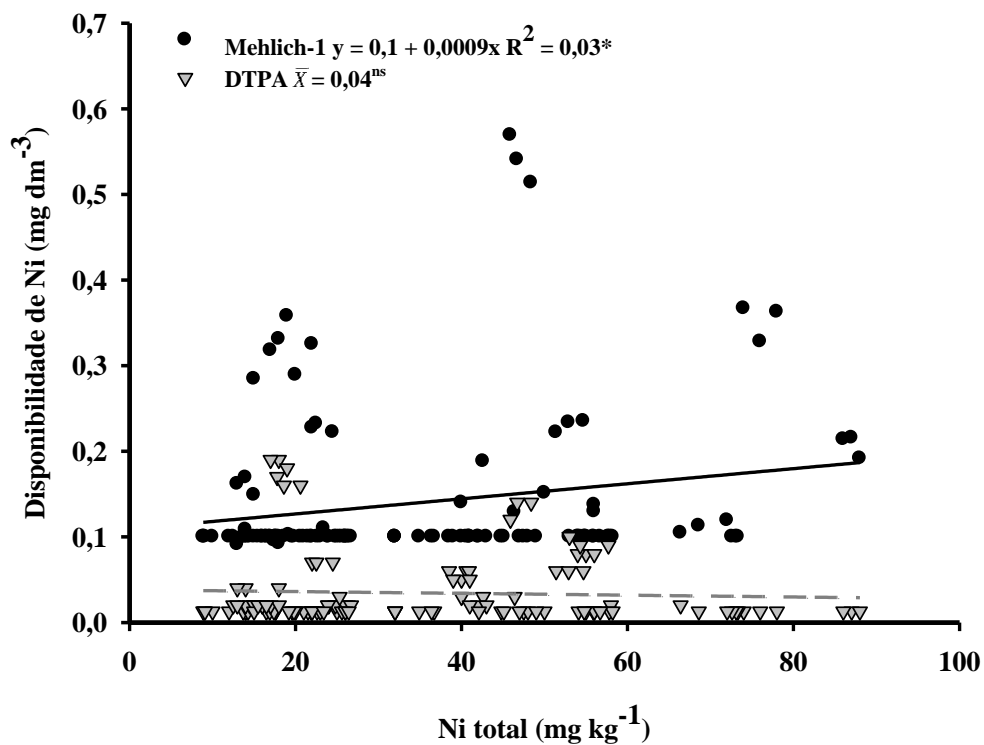


FIGURA 5. Relação entre teores totais e disponíveis (Mehlich-1 e DTPA) de níquel (Ni) em amostras de solos naturais (^{ns} não significativo; * significativo ao nível de $p < 0,05$ pelo coeficiente de correlação linear de Pearson).

Senwo e Tazisong (2004) verificaram estreita relação entre os teores totais de Ni em solos do estado do Alabama nos Estados Unidos, com a CTC e os atributos texturais. Menores teores de Ni ($7,6 \text{ mg kg}^{-1}$) foram verificados em solos que apresentavam 0,9% de argila, enquanto teores mais elevados ($53,8 \text{ mg kg}^{-1}$) ocorrerem em solos que apresentavam 4,6% de argila. Bettinelli et al. (2000) também demonstraram a importância da textura do solo sobre os teores totais de Ni, verificaram ocorrência de menores teores (27 mg kg^{-1}) em solos com característica textural arenosa e maiores teores (88 mg kg^{-1}) em solos derivados de rochas calcárias com características texturais argilosas.

Atributos como soma de bases (SB), saturação por bases (V%), teores disponíveis de P e dos micronutrientes Mn, Zn e B relacionam-se positivamente com os teores de Ni (Figura 6). Acredita-se que esse comportamento esteja relacionado ao material de origem desses solos, bem como a CTC dos mesmos, não necessariamente a uma influência direta desses fatores na disponibilidade de Ni.

Os teores de C no solo não apresentam relação preponderante com a disponibilidade de Ni (Figura 6), evidenciando que sua adsorção no solo é controlada principalmente pela

fração mineral do solo, com destaque para os óxidos de Fe e Mn, corroborando com os resultados de Sadiq & Zaidi (1981).

As amostras de solos agrícolas apresentam comportamento semelhante aos observados nos solos naturais (Figura 7). Entretanto, nesses solos os teores de Cu apresentaram relação com o Ni mais preponderante que a observada nos solos naturais. Diferindo dos relatos de Uren (1992), no qual os teores de Cu apresentam comportamento inverso ao Ni, pois, ambos apresentam similaridade química e competem diretamente pelos sítios de adsorção no solo. Acredita-se que o comportamento observado deve-se a esse micronutriente ser componente de insumos agrícolas comumente empregados no manejo da cultura da soja.

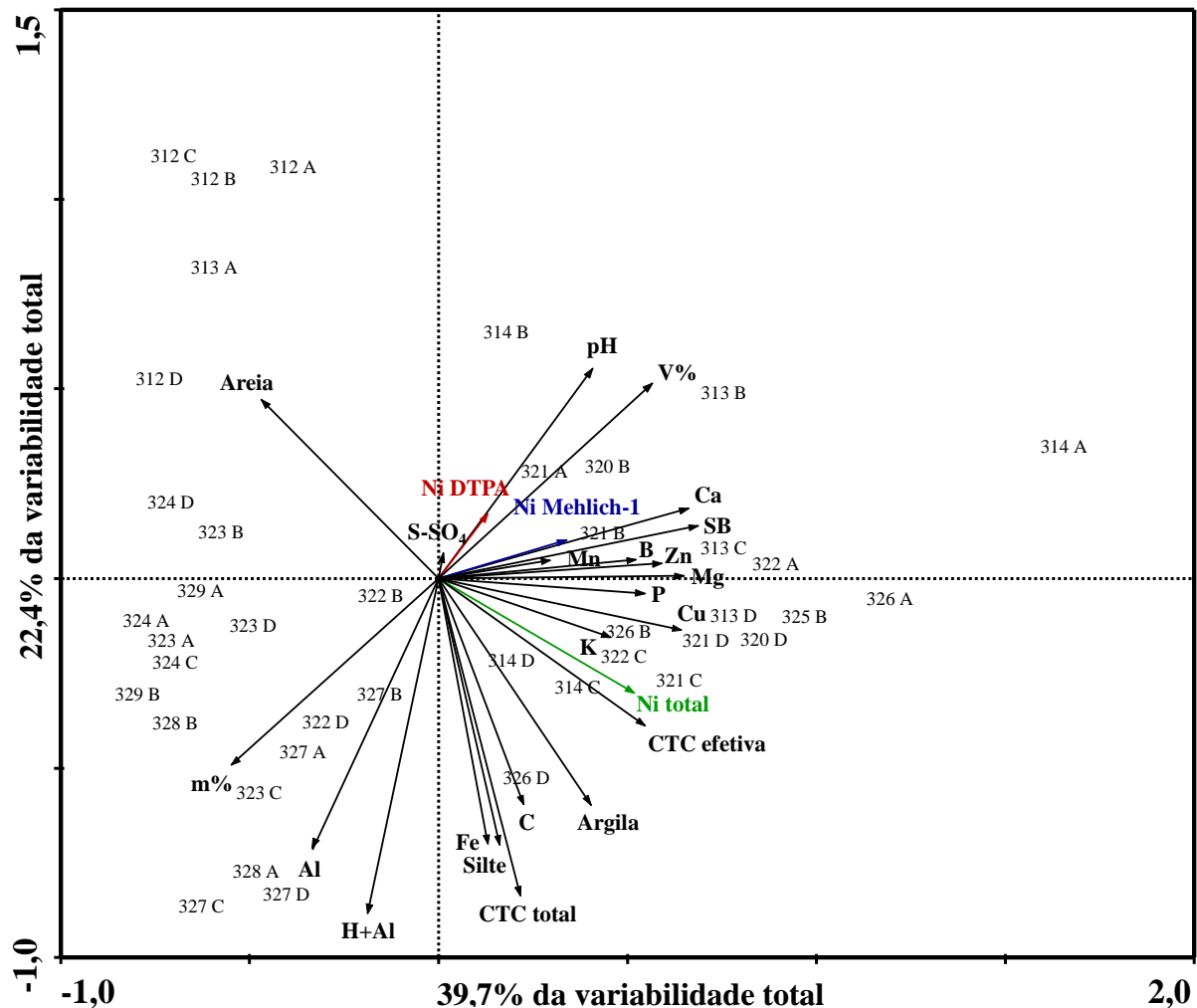
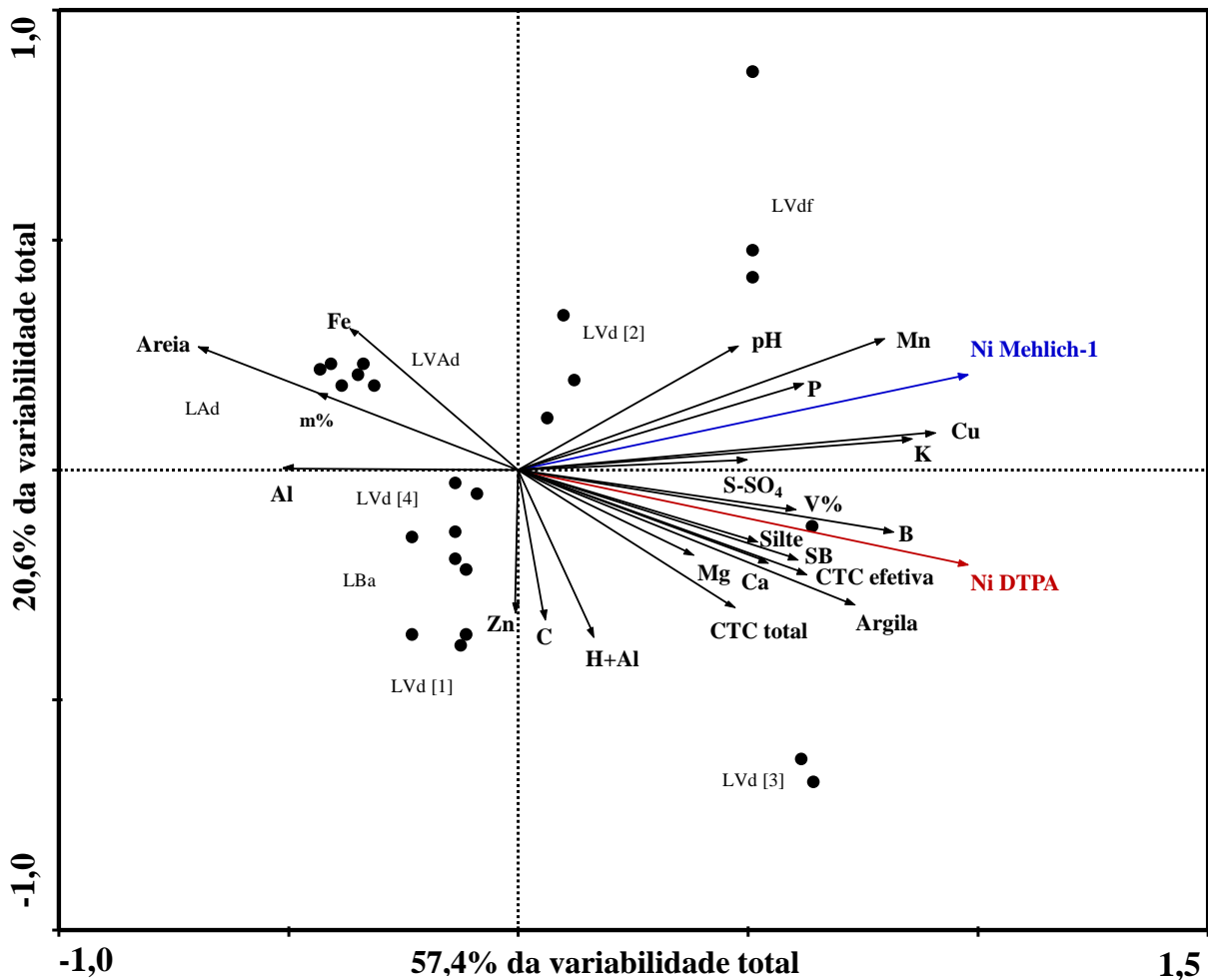


FIGURA 6. Análise de componentes principais (ACP) de níquel (Ni) disponível (Mehlich-1 e DTPA) e total com os atributos químicos e texturais de 41 amostras de solos do horizonte B do estado do Paraná.



LVAd - LATOSSOLO VERMELO-AMARELO Distrófico típico (Balsas - MA); LAd - LATOSSOLO AMARELO Distrófico típico (Luiz Eduardo Magalhães - BA); LVd - LATOSSOLO VERMELHO Distrófico típico (Coxilha - RS [4], Palotina-PR [3], Primavera do Leste - MT [1] e Rio Verde - GO [2]); LVdf - LATOSSOLO VERMELHO Distroférico típico (Londrina - PR); LBa - LATOSSOLO BRUNO Alumínico típico (Campo Novo - RS).

FIGURA 7. Análise de componentes principais (ACP) da disponibilidade de níquel (Ni) (Mehlich-1 e DTPA) com os atributos químicos e texturais de solos agrícolas de estados representativos no cultivo da soja.

Vale salientar que o cultivo da soja é efetuado, de maneira geral, em solos já corrigidos e com fertilidade construída de acordo com as exigências da cultura. Dessa forma, os insumos empregados no manejo da cultura e que contêm Ni, podem contribuir para a elevação dos teores disponíveis desse micronutriente em alguns solos. Exemplificando, insumos como os termofosfatos não são considerados fontes de Ni, embora contenham quantidade significativa desse micronutriente com teores médios de até 330 mg kg⁻¹ (Damato et al., 2008; Gabe, 1998).

O aumento dos teores disponíveis de Ni pode levar a uma competição dos sítios de reação no solo com os micronutrientes Fe e Zn, como pode se observar na ACP dos solos

agrícolas, comportamento esse que corrobora com o relatado por Uren (1992) para esses micronutrientes catiônicos.

1.4 CONCLUSÕES

Os teores disponíveis de Ni em solos agrícolas e naturais variaram de $< 0,1$ a $0,54 \text{ mg dm}^{-3}$ em Mehlich-1 e $< 0,013$ a $0,27 \text{ mg dm}^{-3}$ em DTPA. Esses extratores apresentaram diferença quanto aos teores extraídos de Ni disponível, fato que se deve ao princípio de extração: dissociação para o Mehlich-1 e complexação no caso do extrator DTPA. Os extratores Mehlich-1 e DTPA apresentaram correlação significativa e positiva, evidenciando que ambos podem ser utilizados para quantificação da disponibilidade de Ni. Os teores totais apresentam baixa correlação e contraste com os teores disponíveis e são condicionados pelo material de origem dos solos. A disponibilidade de Ni das amostras de solos agrícolas da camada superficial foi maior que a verificada nas amostras de solos naturais do horizonte B. Os atributos químicos e texturais dos solos, bem como as atividades agrícolas, influenciam diretamente nos teores disponíveis de Ni. A estreita faixa de variação do pH nas amostras de solo estudadas não possibilitaram verificar a relação inversa com a disponibilidade de Ni. Em comparação a outros micronutrientes, os teores de Ni disponíveis se mostraram bastante baixos, com alto grau de dificuldade para sua determinação, evidenciando a necessidade de mais pesquisas para determinação de faixas de valores e níveis críticos nos solos agrícolas.

1.5 AGRADECIMENTOS

Ao Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo da Universidade Federal do Paraná (UFPR), a EMBRAPA SOJA, a MINEROPAR e a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES).

1.6 LITERATURA CITADA

ADRIANO, D.C. Trace elements in the terrestrial environment. 2.ed. New York, Springer, 2001. 867p.

BEI, W.; JIN, Q.; BIN, C. & XIAOQUAN, S. Chemical forms of cobalt and nickel extracted by M1, M3 and CaCl_2 -DTPA. *Journal of Environmental Sciences*, 9(2):172-182, 1997.

BETTINELLI, M.; BEONE, G.M.; SPEZIA, S. & BAFFI, C. Determination of heavy metals in soils and sediments by microwave-assisted digestion and inductively coupled plasma optical emission spectrometry analysis. *Analytica Chimica Acta*, 424:289-296, 2000.

BIONDI, C.M. Teores naturais de metais pesados nos solos de referência do estado de Pernambuco. 2010. 58f. Tese (Doutorado), Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife, 2010.

BROOKS, R.R. *Serpentine and its vegetation: a multidisciplinary approach*. London, Croom Helm, 1987. 454p.

BROWN, P.H.; WELCH, R.M. & CARY, E.E. Nickel: a micronutrient essential for higher plants. *Plant Physiology*, 85(3):801-803, 1987.

BUSCHLE, B.N. Valores de referência de qualidade para elementos-traço em solos da Planície Litorânea do Estado do Paraná. 2013. 49f. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2013.

CAIRES, S.M. Determinação dos teores naturais de metais pesados em solos do Estado de Minas Gerais como subsídio ao estabelecimento de Valores de Referência de Qualidade. 2009. 304f. Tese (Doutorado), Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2009.

CAMARGO, O.A.; MONIZ, A.C.; JORGE, J.A. & VALADARES, J.M.A.S. Métodos de análise química, mineralógica e física de solo do Instituto Agrônomo de Campinas. Campinas, Instituto Agrônomo, 1986. 94p. (Boletim técnico, 106).

CARIDAD-CANCELA, R.; PAZ-GONZÁLEZ, A. & ABREU, C.A. Total and extractable nickel and cadmium contents in natural soils. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 36:241-252, 2005.

CETESB - COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL. Decisão de diretoria N° 195-2005-E, de 23 de novembro de 2005. Dispõe sobre a aprovação dos valores orientadores para solos e águas subterrâneas no estado de São Paulo - 2005, em substituição aos valores orientadores de 2001, e dá outras providências. São Paulo, CETESB, 2005. 4p.

CONAB - COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. Acompanhamento da safra brasileira grãos 2012/13 - nono levantamento. Brasília, Companhia Nacional de Abastecimento, 2013. 31p.

CONAMA - CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE. Resolução N° 420 de 28 de dezembro de 2009. Dispõe sobre critérios e valores orientadores de qualidade do solo quanto à presença de substâncias químicas e estabelece diretrizes para o gerenciamento ambiental de áreas contaminadas por essas substâncias em decorrência de atividades antrópicas. Publicação Diária Oficial da União, Poder Executivo, Brasília, DF, n.249, 2009. p.81-84.

DALTON, D.A.; EVANS, H.J. & HANUS, F.J. Stimulation by nickel of soil microbial urease activity and urease and hydrogenase activities in soybeans grown in a low-nickel soil. *Plant and Soil*, 88:245-258, 1985.

DAMATO, H.; MORAES, M.F.; LAVRES JÚNIOR, J.; CABRAL, C.P.; MALAVOLTA, E. & MURAOKA, T. Variação dos teores de Ni e P em termofosfatos. In: SIMPÓSIO INTERNACIONAL DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA DA USP, 16., 2008, Piracicaba. Resumos... Piracicaba, EDUSP, 2008. CD-ROM.

DARNLEY, A.G. A global geochemical database for environmental and resource management: recommendations for international geochemical mapping. Paris, United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization, 1995. p.122. (Final reporto of IGCP project 259).

ELRASHIDI, M.A.; SHEHATA, A. & WAHAB. M. Contents of zinc, cobalt, nickel and lead in saline alkali soils. *Agrochimica*, 23:245-253, 1979.

EMBRAPA - EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes. Brasília, EMBRAPA Comunicação para Transferência de Tecnologia, 1999. 379p

EMBRAPA - EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes. 2.ed. Brasília, EMBRAPA Informações Tecnológicas, 2009. 627p.

EMBRAPA SOLOS - EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Sistema brasileiro de classificação de solos. 2.ed. Rio de Janeiro, EMBRAPA SOLOS, 2006. 306p.

ESKEW, D.L.; WELCH, R.M. & CARY, E.E. Nickel: an essential micronutrient for legumes and possibly all higher-plants. *Science*, 222(4624):621-623, 1983.

ESKEW, D.L.; WELCH, R.M. & NORVELL, W.A. Nickel in higher plants: further evidence for an essential role. *Plant Physiology*, 76(3):691-693, 1984.

FÖRSTNER, U. Chemical forms and reactivities of metals in sediments. In: LECHSBER, R.; DAVIS, R.A. & HERMITTE, L. (Eds.). *Chemical methods for assessing bioavailable metals in sludges*. London, Elsevier, 1985. p.1-32.

GABE, U. Teor e disponibilidade para a soja de micronutrientes e elementos potencialmente tóxicos em fertilizantes minerais e calcários. 1998. 84f. Tese (Doutorado em Agronomia), Escola Superior de Agricultura 'Luiz de Queiroz', Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1998.

KABATA-PENDIAS A. & MUKHERJEE, A.B. Trace elements from soil to human. Berlin, Springer, 2007. 576p.

LeRICHE, H.H. & WEIR, A.H. A method of studying trace elements in soil fractions. *Journal of Soil Science*, 14:225-235, 1963.

LICHT, O.A.B.; XUEJING, X.; QIN, Z.; MIYAZAWA, M.; FERREIRA, F.J.F. & PLAWIAK, R.A.B. Average reference values of geochemical and geophysical variables in stream sediments and soils, state of Paraná, Brazil. *Boletim Paranaense de Geociências*, 58: 59-87, 2006.

LINDSAY, W.L. & NORVELL, W.A. Development of DTPA soil for zinc, iron, manganese and copper. *Soil Science Society of America Journal*, 42:421-428, 1978.

LIU, G.; SIMONNE, E.H. & YUNCONG, L. Nickel nutrition in plants. *Horticultural Sciences*, 1:1-5, 2011.

MAPA - MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, PECUÁRIA E ABASTECIMENTO. Instrução Normativa MAPA 5/2007 (D.O.U. 01/03/2007). 2013. Disponível em:<<http://sistemasweb.agricultura.gov.br/sislegis/action/detalhaAto.do?method=recuperarTextoAtoTematicaPortal&codigoTematica=1229260>>. Acesso em 24 jun. 2013.

MEMON, A.R.; ITO, S. & YATAZAWA, M. Taxonomic characteristics in accumulating cobalt and nickel in temperate forest vegetation of central Japan. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 26:271-280, 1980.

MENZIES, N.W.; DONN, M.J. & KOPITKE, P.M. Evaluation of extractants for estimation of the phytoavailable trace metals in soils. *Environmental Pollution*, 145:121-130, 2007.

MINEROPAR - MINERAIS DO PARANÁ S.A. Geoquímica de solo - horizonte B: relatório final de projeto. Curitiba, MINEROPAR, 1.v. 2005a. 408p.

MINEROPAR - MINERAIS DO PARANÁ S.A. Geoquímica de solo - horizonte B: relatório final de projeto. Curitiba, MINEROPAR, 2.v. 2005b. 449p.

MINEROPAR - MINERAIS DO PARANÁ S.A. Bases de dados geoquímicos disponíveis na MINEROPAR. 2013. Disponível em:<<http://www.mineropar.pr.gov.br/modules/conteudo/conteudo.php?conteudo=196>>. Acesso em 09 jun. 2013.

O'CONNOR, G.A. Use and misuse of the DTPA soil test. *Journal of Environmental Quality*, 17:715-718, 1988.

PAINTER, L.I.; TOTH, S.J. & BEAR, F.E. Nickel status of New Jersey soils. *Soil Science*, 76:421-429, 1953.

PAYE, H.S.; MELLO, J.W.V.; ABRAHÃO, W.A.P.; FERNANDES FILHO, E.I.; DIAS, L.C.P.; CASTRO, M.L.O.; MELO, S.B. & FRANÇA, M.M. Valores de referência de qualidade para metais pesados em solos no Estado do Espírito Santo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 34:2041-2051, 2010.

PROTASOVA, N.A. & KOPAYEVA, M.T. Trace and dispersed elements in soils of Russian Plateau. *Pochvovedenie*, 1:29-37, 1985.

QIAN, J.; SHAN, X.; WANG, Z. & TU, Q. Distribution and plant availability of heavy metals in different particle-size fractions of soil. *Science of the Total Environment*, 186:131-141, 1996.

RAIJ, B. van; ANDRADE, J.C.; CANTARELLA, H. & QUAGGIO, J.A. Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais. Campinas, Instituto Agrônomo de Campinas, 2001. 285p.

RAIJ, B. van & BATAGLIA, O.C. Análise química do solo. In: FERREIRA, M.E. & CRUZ, M.C.P. (Eds.). *Micronutrientes na agricultura*. Piracicaba, POTAFOS, 1991. p.333-355.

ROVERS, H.; CAMARGO, O.A. & VALADARES, J.M.A.S. Níquel total e solúvel em DTPA em solos do estado de São Paulo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 7(3):217-220, 1983.

SADIQ, M. & ZAIDI, T.H. The adsorption characteristics of soils and sorption of Ca and Ni from waste waters. *Water Air Soil Pollut*, 16:293-298, 1981.

SIEBIELEC, G. & CHANEY, R.L. Mn fertilizer requirement to prevent mn deficiency when liming to remediate Ni-phytotoxic soils. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 37(1-2):163-179, 2006.

SENWO, Z.N. & TAZISONG, I.A. Metal contents in soils of Alabama. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 35:2837-2848, 2004.

STAT SOFT. *Software Statistica 7*. 2004. Disponível em:<<http://www.statsoft.com.br/pt-BR/>>. Acesso em 23 nov. 2013.

TER BRAAK, C.J.F. & ŠMILAUER, P. *CANOCO reference manual and user's guide to canoco for windows. Software for canonical community ordination (version 4)*. Ithaca, Micro Computer Power, 1998. 352p.

TILLER, K.G. The geochemistry of basaltic materials and associated soils of southern. *Journal of Soil Science*, 9:225-241, 1958.

TUREKIAN, K.K. & WEDEPOHL, K.H. Distribution of the elements in some major units of the earth's crust. *Geological Society of America Bulletin*, 72:175-192, 1961.

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

VANSELOW, A.P. Nickel. In: CHAPMAN, H.D. (Ed.). *Diagnostic criteria for plants and soils*. Riverside, University of California, 1966. p.302-309.

WENG, L.P.; WOLTHOORN, A.; LEXMOND, T.M.; TEMMINGHOFF, E.J.M. & RIEMSDIJK, W.H. Understanding the effects of soil characteristics on phytotoxicity and bioavailability of nickel using speciation models. *Environmental Science and Technology*, 38:156-162, 2004.

WHITBY, L.M.; GAYNOR, J. & MACLEAN, A.J. Metals in soils of some agricultural watersheds in Ontario. *Canadian Journal of Soil Science*, 58:325-330, 1978.

WOOD, B.W.; REILLY, C.C. & NYCZEPIR, A.P. Field deficiency of nickel in trees: symptoms and causes. *Acta Horticulturae*, 721:83-97, 2006.

WOOD, B.W.; REILLY, C.C. & NYCZEPIR, A.P. Mouse-ear of pecan: I. Symptomatology and occurrence. *HortScience*, 39(1):87-94, 2004.

CAPÍTULO II - NÍQUEL NA SOJA CULTIVADA EM SOLOS DE CLASSES TEXTURAIS CONTRASTANTES SOB CONDIÇÕES CONTROLADAS

RESUMO

O Ni é componente estrutural das enzimas urease e hidrogenase, que desempenham função no metabolismo do N nas plantas leguminosas. A textura do solo pode influenciar na disponibilidade de Ni interferindo na resposta da soja (*Glycine max* [L.] Merrill) a esse micronutriente. O objetivo do trabalho foi avaliar a influência da aplicação de Ni no desenvolvimento morfológico, fisiológico e desempenho agrônômico de plantas de soja cultivadas em solos de classes texturais contrastantes. Foram realizados dois experimentos concomitantes em condições controladas, utilizando o cultivar de soja BRS 360 RR, cultivado em solo franco arenoso e solo muito argiloso, submetidos à aplicação de 0,0; 0,2; 0,4; 0,8; 1,0 e 5,0 mg dm⁻³ de Ni. Foram avaliados atividade enzimática da urease e nitrato redutase, conteúdo de clorofila, taxa fotossintética, massa seca das plantas, componentes de produtividade, análise do solo e tecido vegetal. Foram quantificados os teores de Ni disponíveis em Mehlich-1 e DTPA, teores foliares e nos grãos. Observou-se que a textura do solo influencia a disponibilidade de Ni para as plantas de soja e, conseqüentemente, a sua resposta a esse micronutriente. Aspectos fisiológicos e morfológicos das plantas de soja, como atividade da enzima urease, conteúdo de clorofila, taxa fotossintética e desenvolvimento do sistema radicular são potencializados com a aplicação de doses em torno de 0,5 mg dm⁻³ de Ni, com maior incremento de resposta no solo franco arenoso. Essa dose proporcionou em média teores foliares de 0,36 mg kg⁻¹ de Ni, teores disponíveis de 0,23 mg dm⁻³ de Ni em DTPA e 0,47 mg dm⁻³ de Ni em Mehlich-1. Plantas de soja cultivadas em solo muito argiloso, sob aplicação de alta dose de Ni apresentaram sintomas de toxidez, com redução dos componentes de produtividade. A aplicação de Ni nas condições estudadas não se fez necessária. Há relação direta entre disponibilidade de Ni no solo e teores foliares, nos grãos e acúmulo nas plantas. A relação dos teores de Ni com atributos químicos dos solos e demais nutrientes no tecido vegetal apresentou particularidades para cada solo estudado. A exigência de Ni pelas plantas é baixa, sendo o teor na semente capaz de suprir algumas gerações.

Palavras chaves: Micronutrientes, fixação biológica de nitrogênio, urease, hidrogenase, *Glycine max*.

CAPÍTULO II - NICKEL IN SOYBEAN CULTIVATED IN SOILS OF CONTRASTING TEXTURAL CLASS UNDER CONTROLLED CONDITIONS

ABSTRACT

Nickel (Ni) is structural component of urease and hydrogenase enzymes, which play role in N metabolism of legume plants. Soil texture can influence Ni availability and interfere in the response of soybean (*Glycine max* [L.] Merrill) to this micronutrient. The objective of this work was to evaluate the influence of Ni application in the morphological development, physiological and agronomic performance of soybean plants grown under contrasting textural classes of soils. Two simultaneous experiments were conducted under greenhouse conditions, using soybean cultivar BRS 360 RR, grown in a sandy loam and clay soils, submitted to the application of 0.0; 0.2; 0.4; 0.8; 1.0 and 5.0 mg dm⁻³ of Ni. The following evaluations were made: urease and nitrate reductase activity, chlorophyll content, photosynthetic rate, plant dry mass, components of productivity, soil and plant tissue analysis. Ni were quantified in Mehlich-1 and DTPA extractions, leaves and grains. It was observed that soil texture influence Ni availability for soybean plants and, consequently, its response to this micronutrient. Physiological and morphological aspects of soybean plants as urease enzyme activity, chlorophyll content, photosynthetic rate and root system development are enhanced by applying doses around 0.5 mg dm⁻³ of Ni, with greater increment in the sandy loam soil. This dose lead to an average leaf concentrations of 0.36 mg kg⁻¹ of Ni and soil available levels of 0.23 mg dm⁻³ of Ni in DTPA and 0.47 mg dm⁻³ of Ni in Mehlich-1. Soybean plants grown in clay soil under application of high dose of Ni showed symptoms of toxicity, with reduction of productivity components. Ni application in the studied conditions showed not be required. There is a direct relationship among Ni availability in soil, foliar and grain concentration and accumulation in plants. The relationship among Ni availability with chemical attributes of soils and other nutrients into the plant tissue presented particularities for each soil. Ni requirement by plants is low, being Ni content in the seeds is able to supply some generations.

Key words: Micronutrients, biological nitrogen fixation, urease, hydrogenase, *Glycine max*.

2.1 INTRODUÇÃO

A primeira constatação de essencialidade do níquel (Ni) foi realizada por Dixon et al. (1975), os quais demonstraram que o Ni é componente estrutural da enzima urease que desdobra a ureia ($\text{CO}[\text{NH}_2]_2$) hidroliticamente em amônia (NH_3) e dióxido de carbono (CO_2). A essencialidade nas plantas superiores foi evidenciada por Eskew et al. (1983) cultivando soja (*Glycine max* [L.] Merrill) em solução nutritiva, as quais apresentaram necrose na extremidade dos folíolos devido acúmulo de ureia em concentrações tóxicas, consequência da baixa atividade da urease em razão da deficiência de Ni. Trabalhos posteriores de Eskew et al. (1984) e Brown et al. (1987), com feijão (*Vigna unguiculata* [L.]) e cevada (*Hordeum vulgare* [L.]) confirmaram a essencialidade e inseriram o Ni como micronutriente, após verificarem que as sementes das plantas de cevada cultivadas em solução nutritiva com ausência em Ni, após três gerações, eram inviáveis e não germinavam adequadamente.

As leguminosas apresentam alta atividade da urease, pois os ureídeos, que realizam o transporte do nitrogênio (N) advindo da fixação biológica de nitrogênio (FBN) no tecido vegetal, catalisam a molécula da ureia que posteriormente é metabolizada pela urease (McClure & Israel, 1979). O Ni também exerce outro papel primordial na FBN, por ser constituinte estrutural da enzima hidrogenase (Kim & Maier, 1990; Sellstedt & Smith, 1990; Stults et al., 1984), que reprocessa o gás hidrogênio (H_2), gerado pela enzima nitrogenase para romper as triplas ligações da molécula do N atmosférico (N_2) no processo de FBN, gerando assim, energia que é realocada para a enzima nitrogenase, ou seja, ocorrendo reciclagem energética (Evans et al., 1987; López et al., 1983).

Estudos constataam que o Ni também exerce interferência no metabolismo de aminoácidos e de ácidos orgânicos (Bai et al., 2006; Brown et al., 1990; Shimada et al., 1980; Walker et al., 1985), na produção de etileno (Singh et al., 1994; Smith & Woodburn, 1984), na germinação das sementes (Brown et al., 1987) e na resistência das plantas a doenças (Forsyth & Peturson, 1959; Graham et al., 1985; Wells & Wood, 2008).

Apesar das funções desempenhadas pelo Ni no metabolismo das plantas, não existe recomendação oficial para sua aplicação na cultura da soja no Brasil. Acredita-se que a resposta dessa leguminosa ao Ni depende diretamente dos teores disponíveis no solo, que por sua vez, são influenciados pelas características de cada solo, tais como: teores de óxidos de ferro (Fe) e manganês (Mn), interações entre fatores como pH, teor de matéria orgânica no

solo (MOS), classe textural e composição das argilas, potencial redox, competição pelos sítios de adsorção, reações de complexação e atividade microbiana (Amaral Sobrinho et al., 2009).

A classe textural do solo é fator importante no controle da disponibilidade do Ni às plantas. Vários pesquisadores demonstraram que a distribuição de metais pesados, como o Ni, ocorre de acordo com o tamanho das partículas do solo. As partículas mais finas têm concentrações mais altas de Ni, devido a maior área superficial específica (ASE) e maior quantidade de cargas negativas na superfície. O aumento do teor de Ni com a diminuição do diâmetro das frações do solo indica que o comportamento desse micronutriente é governado por processos de adsorção (Caridad-Cancela et al., 2005; Förstner & Salomons, 1980; LeRiche & Weir, 1963; Painter et al., 1953; Qian et al., 1996; Tiller, 1958).

Portanto, desenvolver estudos para avaliar o potencial de resposta da soja ao Ni em solos de classes texturais contrastantes é de fundamental importância para compreender o comportamento desse micronutriente no solo e na planta, visando estabelecer critérios para recomendação de adubação. Desta forma, o objetivo desse estudo foi avaliar a influência da aplicação de Ni no desenvolvimento morfológico, fisiológico e desempenho agrônomico de plantas de soja cultivadas em solos de classes texturais contrastantes.

2.2 MATERIAL E MÉTODOS

2.2.1 LOCAL

O experimento foi realizado em ambiente controlado no período de novembro de 2012 a abril de 2013, na Fazenda Santa Terezinha da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária / Centro Nacional de Pesquisa de Soja (EMBRAPA SOJA), Londrina, Paraná (PR), Brasil.

2.2.2 CARACTERIZAÇÃO DOS SOLOS

Foram utilizados dois solos, coletados na profundidade de 0 a 20 cm, nos municípios de Palotina (24° 17' 02" S e 53° 50' 24" W) e Iporã (24° 00' 10" S e 53° 42' 14" W), PR, sendo um LATOSSOLO VERMELHO Eutroférico típico (LVef) e um LATOSSOLO VERMELHO Distrófico típico (LVd), respectivamente (EMBRAPA SOLOS, 2006). Os solos apresentavam as seguintes características químicas e físicas, LVef: areia - 11 g kg⁻¹, silte - 12 g kg⁻¹ e argila - 77 g kg⁻¹, classe textural muito argilosa (EMBRAPA SOLOS, 2006), MOS - 12,6 g dm⁻³; pH (CaCl₂) - 4,35; alumínio (Al) - 0,61 cmol_c dm⁻³; hidrogênio (H) + Al - 6,69

cmol_c dm⁻³; fósforo (P) - 60 mg dm⁻³; potássio (K) - 0,79 cmol_c dm⁻³; cálcio (Ca) - 4,03 cmol_c dm⁻³; magnésio (Mg) - 0,71 cmol_c dm⁻³; enxofre (S-SO₄) - 4,8 mg dm⁻³; boro (B) - 0,98 mg dm⁻³; cobre (Cu) - 7,57 mg dm⁻³; Fe - 40 mg dm⁻³; Mn - 222,5 mg dm⁻³; zinco (Zn) - 9,23 mg dm⁻³, Ni - 0,37 mg dm⁻³ (Mehlich-1) e 0,15 mg dm⁻³ (DTPA); LVd: areia - 76 g kg⁻¹, silte - 4 g kg⁻¹ e argila - 20 g kg⁻¹, classe textural franco arenosa (EMBRAPA SOLOS, 2006), MOS - 0,78 g dm⁻³; pH (CaCl₂) - 3,4; Al - 1,11 cmol_c dm⁻³; H + Al - 3,97 cmol_c dm⁻³; P - 1,95 mg dm⁻³; K - 0,02 cmol_c dm⁻³; Ca - 0,81 cmol_c dm⁻³; Mg - 0,13 cmol_c dm⁻³; S-SO₄ - 144,5 mg dm⁻³; B - 0,17 mg dm⁻³; Cu - 0,95 mg dm⁻³; Fe - 24 mg dm⁻³; Mn - 5 mg dm⁻³; Zn - 0,43 mg dm⁻³, Ni < 0,10 mg dm⁻³ (Mehlich-1) e < 0,013 mg dm⁻³ (DTPA).

2.2.3 DELINEAMENTO EXPERIMENTAL E TRATAMENTOS

Dois experimentos foram conduzidos concomitantemente em delineamento experimental inteiramente casualizado (DIC). Cada experimento consistia de um tipo de solo, um com classe textural franco arenoso e outro muito argiloso, submetidos a seis doses de Ni (0,0; 0,2; 0,4; 0,8; 1,0 e 5,0 mg dm⁻³), efetuando-se quatro repetições por tratamento, totalizando 24 parcelas.

2.2.4 DESENVOLVIMENTO EXPERIMENTAL E MANEJO

As amostras dos solos foram secas ao ar, tamisadas em peneiras de 2 mm, em seguida, alocadas em vasos de 3 dm³. Juntamente com esse procedimento, foi efetuada a correção da acidez dos solos, empregando uma mistura de carbonato de cálcio (CaCO₃) + carbonato de magnésio (MgCO₃) na proporção de 3:1, que foi incorporada ao solo visando elevar a saturação por bases (V%) a 70%. A adubação foi realizada de acordo com Malavolta (1980), com solução nutritiva nas doses de: 200 mg dm⁻³ de P, 50 mg dm⁻³ de K, 25 mg dm⁻³ de S, 5 mg dm⁻³ de cloro (Cl), 5 mg dm⁻³ de Mn, 3 mg dm⁻³ de Zn, 1 mg dm⁻³ de B, 1 mg dm⁻³ de Cu, 0,5 mg dm⁻³ de molibdênio (Mo) e 0,1 mg dm⁻³ de cobalto (Co). Na adubação de cobertura foram fornecidos K e S, nas doses de 50 e 25 mg dm⁻³, respectivamente, quando as plantas se encontravam entre os estádios V3 ou V4 (Fehr & Caviness, 1977) e no início do florescimento (R1), com exceção do S, aplicado apenas no estágio vegetativo. A aplicação do Ni foi efetuada juntamente com a adubação de semeadura, utilizando como fonte o sulfato de Ni (NiSO₄.6H₂O).

Após a correção da acidez dos solos esses foram mantidos incubados por 15 dias até realizar a adubação de semeadura, posteriormente foram mantidos mais 15 dias incubados,

totalizando 30 dias desde a correção até a semeadura da soja. No período destinado a incubação a umidade dos solos é mantida em aproximadamente 50% da capacidade de retenção de água. A semeadura do cultivar BRS 360 RR foi realizada logo em seguida na profundidade de 1 cm. Foram semeadas oito sementes por vaso e procederam-se desbastes periódicos até restarem duas plantas por vaso. As sementes foram inoculadas com 2 mL kg⁻¹ (EMBRAPA SOJA, 2011) do produto comercial líquido SEMIA 5019 e SEMIA 5079, que continha as estirpes *Bradyrhizobium elkanii* e *Bradyrhizobium japonicum*, respectivamente. Foi efetuada nova inoculação no solo quando as plantas estavam no estágio de desenvolvimento entre V3 e V4, empregando-se uma solução com dose seis vezes maior que a utilizada nas sementes (EMBRAPA SOJA, 2011). A segunda inoculação foi realizada para garantir a efetividade da FBN.

Durante o ciclo de desenvolvimento das plantas foram efetuadas irrigações periódicas com água deionizada e o controle fitossanitário foi realizado sempre que necessário.

2.2.5 VARIÁVEIS ANÁLISADAS

Medições indiretas do teor de clorofila foram realizadas com um medidor eletrônico portátil de intensidade da cor verde das plantas (SPAD), modelo Digital SPAD 502. A leitura foi efetuada em dois pontos do folíolo central da terceira folha da haste principal, do terço superior, nos estádios de desenvolvimento V5, V6, R1, R3, R5 e R7.

No estágio R1 foi coletada a quarta folha do terço superior das plantas para quantificação das atividades das enzimas urease e nitrato redutase. Nesse mesmo estágio de desenvolvimento foi determinada a taxa fotossintética na terceira folha da haste principal, do terço superior, utilizando o aparelho *Infra Red Gás Analyser* (IRGA) modelo Li-Cor LI-6400XT.

A terceira folha e pecíolo do terço superior da haste principal foram coletados para análise foliar, quando as plantas encontravam-se no estágio de desenvolvimento R2 (EMBRAPA SOJA, 2011).

Ao final do ciclo (R9) as plantas foram separadas em raiz, caule, hastes, folhas e vagens. O material vegetal foi seco em estufa com circulação de ar, a aproximadamente 60 a 65°C, por 72 horas. Após esse procedimento foi determinada a massa seca das raízes, caule, haste, folhas e vagens. A massa seca total foi obtida a partir do somatório da massa seca de todas as partes avaliadas. O acúmulo de Ni nas plantas foi calculado a partir dos teores de Ni

da parte aérea das plantas de soja em estádio R9, multiplicando pela massa seca da parte aérea.

Foram realizadas avaliações dos componentes de produtividade (massa seca e número de vagens e grãos), com posterior análise dos grãos. Foi efetuada análise do solo após a coleta das plantas.

2.2.5.1 Determinação da atividade da enzima nitrato redutase

Metodologia adaptada de Hewitt & Smith (1975) e Mulder et al. (1959). Na extração foi utilizado 0,3 g de massa fresca vegetal, cortadas em fatias de 1 mm de largura e evitando as nervuras, sendo alocadas em tubos de ensaio contendo 4 mL de nitrato de potássio (KNO_3 0,25 mol L^{-1}) em tampão de fosfato (pH 7,4), composto por fosfato monossódico (NaH_2PO_4 0,20 mol L^{-1}) e fosfato de sódio dibásico (Na_2HPO_4 0,50 mol L^{-1}). O tampão continha nitrato (NO_3^-) para a enzima nitrato redutase, presente na folha, converter NO_3^- em nitrito (NO_2^-). Em seguida, as amostras foram incubadas em banho maria a 37°C por 2 horas, protegidos da luz com folhas de Al que recobriam os tubos e efetuadas agitação em intervalos frequentes. Após a incubação foi retirada uma alíquota de 1 mL do extrato vegetal e para paralisar as reações químicas até então ocorridas foi adicionado 1 mL de ácido sulfanílico ($\text{C}_6\text{H}_7\text{HO}_3\text{S}$) a 1% em ácido clorídrico (HCl 2 N). Após repouso de 5 a 10 minutos foi adicionado 1 mL de alfa naftilamina ($\text{C}_{10}\text{H}_7\text{NH}_2$ 193 mmol L^{-1}) com objetivo de conferir coloração ao NO_2^- e efetuada leve agitação, seguida da aplicação de 1 mL de acetato de sódio (CH_3COONa 2 mol L^{-1}). Os tubos foram tampados, realizada nova agitação e a determinação da absorvância foi efetuada em espectrofotômetro modelo LAMBDA 25 UV/Vis a 540 nm. A atividade da enzima foi determinada pela quantidade de NO_2^- produzida, a qual foi comparada com os valores obtidos em uma curva padrão de NO_2^- , preparada previamente com nitrito de sódio (NaNO_2).

2.2.5.2 Determinação da atividade da enzima urease

Metodologia adaptada de Hogan et al. (1983) e McCullough (1967). Na extração foi utilizado 0,2 g de massa fresca vegetal, cortadas em fatias de 1 mm de largura evitando as nervuras e colocadas em tubos de ensaio contendo 8 mL de tampão fosfato com ureia (pH 7,4), para determinação do teor de NH_3 . O tampão foi preparado com fosfato monossódico (NaH_2PO_4 0,2 mol L^{-1}), fosfato de sódio dibásico (Na_2HPO_4 0,5 mol L^{-1}), n-propanol (0,66 mol L^{-1}) e ureia ($\text{CO}[\text{NH}_2]_2$ 0,21 mol L^{-1}). O n-propanol foi utilizado para aumentar a permeabilidade dos tecidos e evitar a formação de amônio (NH_4^+) pela presença de micro-

organismos. As amostras foram incubadas em banho maria a 30°C por 3 horas, protegidas da luz com folhas de Al ao redor dos tubos e foram efetuadas agitação em intervalos frequentes. Após a incubação foi retirada uma alíquota de 0,5 mL do extrato vegetal e a NH₃ retida nos tecidos foliares foi extraída pela adição de 2,5 mL do reagente I: fenol (C₆H₅OH 0,1 mol L⁻¹) e nitroprussiato de sódio (SNP) (Na₂[Fe(CN)₅NO] 170 μmol L⁻¹). Posteriormente foram adicionados aos tubos mais 2,5 mL do reagente II: hidróxido de sódio (NaOH 0,125 mol L⁻¹), fosfato dissódico (Na₂PO₄.12H₂O 0,15 mol L⁻¹) e hipoclorito de sódio (NaOCl) (3% Cl₂). Os tubos foram tampados, para evitar a perda de NH₃, recobertos com folhas de Al e mantidos em banho maria a 37°C por 35 minutos. Em seguida foi realizada a leitura da absorvância em espectrofotômetro a 625 nm. A atividade da enzima foi determinada pela quantidade de NH₄⁺ produzido e, os valores obtidos, foram comparados com uma curva padrão, previamente estabelecida utilizando-se cloreto de amônio (NH₄Cl).

2.2.5.3 Análises dos solos e do tecido vegetal

As análises de solo foram realizadas segundo metodologia da EMBRAPA (2009), com exceção da determinação de C, S-SO₄, B e Ni (DTPA) efetuadas conforme Raij et al. (2001). O teor de Ni disponível foi obtido por extrações simples, em Mehlich-1, relação solo:solução 1:10, e DTPA, relação solo:solução 10:20, sendo quantificado em espectrometria de emissão atômica (ICP-OES) modelo PerkinElmer Optima 8300 DV. A textura foi determinada pelo método da pipeta conforme descrito em Camargo et al. (1986), utilizando como dispersante químico o hidróxido de sódio (NaOH) e hexametáfosfato de sódio (Na[NaPO₃]_nONa).

Para quantificação do N total no tecido vegetal foi efetuada digestão sulfúrica em sistema aberto (Jackson, 1958) e determinação de acordo com o método analítico Kjeldahl (Bremner & Edwards, 1965). Para determinação dos macro e micronutrientes no tecido vegetal as amostras foram digeridas com ácido nítrico (HNO₃), em sistema fechado em forno micro-ondas, modelo Mars Xpress (CEM), com posterior quantificação em ICP-OES (Malavolta et al., 1997). Para determinação dos teores de Ni no tecido vegetal o método analítico foi otimizado objetivando concentrar o extrato de determinação, para isso foram adicionados 6 mL de HNO₃ em 0,5 g de massa seca vegetal moída e realizada pré digestão das amostras durante 30 minutos antes de serem levadas ao forno micro-ondas previamente programado para atingir a temperatura de 170 °C. Ao término da digestão as amostras eram diluídas para 15 mL utilizando água pura.

Os limites de quantificação do Ni em ICP-OES para o tecido vegetal foi de 0,084 mg kg⁻¹ e Ni disponível no solo de 0,1 e 0,013 mg dm⁻³ para Mehlich-1 e DTPA, respectivamente. Amostras de referência de solo (BCR[®] - 142R) e tecido vegetal (*Trifolium repens* L.) (BCR[®] - 402) certificadas pela *European Commission - Joint Research Centre, Institute for Reference Materials and Measurements*, e amostra de grãos (*Vicia faba*) (IPE 903) certificadas pela *Wageningen Evaluating Programs for Analytical Laboratories, International Plant-Analytical exchange*, foram utilizadas para garantir o controle de qualidade das análises.

2.2.6 ANÁLISE ESTATÍSTICA

Os resultados foram submetidos à análise de variância (Teste F) e quando significativos foram ajustados por modelos de regressão. Teores de Ni disponível no solo, no tecido vegetal, massa de grãos, nutrientes e atributos químicos dos solos foram correlacionados pelo teste linear de Pearson. Os softwares utilizados para a análise estatística foram SigmaPlot 10.0 (2006) e *Statistical Analysis System* (SAS), conforme Pimentel-Gomes & Garcia (2002).

O delineamento experimental e as análises estatísticas do solo franco arenoso e muito argiloso foram realizados de maneira independente. Entretanto, são comparados de maneira descritiva em termos de resposta as variáveis avaliadas.

2.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A atividade da enzima urease variou de 3,08 a 17,18 μmol N-NH₄⁺ g MF⁻¹ h⁻¹ e de 5,85 a 13,18 μmol N-NH₄⁺ g MF⁻¹ h⁻¹ nas plantas cultivadas no solo franco arenoso e muito argiloso submetidas às doses de Ni, respectivamente. O comportamento dessa enzima pode ser explicado por meio de ajuste de uma equação gaussiana, na qual a enzima apresentou pico de atividade em doses estimadas de 0,5 e 0,6 mg dm⁻³ de Ni, nas plantas cultivadas no solo muito argiloso e franco arenoso, respectivamente (Figura 1). Resultados semelhantes foram verificados em plantas de soja cultivadas em solução nutritiva com o fornecimento de 0,001 a 0,1 mg L⁻¹ de Ni por Eskew et al. (1983; 1984), Klucas et al. (1983) e Krogmeier et al. (1991). Também em condições controladas, Dalton et al. (1985) cultivando soja em solos da Carolina do Norte verificaram acréscimos da atividade da urease até a dose de 1 mg dm⁻³ de Ni. Aumento da atividade da urease com fornecimento de Ni também foi verificado em cereais (Brown et al., 1987), cucurbitáceas (Gerendás & Sattelmacher, 1997a), arroz (*Oryza*

sativa [L.]) (Gerendás et al., 1998), colza (*Brassica napus* [L.]) (Gerendás & Sattelmacher, 1999), pecã (*Carya illinoensis*) (Bai et al., 2006), chá (Ghanati & Rahmati Ishka, 2006), tomate (*Solanum lycopersicum* [L.]) (Gad et al., 2007) e alface (*Lactuca sativa* [L.]) (Khoshgoftarmanesh et al., 2011; Oliveira et al., 2013). O aumento da atividade enzimática se deve ao Ni fazer parte do grupo prostético da urease (Dixon et al., 1975), enquanto a redução, com a aplicação das maiores doses, provavelmente está relacionado ao efeito tóxico uma vez que o Ni é um metal pesado.

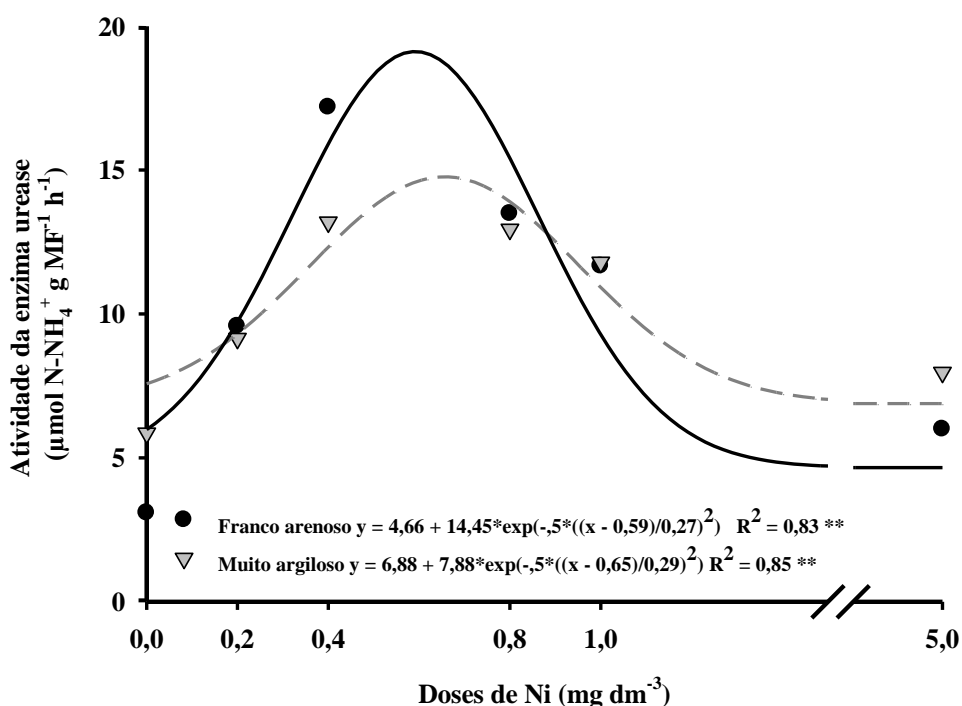


FIGURA 1. Atividade da enzima urease em plantas de soja (R1) cultivadas em solos de classes texturais contrastantes submetidos à aplicação de níquel (Ni) (** significativo a $p < 0,01$ pelo Teste de F).

A atividade da enzima nitrato redutase variou de 0,0714 a 0,1105 $\mu\text{mol N-NO}_2^- \text{ g MF}^{-1} \text{ h}^{-1}$ e de 0,0979 a 0,1318 $\mu\text{mol N-NO}_2^- \text{ g MF}^{-1} \text{ h}^{-1}$ nas plantas cultivadas no solo franco arenoso e muito argiloso, submetidos à aplicação de Ni, respectivamente. Houve tendência de aumento com a aplicação das menores doses de Ni, porém, não diferindo estatisticamente (Figura 2). Os resultados corroboram com Kevresan et al. (1998) que não verificaram influência do Ni sobre atividade da enzima nitrato redutase. A ausência de aplicação de N mineral, como nesse estudo, pode ser explicação para a baixa atividade da nitrato redutase, uma vez que o N assimilado pelas plantas de soja não foi obtido pela rota metabólica dessa enzima. A tendência de aumento da atividade da nitrato redutase pode estar relacionada a

absorção e assimilação de formas nítricas disponíveis dos solos estudados, consequência, do maior desenvolvimento do sistema radicular possibilitado pelo fornecimento de Ni.

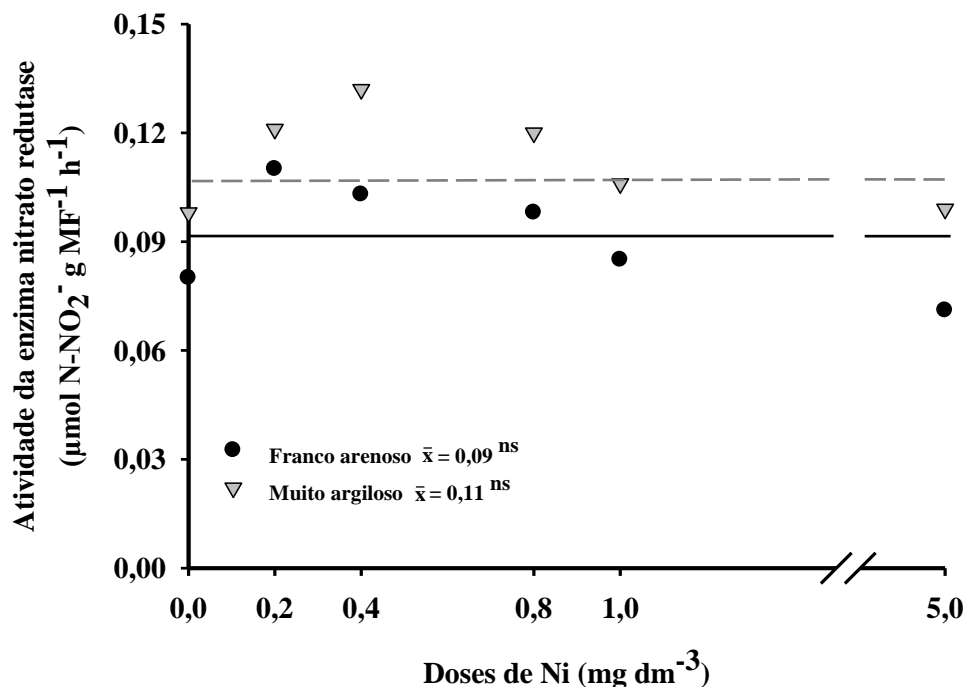


FIGURA 2. Atividade da enzima nitrato redutase em plantas de soja (R1) cultivadas em solos de classes texturais contrastantes submetidos à aplicação de níquel (Ni) (^{ns} não significativo a $p < 0,05$ pelo Teste de F).

O conteúdo de clorofila em R1, variou de 0,016 a 0,0209 mg cm⁻² e de 0,0179 a 0,0205 mg cm⁻² no solo franco arenoso e muito argiloso, respectivamente (Figura 3). A taxa fotossintética variou de 19,09 a 22,25 μmol CO₂ m⁻² s⁻¹ e de 19,2 a 23,37 μmol CO₂ m⁻² s⁻¹ no solo franco arenoso e muito argiloso, respectivamente (Figura 4). Ambas as variáveis apresentaram diferença estatística em função da aplicação de Ni. O conteúdo de clorofila pode ser explicado por meio de ajuste de uma equação gaussiana, com aumento estimado até a dose de 0,7 e 0,8 mg dm⁻³ de Ni nas plantas cultivadas no solo muito argiloso e franco arenoso, respectivamente. As plantas apresentaram pico da taxa fotossintética com aplicação de 0,2 mg dm⁻³ de Ni, para ambos os solos. O modelo para explicar o comportamento fotossintético em relação à aplicação de Ni é o *piecewise*.

Resultados similares foram obtidos por Wong & Chang (1991), que observaram aumento do conteúdo de clorofila em *Chlorella pyrenoidosa* (algas de água doce) nas doses de 0,1 a 1 mg L⁻¹ de Ni em cultura de tecido. Segundo McIlveen & Negusanti (1994), entre várias organelas celulares, os cloroplastos continham os maiores teores de Ni, entre 8 a 9,9%

do teor total, enquanto organelas como mitocôndrias e ribossomos apresentavam entre 0,32 a 2,85%. Também em condições controladas, Tan et al. (2000) observaram aumento do conteúdo de clorofila com aplicação de uréia e Ni quando comparado a ausência do fornecimento desse micronutriente em tomate. Em estudos semelhantes, Gerendás & Sattelmacher (1997b) constataram que a ureia fornecida em solução nutritiva sem aplicação de Ni reduziu o conteúdo de clorofila em centeio (*Secale cereale* [L.]), trigo (*Triticum aestivum* [L.]), colza, abobrinha (*Cucurbita pepo* [L.]) e girassol (*Helianthus annuus* [L.]). Estudando plantas de cevada nas mesmas condições, Rahman et al. (2005) verificaram aumento do conteúdo de clorofila nas doses de 0,1 a 1 mg L⁻¹ de Ni. Segundo Ilin et al. (2000), o Ni pode retardar a degradação da clorofila por radicais livres, devido seu efeito sobre a atividade de superóxido dismutase, conforme comprovado para microorganismos. Estudando aplicação de Ni, Mo e N em condições controladas, Moraes et al. (2009) verificaram aumento no conteúdo de clorofila e taxa fotossintética em plantas de arroz cultivadas em resposta ao Ni e Mo. Com exceção do último trabalho, não foram encontradas publicações sobre o efeito exercido pelo Ni na taxa fotossintética das plantas, menos, quando o objetivo era de se estudar os efeitos tóxicos desse micronutriente.

O comportamento fisiológico observado nas plantas de soja deve-se provavelmente ao efeito do aumento da atividade da enzima urease com aplicação das menores doses de Ni, que possibilitou maior assimilação de N por essas plantas. Por sua vez, o aumento do conteúdo de clorofila foi devido ao N ser constituinte da molécula de clorofila, pigmento esse que transforma energia solar em energia química no processo de fotossíntese nos vegetais. Ressalta-se que os atributos fisiológicos, atividade da enzima urease, conteúdo de clorofila e taxa fotossintética, apresentaram maior amplitude de resposta ao Ni nas plantas cultivadas no solo franco arenoso. Isso se deve aos menores teores disponíveis de Ni nesse solo.

O conteúdo de clorofila determinado nos estádios de desenvolvimento V5, V6, R3, R5 e R7 não diferiram em função da aplicação de Ni. Smith & Woodburn (1984) constataram que o Ni inibiu a produção de etileno em plantas de feijão e macieira (*Malus domestica* [L.]), por conseguinte aumentou o ciclo de desenvolvimento devido ao retardamento da senescência das plantas. Uma explicação para esse comportamento, segundo Zheng et al. (2006), é devido ao Ni⁺² substituir o Fe⁺² na ativação da enzima ACC oxidase, precursora do etileno. Isso resultando na formação de um complexo enzimático inativo, ocorrendo acúmulo da ACC oxidase no tecido vegetal e reduzindo a síntese do etileno. Portanto, pode-se afirmar com base na intensidade da coloração verde das folhas, ou seja, de maneira indireta, que as plantas de

soja não diferiram quanto ao início do período de senescência, portanto, provavelmente o teor de etileno nas plantas de soja não foi afetado pela aplicação de Ni nas condições estudadas.

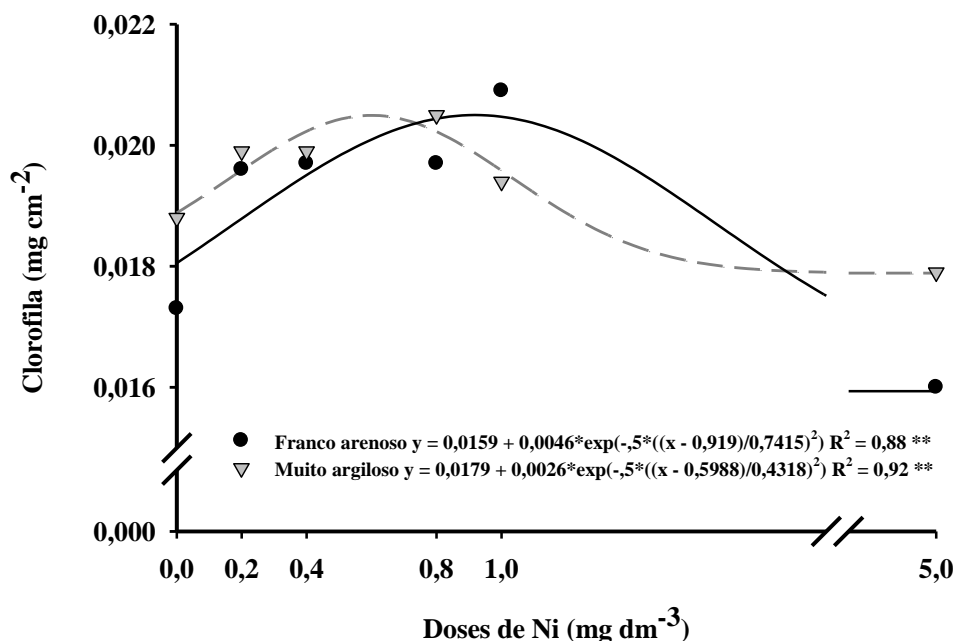
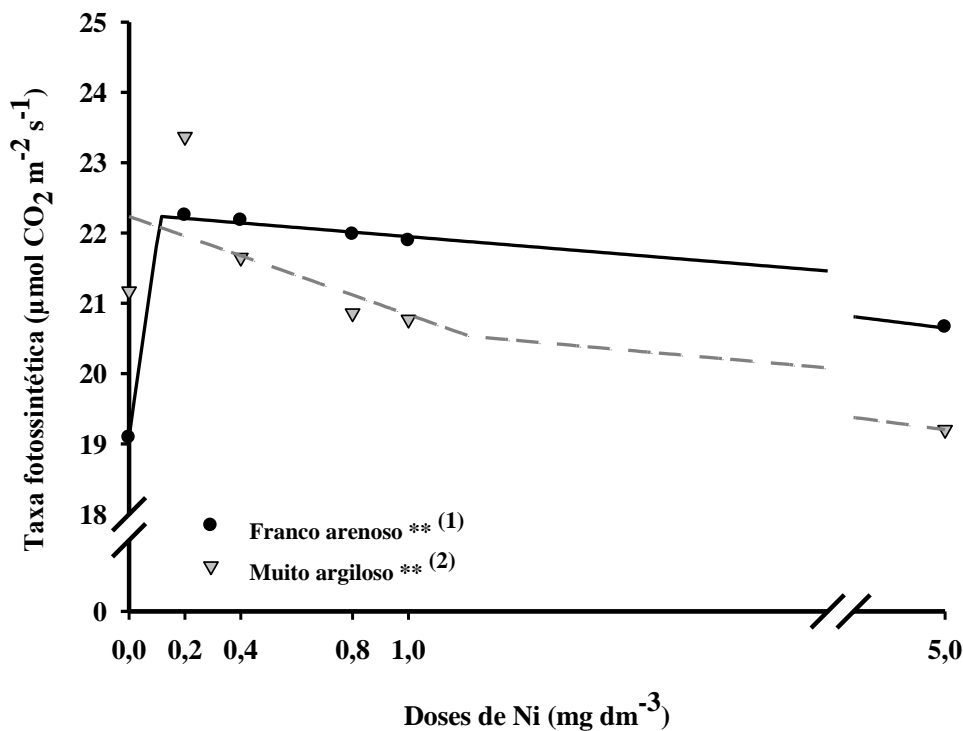


FIGURA 3. Conteúdo de clorofila em plantas de soja (R1) cultivadas em solos de classes texturais contrastantes submetidos à aplicação de níquel (Ni) (** significativo a $p < 0,01$ pelo Teste de F).

Os teores de N total variaram de 30,05 a 35,85 g kg⁻¹ e de 31,43 a 34,10 g kg⁻¹ nas plantas cultivadas no solo franco arenoso e muito argiloso, respectivamente. Houve tendência de aumento do teor de N com a aplicação das doses de Ni, porém, não diferiram estatisticamente (Figura 5). Esses resultados corroboram com os obtidos em plantas de colza (Gerendás & Sattelmacher, 1999), umbuzeiro (*Spondias tuberosa* [L.]) (Neves et al., 2007) e alface (Oliveira et al., 2013) submetidas a aplicação de Ni. Por outro lado, Tan et al. (2000) verificaram aumento no teor de N total em tomate com aplicação de Ni até a dose de 0,1 mg L⁻¹ de Ni. Em condições similares, Arkoun et al. (2013) estudaram a influência do Ni e de um inibidor da urease em plantas de colza, com e sem fornecimento de ureia. Esses autores verificaram que a ausência de Ni e a inibição da atividade da enzima urease afetam diretamente o metabolismo do N nas plantas, reduzindo a atividade das principais enzimas relacionadas à assimilação de N no tecido vegetal, glutamina sintetase (GS), glutamato sintetase (GOGAT) e glutamato desidrogenase (GDH), concluindo a necessidade de fornecimento de Ni as plantas.



⁽¹⁾ $y = (19,09 (0,1 - x) + 22,09(x - 0,1)) / (0,1 - x)$ $R^2 = 0,99$ ** e $y = (22,23(x - 0,1) + 20,64 (x - 0,1)) / (x - 0,1)$ $R^2 = 0,99$ **; ⁽²⁾ $y = (22,23 (1,22 - x) + 20,52(x - 1,22)) / (1,22 - x)$ $R^2 = 0,80$ ** e $y = (20,52(1,22 - x) + 19,2(x - 1,22)) / (x - 1,22)$ $R^2 = 0,80$ **.

FIGURA 4. Taxa fotossintética em plantas de soja (R1) cultivadas em solos de classes texturais contrastantes submetidos à aplicação de níquel (Ni) (** significativo a $p < 0,01$ pelo Teste de F).

A variável massa seca das plantas de soja apresentou evidente influência da textura do solo, independente da aplicação de Ni. A massa seca total das plantas variou de 18,33 a 20,75 g/planta e de 23,53 a 33,71 g/planta no solo franco arenoso e muito argiloso, respectivamente. A massa seca da parte aérea (folha, vagem, caule e haste) variou de 12,28 a 14,25 g/planta e de 13,8 a 20,21 g/planta no solo franco arenoso e muito argiloso, respectivamente. A massa seca da parte aérea das plantas cultivadas no solo franco arenoso, bem como a massa seca total, não diferiram estatisticamente em razão da aplicação de Ni. Comportamento não verificado para as plantas cultivadas no solo muito argiloso, que de maneira geral, apresentaram redução de biomassa, principalmente na dose 5 mg dm⁻³ de Ni (Figura 6). Esse comportamento pode ser justificado pelos teores disponíveis iniciais de Ni nos solos estudados, ou seja, teores maiores no solo muito argiloso, provavelmente causando efeito tóxico desse micronutriente nas plantas sob dose de 5 mg dm⁻³. Oliveira et al. (2013) e Gerendás & Sattelmacher (1997b) não verificaram aumento da massa seca de plantas de alface e centeio com o fornecimento de Ni. Todavia, a influência do fornecimento de Ni

proporcionando maior crescimento em plantas é relatado por vários pesquisadores, para diversas espécies vegetais (Arnon, 1937; Gerendás & Sattelmacher, 1997a; 1997b; Nicouland & Bloom, 1998; Xue et al., 2000; Khoshgoftarmanesh et al., 2011; Arkoun et al., 2013), incluindo plantas de soja cultivadas em solução nutritiva (Krogmeier et al., 1991).

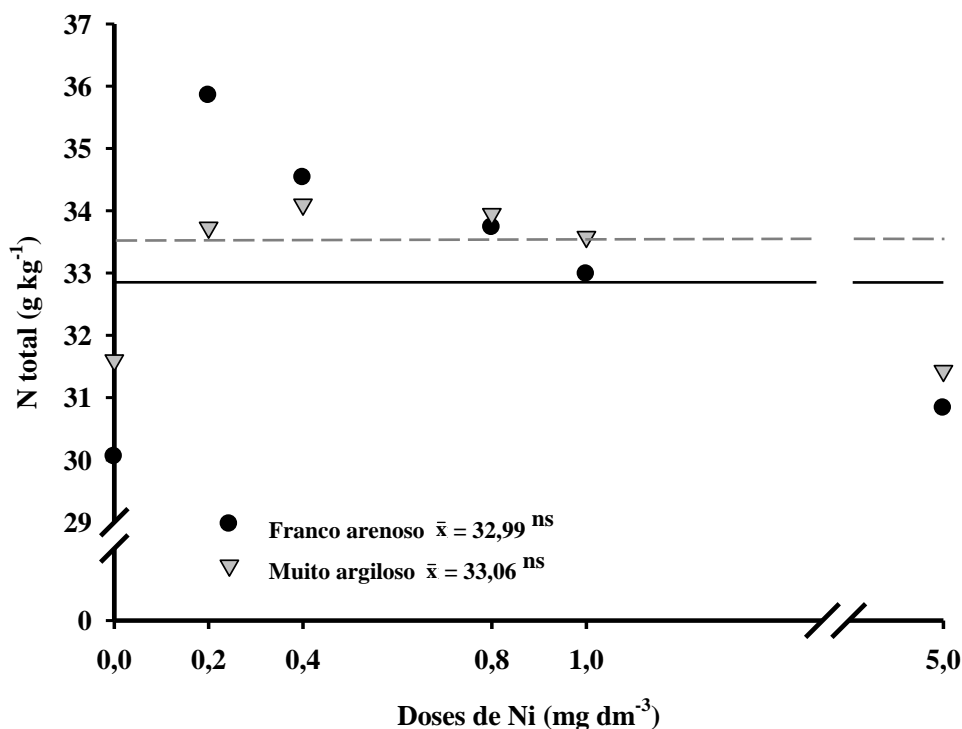


FIGURA 5. Nitrogênio (N) total em plantas de soja (R2) cultivadas em solos de classes texturais contrastantes submetidos à aplicação de níquel (Ni) (^{ns} não significativo a $p < 0,05$ pelo Teste de F).

A massa seca do sistema radicular da soja variou de 5,17 a 6,66 g/planta e de 9,72 a 15,57 g/planta nas plantas cultivadas no solo franco arenoso e muito argiloso, respectivamente, diferindo estatisticamente em função da aplicação de Ni (Figura 6). O comportamento do sistema radicular pode ser explicado por meio de ajuste de uma equação gaussiana, com máximo desenvolvimento estimado nas doses de 0,7 e 0,9 mg dm⁻³ de Ni, nas plantas cultivadas no solo franco arenoso e muito argiloso, respectivamente. Esse aumento pode ser devido ao Ni ser componente estrutural da enzima hidrogenase, que provavelmente possibilitou maior eficiência dos nódulos no sistema radicular, por consequência, proporcionando maior desenvolvimento do mesmo. Resultados similares foram obtidos por Klucas et al. (1983), que verificaram aumento da atividade da hidrogenase em bacterióides isolados dos nódulos do sistema radicular de plantas de soja com fornecimento de Ni. Os resultados do presente estudo corroboram com Bertrand & Wolf (1954), que verificaram altos

teores de Ni nos nódulos do sistema radicular de leguminosas. Estudo realizado por Ureta et al. (2005), demonstram que níveis abaixo de $0,1 \text{ mg kg}^{-1}$ de Ni podem limitar a atividade da hidrogenase simbiótica de *Rhizobium leguminosarum*. Enquanto Bertrand (1973) verificou que a adubação de até $0,02 \text{ mg dm}^{-3}$ de Ni aumentou a nodulação em plantas de soja.

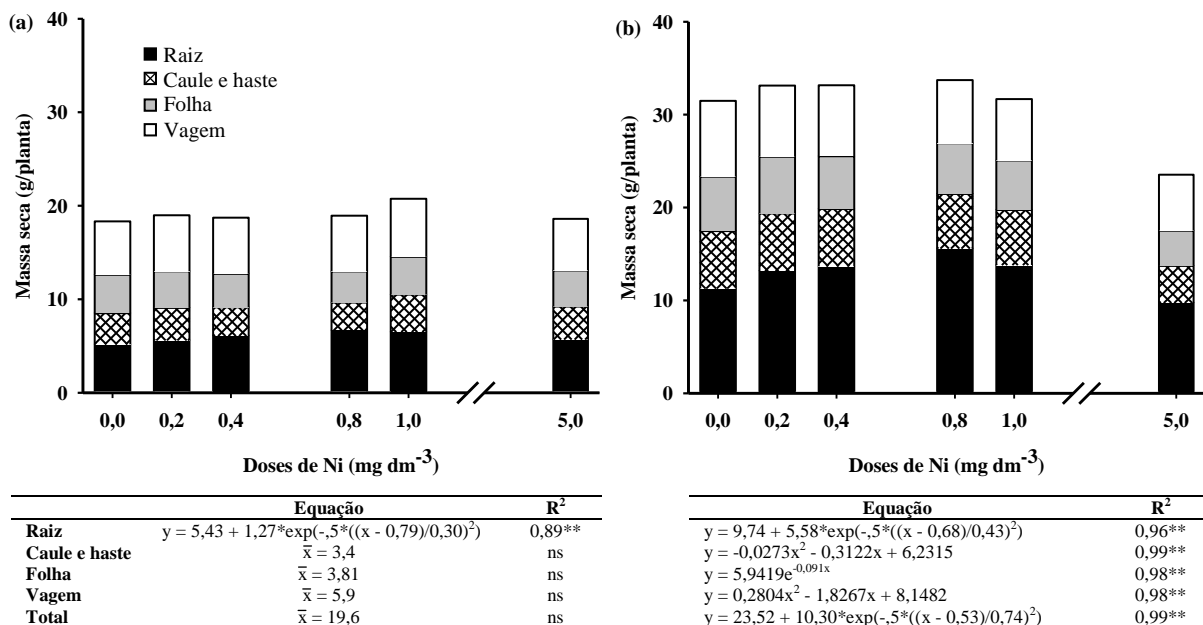


FIGURA 6. Massa seca de plantas de soja (R9) cultivadas no solo (a) franco arenoso e (b) muito argiloso submetidos a doses de níquel (Ni) (ns não significativo; ** significativo ao nível de $p < 0,01$ pelo Teste de F).

No estágio de desenvolvimento R1 observou-se comportamento semelhante ao verificado para a massa seca total, no qual as plantas de soja cultivadas no solo muito argiloso na dose de 5 mg dm^{-3} de Ni, apresentavam menor desenvolvimento (Figura 7). Sintomas de toxidez foram visíveis nas folhas a partir do estágio de desenvolvimento R5 (Figura 8), fato não observado para as plantas cultivadas no solo franco arenoso. Esses sintomas de toxidez de Ni são característicos aos relatados na literatura: as plantas apresentam amarelecimento entre as nervuras, semelhante à deficiência de Mn (Hewitt, 1953), crescimento reduzido das raízes e da parte aérea, podendo, em casos mais severos, apresentar deformação de várias partes da planta e manchas peculiares nas folhas (Mishra & Kar, 1974).

O comportamento verificado nas plantas de soja submetidas à aplicação de Ni esta relacionado aos teores disponíveis de Ni no solo, bem como às quantidades absorvidas.

Os teores disponíveis de Ni no solo aumentaram com a aplicação das doses de Ni, sendo que no solo franco arenoso os teores variaram de $< 0,1$ a $1,57 \text{ mg dm}^{-3}$ e de $< 0,013$ a

0,94 mg dm⁻³ em Mehlich-1 e DTPA, respectivamente. O solo muito argiloso apresentou maior disponibilidade de Ni, com teores variando de 0,45 a 2,74 mg dm⁻³ e de 0,18 a 1,59 mg dm⁻³ em Mehlich-1 e DTPA, respectivamente (Figura 9).

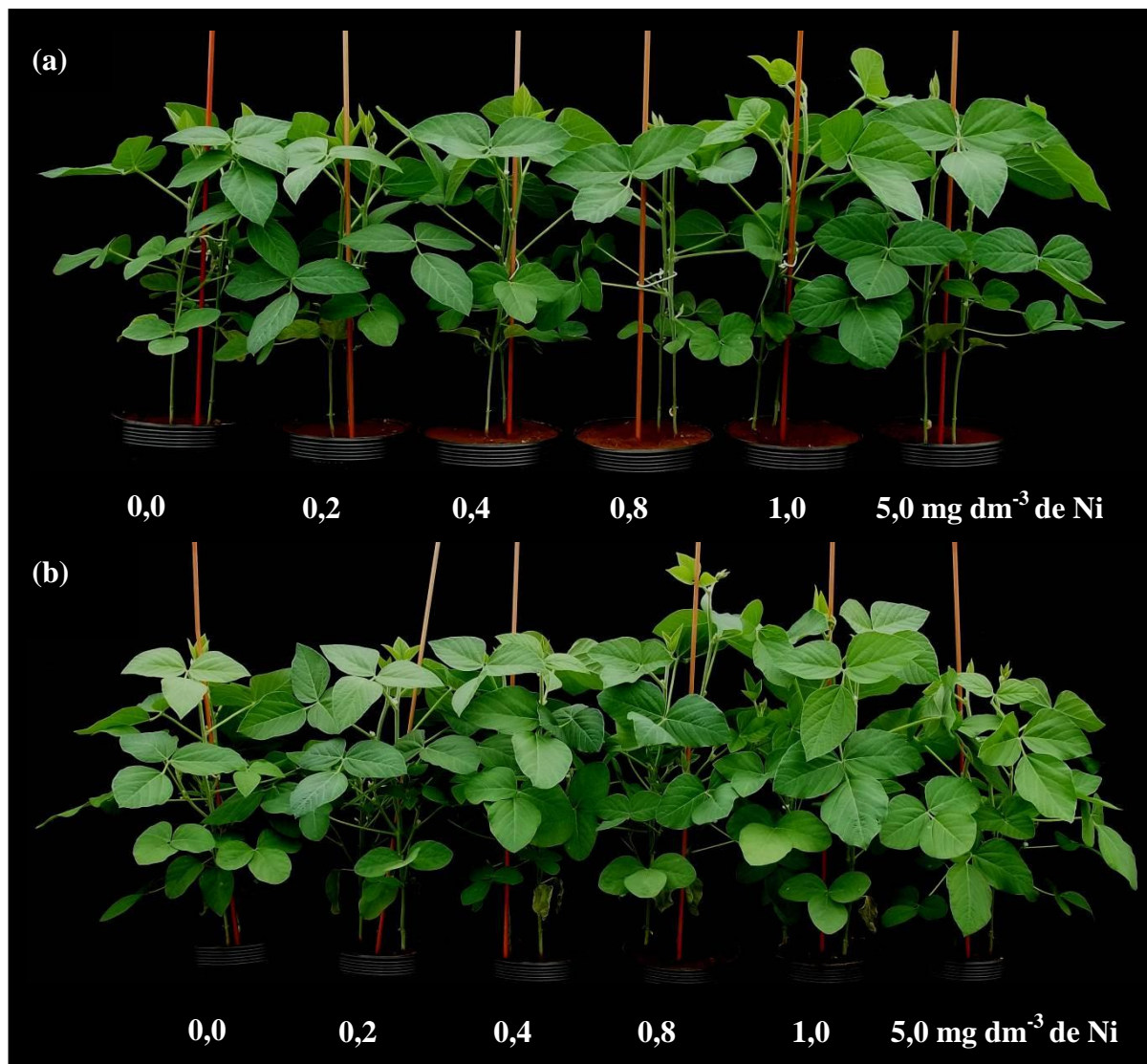


FIGURA 7. Plantas de soja no início do florescimento (R1), cultivadas em solo (a) franco arenoso e (b) muito argiloso, submetidas a doses de níquel (Ni).

As plantas cultivadas no solo franco arenoso apresentaram maiores teores foliares de Ni variando de 0,08 a 2,78 mg kg⁻¹, enquanto os teores nas plantas cultivadas no solo muito argiloso variaram de 0,17 a 1,6 mg kg⁻¹ (Figura 10). Isso pode ser explicado pela pronta disponibilidade de Ni na solução do solo franco arenoso, pois, devido a menor ASE ocorre menor adsorção de Ni, conseqüentemente, menor efeito tamponante. Enquanto no solo muito argiloso, mesmo apresentando maiores teores disponíveis determinados em Mehlich-1 e DTPA (Figura 9), ocorre fornecimento gradativo de Ni para as plantas, devido a maior

adsorção do Ni nos minerais silicatados da fração argila, MOS e os óxidos de Fe e Mn (Amaral Sobrinho et al., 2009). A diminuição dos teores de Ni nas plantas cultivadas no solo muito argiloso deve-se também a um provável efeito de diluição desse micronutriente no tecido vegetal. Este efeito é caracterizado quando a taxa de crescimento de massa seca é superior à taxa de absorção relativa do nutriente.



FIGURA 8. Sintomas de toxidez de níquel (Ni) em soja cultivada em solo muito argiloso, submetido à aplicação de $5,0 \text{ mg dm}^{-3}$ de Ni.

Plantas cultivadas em solos não contaminados apresentaram teores foliares entre $0,05$ a 5 mg kg^{-1} de Ni (Brooks, 1980; Welch, 1981), faixa semelhante a obtida nesse estudo. Teores adequados para o suprimento das plantas variam de $0,01$ a 10 mg kg^{-1} (Gerendás et al., 1999; Brown et al., 1987), apresentando grande amplitude de variação se comparados aos demais nutrientes essenciais. Essa variação está relacionada, principalmente, as diferenças na absorção, transporte e translocação de Ni entre espécies vegetais ou mesmo entre genótipos/cultivares (Rebafka et al., 1990), bem como pelos teores disponíveis no solo. Níveis foliares excessivos/tóxicos ocorrem geralmente entre 10 a 50 mg kg^{-1} de Ni (Bollard, 1983;

Welch, 1981). Ressalta-se que esses valores foliares comumente relatados na literatura são superiores aos verificados nesse estudo, no qual a toxidez ocorreu com concentrações foliares em torno de 2 mg kg^{-1} de Ni.

Contudo, os teores de Ni nos grãos de soja apresentam comportamento inverso ao observado para os teores foliares, ou seja, maiores teores foram verificados nos grãos de soja cultivados no solo muito argiloso, que variaram de $0,42$ a $13,56 \text{ mg kg}^{-1}$, enquanto nos grãos cultivados no solo franco arenoso a variação foi de $0,39$ a $4,28 \text{ mg kg}^{-1}$ (Figura 10). A maior translocação de Ni que ocorreu nas plantas cultivadas no solo muito argiloso deve-se ao maior crescimento das plantas nesse solo (Figura 6), resultando em maiores valores de acúmulo: de 3 a $20 \text{ } \mu\text{g/planta}$, enquanto nas plantas cultivadas no solo franco arenoso variaram de $1,3$ a $10 \text{ } \mu\text{g/planta}$ de Ni (Figura 11). Esses resultados demonstram que ocorre translocação do Ni para os grãos, corroborando com Cataldo et al. (1978) que constataram que a partir do início da senescência as plantas de soja translocam aproximadamente 70% do Ni para os grãos.

Teores semelhantes aos obtidos nesse estudo para grãos de soja foram verificados por Kutman et al. (2012), que obtiveram concentrações de $0,04$ a $8,32 \text{ mg kg}^{-1}$ de Ni estudando aplicação foliar desse micronutriente e também por Flyvholm et al. (1984), os quais verificaram, em média, teores de $5,2 \text{ mg kg}^{-1}$ de Ni em grãos de soja consumidos na dieta humana. Ressalta-se que o teor médio de $13,56 \text{ mg kg}^{-1}$ de Ni nos grãos das plantas cultivadas no solo muito argiloso com fornecimento de $5,0 \text{ mg dm}^{-3}$ de Ni, excede os valores comumente relatados na literatura como adequados, podendo ser a causa dos sintomas de toxidez verificados nos grãos de soja: menor desenvolvimento e enrugamento (Figura 12).

O número de vagens e grãos por planta variou de $42,17$ a $44,25$ e de $85,25$ a 95 , respectivamente, e a massa seca dos grãos variou de $11,67$ a $13,69 \text{ g/planta}$ no solo franco arenoso. Enquanto, no solo muito argiloso o número de vagens e grãos por planta variou de $42,13$ a 56 e de $104,75$ a $127,75$, respectivamente, e a massa seca dos grãos variou de $16,98$ a $21,8 \text{ g/planta}$ (Figuras 13 e 14).

Os componentes de produtividade, número de vagens, número de grãos e massa seca de grãos diferiram estatisticamente em função da aplicação de Ni apenas nas plantas cultivadas no solo muito argiloso, com redução dos valores desses componentes nas maiores doses de Ni (Figuras 13 e 14). A redução nos componentes de produtividade está relacionada ao teor inicial de Ni no solo muito argiloso ser maior que no solo franco arenoso, o qual o teor disponível ficou abaixo do limite de quantificação. A falta de resposta dos componentes de produtividade das plantas de soja ao Ni no solo franco arenoso, mesmo esse apresentando

teores disponíveis iniciais baixos, provavelmente deve-se ao teor inicial de Ni na semente do cultivar BRS 360 RR, que era de 0,78 mg kg⁻¹. Brown et al. (1987) verificaram em cevada, que apenas o conteúdo de Ni da semente é suficiente para suprir até três gerações precedentes, sem que ocorra deficiência do mesmo.

Tomando como base o teor inicial de Ni na semente do cultivar empregado nesse estudo, pode-se inferir que uma semente de soja apresentou em média aproximadamente 0,15 µg de Ni. Logo, o teor inicial da semente contribuiu com aproximadamente 0,75 a 11,53% da quantia total de Ni acumulado pelas plantas: 1,3 a 20 µg (Figura 11).

São escassas as informações referentes aos teores de Ni em sementes de soja, logo, com o intuito de compreender o comportamento dos teores nas sementes foi efetuado um breve estudo exploratório, no qual os principais genótipos de soja atualmente cultivados no Brasil foram avaliados quanto ao teor de Ni (Quadro 1). Os genótipos de soja diferiram grandemente quanto aos teores na semente, variando de 0,5 a 2,09 mg kg⁻¹ de Ni. O local de cultivo, em razão do teor disponível no solo, influência grandemente os teores nas sementes, por exemplo, o cultivar BRS 360 RR apresentou maiores teores de Ni nas sementes quando os teores disponíveis no solo foram mais elevados.

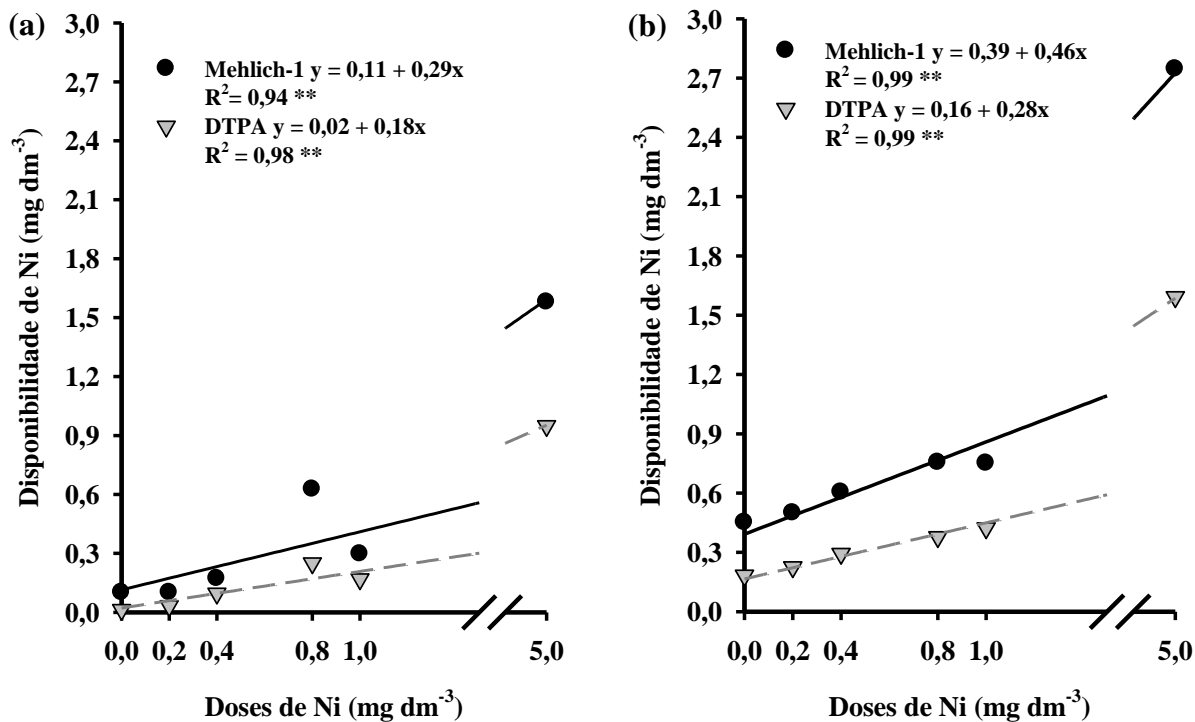


FIGURA 9. Disponibilidade de níquel (Ni) no solo (a) franco arenoso e (b) muito argiloso submetidos à aplicação de Ni (** significativo ao nível de $p < 0,01$ pelo Teste de F).

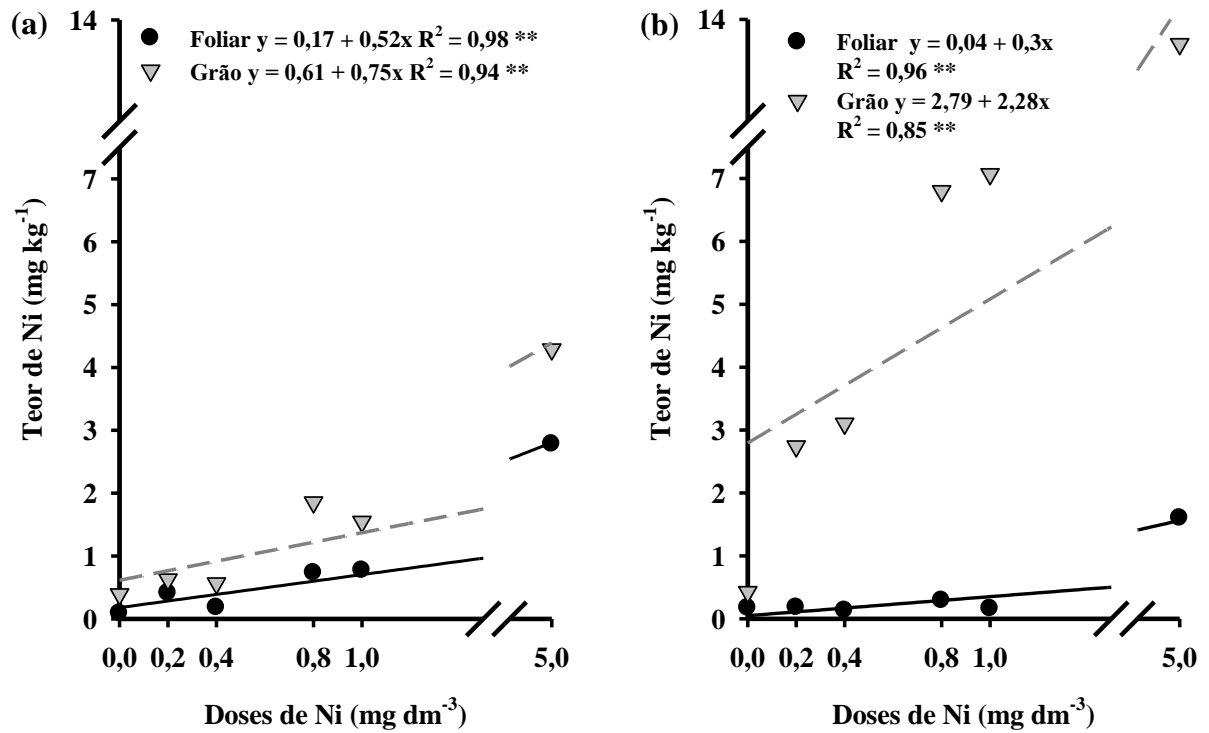


FIGURA 10. Teor de níquel (Ni) foliar (R^2) e nos grãos de soja cultivada no solo (a) franco arenoso e (b) muito argiloso submetidos à aplicação de Ni (** significativo ao nível de $p < 0,01$ pelo Teste de F).

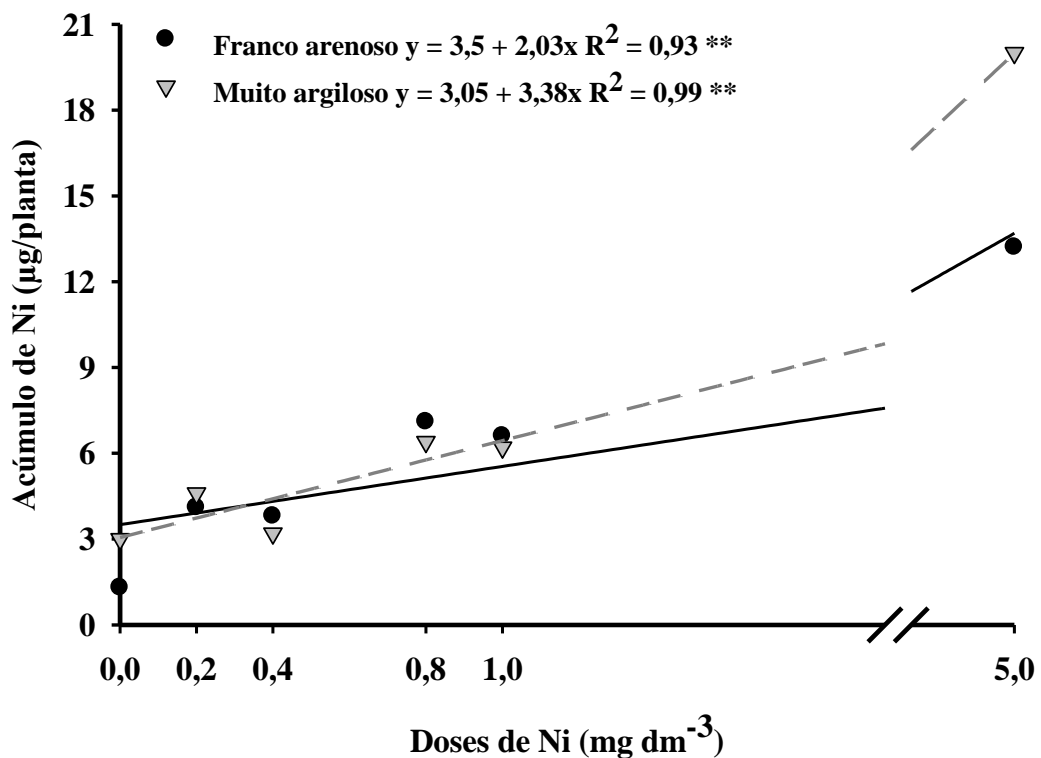


FIGURA 11. Acúmulo de níquel (Ni) em plantas de soja cultivadas em solos de classes texturais contrastantes submetidos à aplicação de Ni (** significativo ao nível de $p < 0,01$ pelo Teste de F).

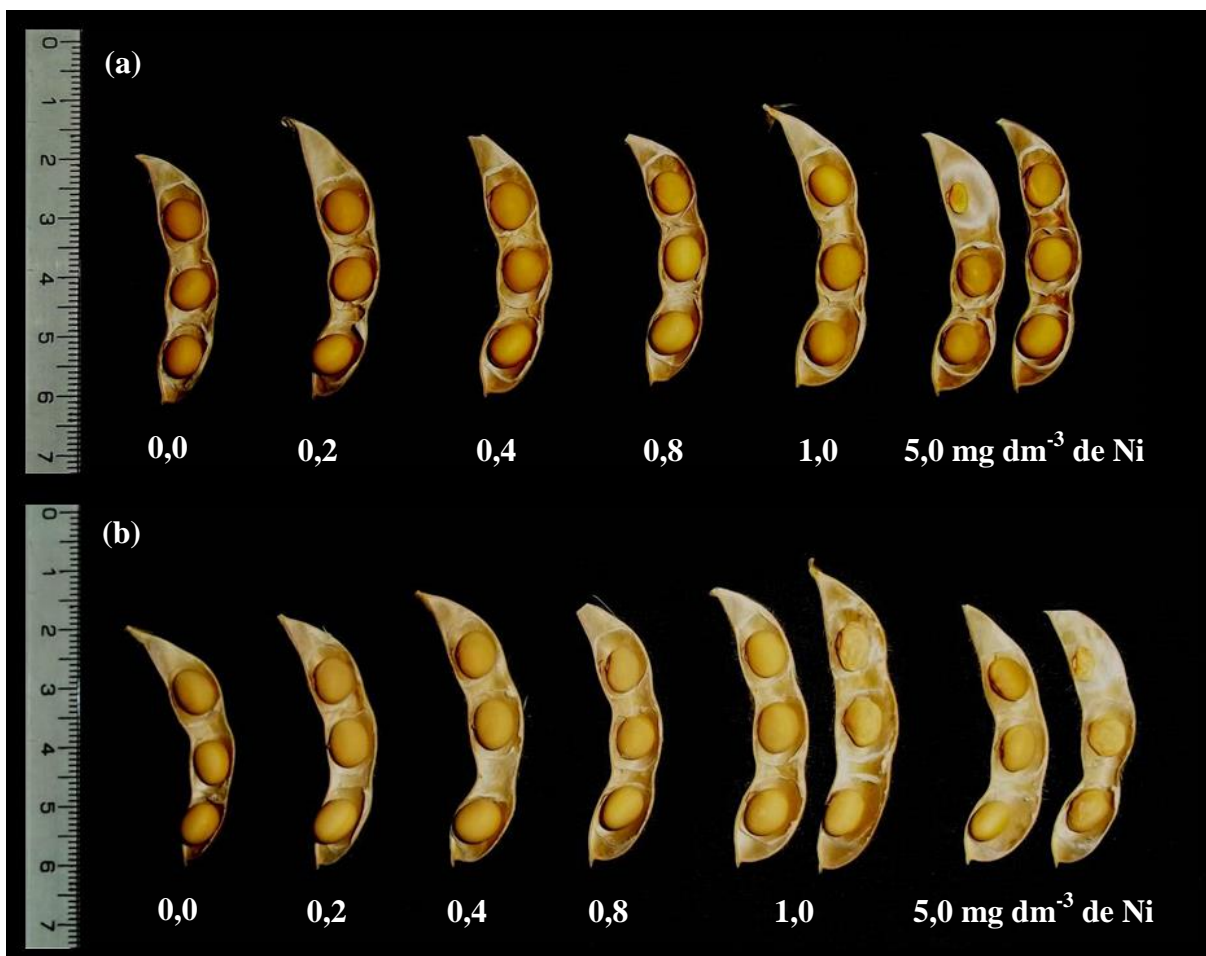


FIGURA 12. Aspecto visual de grãos de soja cultivada no solo (a) franco arenoso e (b) muito argiloso, submetidos às doses de níquel (Ni).

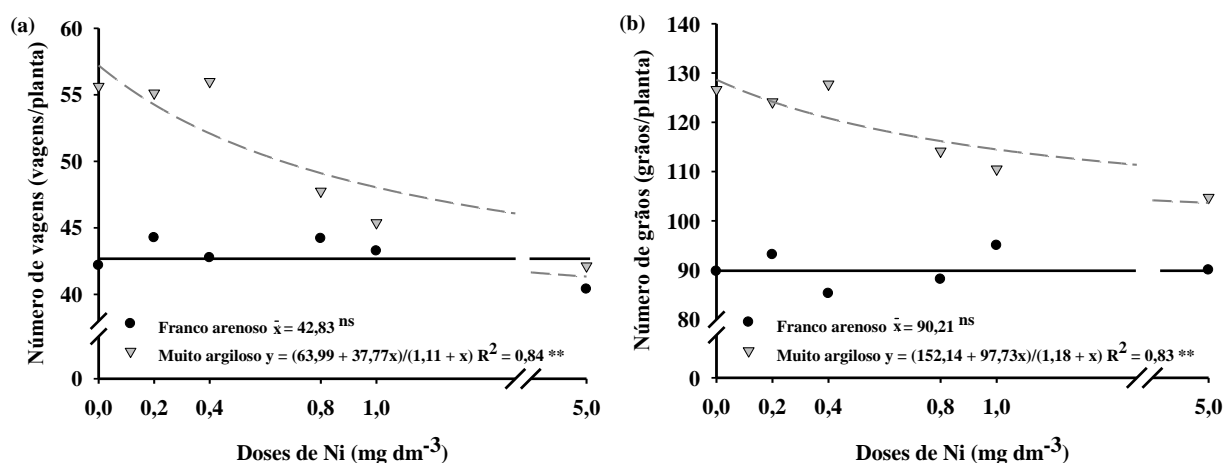


FIGURA 13. Componentes da produtividade (a) número de vagens e (b) número de grãos de em soja cultivada em solos de classes texturais contrastantes, submetidos à aplicação de níquel (Ni) (^{ns} não significativo; ^{**} significativo ao nível de $p < 0,01$ pelo Teste de F).

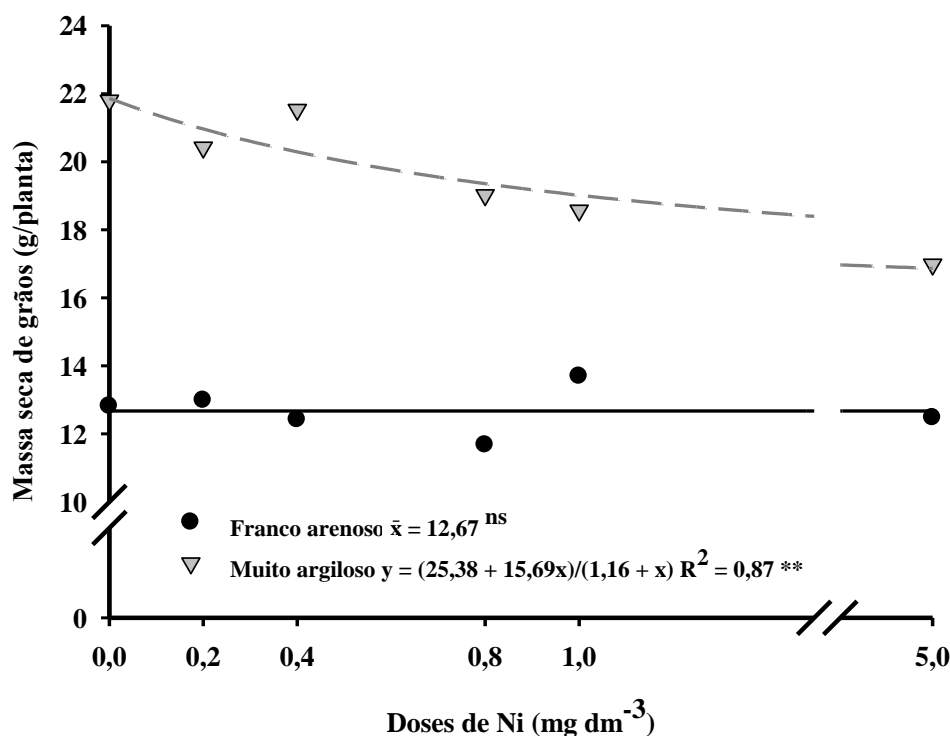


FIGURA 14. Massa seca de grãos de soja cultivada em solos de classes texturais contrastantes, submetidos à aplicação de níquel (Ni) (^{ns} não significativo; ^{**} significativo ao nível de $p < 0,01$ pelo Teste de F).

QUADRO 1. Teor de níquel (Ni) em grãos dos principais genótipos de soja cultivados atualmente no Brasil, em diferentes locais.

Cultivar	Teor de Ni no grão (mg kg ⁻¹) ⁽¹⁾	Local do cultivo
BRS 360 RR	0,78	Local de cultivo desconhecido ⁽²⁾
	0,5	Local de cultivo desconhecido
	1,96	Londrina, Paraná ⁽³⁾
BMX Potência RR	0,71	Ponta Grossa, Paraná ⁽⁴⁾
	0,75	Londrina
V Max RR	2,09	Londrina
NS 6262 RR	0,58	Londrina

⁽¹⁾ Média de três repetições, determinação segundo adaptação da metodologia descrita em Malavolta et al. (1997);

⁽²⁾ Empregada no experimento; ⁽³⁾ Disponibilidade no solo de 0,45 e 0,75 mg dm⁻³ de Ni em Mehlich-1 e DTPA, respectivamente; ⁽⁴⁾ Disponibilidade no solo de 0,08 e 0,11 mg dm⁻³ de Ni em Mehlich-1 e DTPA, respectivamente.

O resultado obtido nesse estudo referente à produtividade corroboram com os obtidos por Alovisei et al. (2011) e Kutman et al. (2012), que estudaram a aplicação com Ni, via foliar e semente, e não obtiveram acréscimos na produtividade das plantas de soja. Entretanto, experimentos a campo com a adição de até 0,02 mg dm⁻³ Ni verificaram incremento da produtividade nessa mesma espécie (Bertrand, 1973). Segundo Martins (comunicado pessoal) citado por Moraes et al. (2010), cultivando soja a campo em condições brasileiras, verificou

que o fornecimento de 50 g ha⁻¹ de Ni proporcionou aumento de até 6,2 sc ha⁻¹, aventando que o Ni estaria atuando no controle de doenças fúngicas e, assim, aumentando a produtividade da soja de forma indireta.

No presente estudo o fornecimento de aproximadamente 0,5 mg dm⁻³ de Ni para ambos os solos proporcionou teores foliares médios de 0,36 mg kg⁻¹ de Ni, teores disponíveis de 0,23 mg dm⁻³ de Ni em DTPA e 0,47 mg dm⁻³ de Ni em Mehlich-1. Nesta condição houve melhor estímulo ao metabolismo das plantas de soja, aumentando a atividade enzimática, o conteúdo de clorofila e a taxa fotossintética, sem necessariamente se traduzir em aumento da produtividade. Provavelmente o Ni proporciona maior acúmulo e/ou melhor utilização das substâncias de reservas das plantas. Entretanto, em condições ótimas de crescimento, como em condições controladas, na qual não se tem nenhum tipo de estresse, esse melhor uso das reservas não é significativo ao ponto de alterar a produtividade. Todavia, ressalta-se que essa pressuposição precisa ser comprovada, uma vez que, no presente estudo, não foram avaliadas as substâncias de reservas das plantas e também condições com variação de estresse.

Os teores disponíveis de Ni, em Mehlich-1 e DTPA, teores foliares e nos grãos apresentam correlação significativa e positiva (Quadro 2). A massa seca dos grãos apresentou correlação significativa e negativa com os teores disponíveis no solo e teores no tecido vegetal apenas para as plantas cultivadas no solo muito argiloso (Quadro 2). Portanto, em solos com teores disponíveis mais altos de Ni, como o solo muito argiloso utilizado nesse estudo, pode ocorrer redução da massa seca dos grãos de soja devido efeito excessivo/tóxico desse micronutriente. Isso evidencia a necessidade de mais estudos para determinação de doses adequadas de Ni considerando a disponibilidade do elemento no solo, resposta agrônômica e fisiológica das plantas e variações nas condições de estresses ambientais. A alta relação entre os métodos de determinação dos teores de Ni disponível indicam que ambos podem ser utilizados.

A correlação entre disponibilidade de Ni e atributos químicos do solo apresentou particularidade para cada solo estudado (Quadro 3). A disponibilidade de Ni se correlacionou significativamente e negativamente com os teores de C, Ca (apenas em DTPA) e B no solo franco arenoso (Quadro 3). Apesar do Ni ser adsorvido e imobilizado principalmente por óxidos de Fe e Mn (Jenne, 1968), a MOS, também exerce influência na adsorção e imobilização desse micronutriente pela presença, principalmente, dos grupos carboxílicos e fenólicos, reduzindo a disponibilidade de Ni (Bloomfield et al., 1976; Halstead, 1968; Halstead et al., 1969; Misra & Pande, 1974). A maior parte do B disponível encontra-se

adsorvido a MOS (Broadley et al., 2011), portanto, a disponibilidade de B pode estar relacionada MOS e não necessariamente a um antagonismo com o Ni. Enquanto, no caso do Ca, o antagonismo pode ter ocorrido de maneira direta, pois Ni e Ca são cátions divalentes, competindo pelos mesmos sítios de reação no solo (Bowman et al., 1981). A MOS foi preponderante na disponibilidade de Ni no solo franco arenoso, isso se deve, provavelmente, a menor ocorrência de argilominerais nesse solo.

QUADRO 2. Relação entre teores de níquel (Ni) disponível no solo (Mehlich-1 e DTPA), foliar (R2), nos grãos e massa seca de grãos em plantas de soja cultivadas em solos de classes texturais contrastantes, submetidos à aplicação de Ni.

	DTPA	Foliar	Grão	Massa seca dos grãos
Franco arenoso				
Mehlich-1	0,97**	0,96**	0,96**	-0,04 ^{ns}
DTPA		0,96**	0,92**	-0,05 ^{ns}
Foliar			0,95**	-0,20 ^{ns}
Grão				-0,12 ^{ns}
Muito argiloso				
Mehlich-1	1,00**	0,95**	0,92**	-0,67**
DTPA		0,95**	0,92**	-0,66**
Foliar			0,86**	-0,69**
Grão				-0,79**

^{ns} não significativo; ** significativo ao nível de $p < 0,01$ pelo coeficiente de correlação linear de Pearson.

No solo muito argiloso a disponibilidade de Ni apresentou correlação significativa e negativa com o pH e Cu. Entre as propriedades do solo, o pH está entre as que mais afetam a disponibilidade do Ni, apresentando comportamento inverso (Uren, 1992; Weng et al., 2004). A elevação do pH resulta em: aumento na adsorção de Ni, em razão da desprotonação dos grupamentos ácidos da MOS e da superfície dos óxidos; formação de hidróxidos, carbonatos e fosfatos insolúveis com os metais pesados, como o Ni; complexação mais efetiva pela MOS (Kabata-Pendias & Adriano, 1995). Esse comportamento é evidenciado também pela correlação positiva entre o Ni e a acidez potencial (H + Al), em ambos os solos. Provavelmente, a disponibilidade de Ni e H + Al foram reduzidas pelo aumento do pH. A correlação negativa entre os teores disponíveis de Ni e Cu sugere inibição competitiva entre esses cátions, pois apresentam mesma valência e raio iônico hidratado semelhante (Cu 0,057 e Ni 0,069) (Uren, 1992).

QUADRO 3. Relação entre teores disponíveis de níquel (Ni) no solo (Mehlich-1 e DTPA) com atributos químicos de solos de classes texturais contrastantes, submetidos à aplicação de Ni.

Atributos químicos do solo	Disponibilidade Ni no solo			
	Franco arenoso		Muito argiloso	
	Mehlich-1	DTPA	Mehlich-1	DTPA
C	-0,59**	-0,58**	-0,39 ^{ns}	-0,39 ^{ns}
pH	-0,13 ^{ns}	-0,22 ^{ns}	-0,41*	-0,43*
H + Al	0,68**	0,76**	0,67**	0,67**
Al	0,00 ^{ns}	0,00 ^{ns}	0,00 ^{ns}	0,00 ^{ns}
P	0,15 ^{ns}	0,09 ^{ns}	0,38 ^{ns}	0,36 ^{ns}
K	0,09 ^{ns}	0,16 ^{ns}	0,16 ^{ns}	0,15 ^{ns}
Ca	-0,36 ^{ns}	-0,48*	-0,30 ^{ns}	-0,31 ^{ns}
Mg	-0,18 ^{ns}	-0,18 ^{ns}	-0,29 ^{ns}	-0,30 ^{ns}
S-SO₄	0,23 ^{ns}	0,19 ^{ns}	-0,25 ^{ns}	-0,25 ^{ns}
Cu	-0,23 ^{ns}	-0,20 ^{ns}	-0,43*	-0,43*
Zn	-0,11 ^{ns}	-0,09 ^{ns}	-0,04 ^{ns}	-0,05 ^{ns}
Fe	-0,10 ^{ns}	-0,12 ^{ns}	-0,26 ^{ns}	-0,26 ^{ns}
Mn	-0,23 ^{ns}	-0,21 ^{ns}	-0,26 ^{ns}	-0,27 ^{ns}
B	-0,45*	-0,44*	0,14 ^{ns}	0,13 ^{ns}

^{ns} não significativo; ** significativo ao nível de $p < 0,01$; * significativo ao nível de $p < 0,05$ pelo coeficiente de correlação linear de Pearson.

QUADRO 4. Relação entre teores de níquel (Ni) foliar (R2) e nos grãos de soja com os demais nutrientes, em plantas cultivadas em solos de classes texturais contrastantes, submetidos à aplicação de Ni.

Nutrientes	Teores de Ni no tecido vegetal			
	Franco arenoso		Muito argiloso	
	Foliar	Grão	Foliar	Grão
N	-0,16 ^{ns}	-0,26 ^{ns}	-0,14 ^{ns}	-0,13 ^{ns}
P	-0,31 ^{ns}	-0,26 ^{ns}	-0,30 ^{ns}	-0,03 ^{ns}
K	-0,31 ^{ns}	-0,25 ^{ns}	-0,06 ^{ns}	-0,02 ^{ns}
Ca	-0,02 ^{ns}	0,58**	-0,56**	-0,06 ^{ns}
Mg	-0,16 ^{ns}	-0,09 ^{ns}	-0,11 ^{ns}	-0,23 ^{ns}
S	0,22 ^{ns}	0,47*	0,28 ^{ns}	0,20 ^{ns}
Cu	-0,24 ^{ns}	0,10 ^{ns}	-0,16 ^{ns}	-0,72**
Zn	-0,26 ^{ns}	-0,28 ^{ns}	-0,38 ^{ns}	-0,86**
Fe	0,62**	-0,40 ^{ns}	0,53**	-0,67**
Mn	0,21 ^{ns}	0,55**	0,30 ^{ns}	-0,19 ^{ns}
B	-0,43*	-0,50*	-0,55**	-0,44*

^{ns} não significativo; ** significativo ao nível de $p < 0,01$; * significativo ao nível de $p < 0,05$ pelo coeficiente de correlação linear de Pearson.

Os teores foliares de Ni apresentaram correlação com Ca (apenas no solo muito argiloso), Fe e B (Quadro 4). O comportamento em relação ao Ca reflete a relação que ocorreu nos teores disponíveis do solo. Cataldo et al. (1978), Hunter & Vergnano (1953) e Rahman et al. (2005) verificaram em plantas cultivadas em solução nutritiva menor absorção de Fe com fornecimento de Ni, devido a competição direta desses cátions pelos sítios de absorção nas plantas, resultados oposto aos obtidos nesse estudo. Acredita-se que esse comportamento se deve a elevada disponibilidade de Fe em solos tropicais (Kämpf et al., 2012), reduzindo o efeito de competição pelos sítios de absorção.

Os teores de Ni nos grãos apresentaram correlação com Ca, S, Mn e B, nas plantas cultivadas no solo franco arenoso, e com Cu, Zn, Fe e B, no solo muito argiloso (Quadro 4). Os nutrientes que apresentaram correlação negativa com os teores de Ni nos grãos são imóveis ou pouco móveis na planta (Malavolta et al., 1997), não sendo translocados para os grãos, contrário ao Ni que é translocado para os grãos (Cataldo et al., 1978). Inibição competitiva entre Ni e os micronutrientes Cu, Zn e Fe em plantas são comumente relatadas na literatura (Rahman et al., 2005). Enquanto informações a respeito de interações do Ni com Ca, S, Mn e B, como as verificadas nesse estudo, são escassas.

2.4 CONCLUSÕES

A textura do solo influencia na disponibilidade de Ni para as plantas de soja e, conseqüentemente, na sua resposta a esse micronutriente. Aspectos fisiológicos e morfológicos das plantas de soja, como atividade da enzima urease, conteúdo de clorofila, taxa fotossintética e desenvolvimento do sistema radicular são potencializados com a aplicação de doses em torno de $0,5 \text{ mg dm}^{-3}$ de Ni, com maior incremento de resposta no solo franco arenoso. Essa dose proporcionou em média teores foliares de $0,36 \text{ mg kg}^{-1}$ de Ni, teores disponíveis de $0,23 \text{ mg dm}^{-3}$ de Ni em DTPA e $0,47 \text{ mg dm}^{-3}$ de Ni em Mehlich-1. A atividade da enzima nitrato redutase e teor de N total nas plantas de soja não são afetados pela aplicação de Ni. Plantas de soja cultivadas em solo muito argiloso, sob aplicação de alta dose de Ni apresentaram sintomas de toxidez, com redução dos componentes de produtividade. A aplicação de Ni nas condições estudadas não se fez necessária. Há relação direta entre disponibilidade de Ni no solo e teores foliares, nos grãos e acúmulo nas plantas. A relação dos teores de Ni com atributos químicos dos solos e demais nutrientes no tecido vegetal apresentaram particularidades para cada solo estudado. A exigência de Ni pelas plantas é

baixa, sendo que o teor na semente pode suprir algumas gerações. Desta forma, em futuros estudos para determinação de recomendações de Ni, deve-se levar em consideração o teor inicial de Ni na semente e também variações em condições estressantes as plantas.

2.5 AGRADECIMENTOS

Ao Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo da Universidade Federal do Paraná (UFPR), a EMBRAPA SOJA e a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES).

2.6 LITERATURA CITADA

ARKOUN, M.; JANNIN, L.; LAÎNÉ, P.; ETIENNE, P.; MASCLAUX-DAUBRESSE, C.; CITERNE, S.; GARNICA, M.; GARCIA-MINA, J.M.; YVIN, J.C. & OURRY, A. A physiological and molecular study of the effects of nickel deficiency and phenylphosphorodiamidate (PPD) application on urea metabolism in oilseed rape (*Brassica napus* L.). *Plant and Soil*, 362:79-92, 2013.

ALOVISI, A.M.T.; MAGRI, J.; DUTRA, J.E.; MAGRI, E.; SANTOS, M.J.G. & ALOVISI, A.A. Adubação foliar com sulfato de níquel na cultura da soja. *Ensaio e Ciência: Ciências Biológicas, Agrárias e da Saúde*, 15(2):25-32, 2011.

AMARAL SOBRINHO, N.M.B.; BARRA, C.M. & LÃ, O.R. Química dos metais pesados no solo. In: MELO, V.F. & ALLEONI, L.R.F. (Eds.). *Química e mineralogia do solo*. Viçosa, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2009. p.249-312.

ARNON, D.I. Ammonium and nitrate nitrogen nutrition of barley and rice at different seasons in relation to hydrogen ion concentrations, manganese, copper and oxygen supplied. *Soil Science*, 44(2):91-121, 1937.

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*, 140(2):433-443, 2006.

BERTRAND, D. Importance du nickel, comme oligo-élément, pour les *Rhizobium* des nodosités des légumineuses. *Comptes Rendus Hebdomadaires des Seances de L'Academie des Sciences*, 276(12):1855-1858, 1973.

BERTRAND, D. & WOLF, A. Le nickel et le cobalt des nodosites des legumineuses. *Bulletin de la Societe de Chimie Biologique*, 36(6-7):905-907, 1954.

BOLLARD, E.G. Involvement of unusual elements in plant growth and nutrition. In: LAUCHLI, A. & BIELESKI, R.L. (Eds.). *Inorganic plant nutrition, encyclopedia plant physiology*. New York, Springer-Verlag, 1983. p.695-744.

BOWMAN, R.S.; ESSINGTON, M.E. & O'CONNOR, G.A. Soil sorption of nickel: influence of solution composition. *Soil Science Society of America Journal*, 45:860-865, 1981.

BREMNER, J.M. & EDWARDS, H.L. Determination and isotope ratio analysis of different forms of nitrogen in soils. I. Apparatus and procedures for distillation and determination for ammonium. *Soil Science Society of America Proceedings*, 29:504-507, 1965.

BROADLEY, M.; BROWN, P.; ÇAKMAK, I.; RENGEL, Z. & ZHAO, F. Function of nutrients: micronutrients. In: MARSCHNER, P. (Ed.). *Mineral nutrition of higher plants*. 3.ed. London, Academic Press, 2011, p.191-248.

BROOKS, R.R. Accumulation of nickel by terrestrial plants. In: NRIAGU, J.O. (Ed.). *Nickel in the environment*. New York, Wiley and Sons, 1980. p.407-430.

BLOOMFIELD, C.; KELSO, W.I. & PRUDEN, G.J. Reactions between metals and humified organic matter. *Journal of Soil Science*, 27:16-31, 1976.

BROWN, P.H.; WELCH, R.M. & CARY, E.E. Nickel: a micronutrient essential for higher plants. *Plant Physiology*, 85(3):801-803, 1987.

BROWN, P.H.; WELCH, R.M. & MADISON, J.T. Effect of nickel deficiency on soluble anion, amino acid and nitrogen levels in barley. *Plant and Soil*, 125:19-27, 1990.

CAMARGO, O.A.; MONIZ, A.C.; JORGE, J.A. & VALADARES, J.M.A.S. Métodos de análise química, mineralógica e física de solo do Instituto Agrônomo de Campinas. Campinas, Instituto Agrônomo, 1986. 94p. (Boletim técnico, 106).

CARIDAD-CANCELA, R.; PAZ-GONZÁLEZ, A. & ABREU, C.A. Total and extractable nickel and cadmium contents in natural soils. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 36:241-252, 2005.

CATALDO, D.A.; GARLAND, T.R. & WILDUNG, R.E. Nickel in plants: II. Distribution and chemical form in soybean plants. *Plant Physiology*, 62:566-570, 1978.

DALTON, D.A.; EVANS, H.J. & HANUS, F.J. Stimulation by nickel of soil microbial urease activity and urease and hydrogenase activities in soybeans grown in a low-nickel soil. *Plant and Soil*, 88:245-258, 1985.

DIXON, N.E.; GAZZOLA, C.; BLAKELEY, R.L. & ZERNER, B. Jack bean urease (EC 3.5.1.5) a metalloenzyme: simple biological role for nickel. *Journal of the American Chemical Society*, 97(14):4131-4133, 1975.

EMBRAPA - EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes. 2.ed. Brasília, EMBRAPA Informações Tecnológicas, 2009. 627p.

EMBRAPA SOJA - EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Tecnologias de produção de soja - Região Central do Brasil 2012 e 2013. Londrina, EMBRAPA SOJA, 2011. 261p. (Sistemas de Produção/EMBRAPA Soja, ISSN 2176-2902; n.15).

EMBRAPA SOLOS - EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Sistema brasileiro de classificação de solos. 2.ed. Rio de Janeiro, EMBRAPA SOLOS, 2006. 306p.

ESKEW, D.L.; WELCH, R.M. & CARY, E.E. Nickel: an essential micronutrient for legumes and possibly all higher-plants. *Science*, 222(4624):621-623, 1983.

ESKEW, D.L.; WELCH, R.M. & NORVELL, W.A. Nickel in higher plants: further evidence for an essential role. *Plant Physiology*, 76(3):691-693, 1984.

EVANS, H.J.; HARKER, A.R.; PAPEN, H.; RUSSELL, S.A.; HANUS, F.J. & ZUBER, M. Physiology, biochemistry and genetics of the uptake hydrogenase in rhizobia. *Annual Review of Microbiology*, 41:335-361, 1987.

FEHR, W.R. & CAVINESS, C.E. Stages on soybean development. Ames, Iowa State University/Cooperative Extension Service, 1977. 11p. (Special Report, 80).

FLYVHOLM, M.A.; NIELSEN, G.D. & ANDERSEN, A. Nickel content of food and estimation of dietary intake. *Lebensm Unters Forsch*, 179:427-431, 1984.

FÖRSTNER, U. Chemical forms and reactivities of metals in sediments. In: LECHSBER, R.; DAVIS, R.A. & HERMITTE, L. (Eds.). *Chemical methods for assessing bioavailable metals in sludges*. London, Elsevier, 1985. p.1-32.

FORSYTH, F.R. & PETURSON, B. Chemical control of cereal rust. IV. The influence of Ni compounds on wheat, oat and sunflower rusts in greenhouse. *Phytopathology*, 49:1-3, 1959.

GAD, N.; EL-SHERIF, M.H. & EL-GEREEDLY, N.H.M. Influence of nickel on some physiological aspects of tomato plants *Australian Journal of Basic & Applied Sciences*, 1(3):286-293, 2007.

GRAHAM, R.D.; WELCH, R.M. & WALKER, C.D. A role for nickel in the resistance of plants to rust. In: AUSTRALIAN AGRONOMY CONFERENCE, 3., 1985, Hobart. *Proceedings...* Hobart: Australian Society of Agronomy, 1985. 337p.

GERENDÁS, J. & SATTELMACHER, B. Influence of Ni supply on grown and nitrogen metabolism of *Brassica napus* L. grown with NH₄NO₃ or urea as N source. *Annals of Botany*, 83:65-71, 1999.

GERENDÁS, J. & SATTELMACHER, B. Significance of Ni supply for growth, urease activity and the concentrations of urea, amino acids and mineral nutrients of urea-grown plants. *Plant and Soil*, 190:153-162, 1997b.

GERENDÁS, J. & SATTELMACHER, B. Significance of N source (urea vs. NH_4NO_3) and Ni supply for growth, urease activity and nitrogen metabolism of zucchini (*Cucurbita pepo convar. giromontiina*). Plant and Soil, 196:217-222, 1997a.

GERENDÁS, J.; ZHU, Z. & SATTELMACHER, B. Influence of N and Ni supply on nitrogen metabolism and urease activity in rice (*Oryza sativa* L.). Journal of Experimental Botany, 49:1545-1554, 1998.

GHANATI, F. & RAHMATI ISHKA, M. Improvement of antioxidant system and decrease of lignin by nickel treatment in tea plant. Journal of Plant Nutrition, 29:1649-1661, 2006.

HALSTEAD, R.L. Effect of different amendments on yield and composition of oats grown on soils derived from serpentine material. Canadian Journal of Soil Science, 48:301-305, 1968.

HALSTEAD, R.L.; FINN, B.J. & MACLEAN, A.J. Extractability of nickel added to soils and its concentration in plants. Canadian Journal of Soil Science, 49:335-342, 1969.

HEWITT, E.J. Metal interrelationship in plant nutrition. Journal of Experimental Botany, 4:59-64, 1953.

HEWITT, E.J. & SMITH, T.A. Plant mineral nutrition. Londres, The English Universities Press, 1975. 298p.

HOGAN, M.E.; SWIFT, I.E. & DONE, J. Urease assay and ammonia release from leaf tissues. Phytochemistry, 22(3):663-667, 1983.

HUNTER, J.G. & VERGNANO, O. Trace element toxicities in oat plants. Annals of Applied Biology, 40:761-777, 1953.

ILIN, S.Z.; KASTORI, R.R. & MALENCIC, D.R. The effect of nickel on superoxide dismutase activity, lipid peroxidation intensity, and oxygen radical quantity in young plants of wheat and maize. Matica Srpska Proceedings for Natural Sciences, 98:39-44, 2000.

JACKSON, M.L. Soil chemical analysis: Englewood cliffs, N.T. Prentice Hall Inc., 1958. 498p.

JENNE, E.A. Controls of Mn, Fe, Co, Ni, Cu and Zn concentrations in soils and water; the significant role of hydrous Mn e Fe oxides. Advances in Chemistry Series, 73:337-387, 1968.

KABATA-PENDIAS, A. & ADRIANO, D.C. Trace metals. In: REICHCIGL, J.E. (Ed.). Soil amendments and environmental quality. Boca Raton, Lewis Publishers, 1995, p.139-167.

KÄMPF, N.; MARQUES, J.J. & CURI, N. Mineralogia de solos brasileiros. In: KER, J.C.; CURI, N.; SCHAEFER, C.E.G.R. & TORRADO-VIDAL, P. (Eds.). Pedologia. Viçosa, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2012. 343p.

KEVRESAN, S.; PETROVIC, N.; POPOVIC, M. & KANDRAC, J. Effect of heavy metals on nitrate and protein metabolism in sugar beet. Biologia Plantarum, 41:235-240, 1998.

KHOSHGOFTARMANESHA, A.H.; HOSSEINIB, F. & AFYUNIA, M. Nickel supplementation effect on the growth, urease activity and urea and nitrate concentrations in lettuce supplied with different nitrogen sources. *Scientia Horticulturae*, 130:381-385, 2011.

KIM, H. & MAIER, R.J. Transcriptional regulation of hydrogenase synthesis by nickel in *Bradyrhizobium japonicum*. *The Journal of Biological Chemistry*, 265(31):16729-16732, 1990.

KLUCAS, R.V.; HANUS, F.J.; STERLING, A.R. & EVANS, H.J. Nickel: a micronutrient element for hydrogen-dependent growth of *Rhizobium japonicum* and for expression of urease activity in soybean leaves. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 80:2253-2257, 1983.

KROGMEIER, M.J.; McCARTY, G.W.; SHOGREN, D.R. & BREMNER, J.M. Effect of nickel deficiency in soybean on the phytotoxicity of foliar-applied urea. *Plant and Soil*, 135:283-286, 1991.

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

LeRICHE, H.H. & WEIR, A.H. A method of studying trace elements in soil fractions. *Journal of Soil Science*, 14:225-235, 1963.

LÓPEZ, M.; CARBONERO, V.; CABRERA, E. & RUIZ-ARGÜESO, T. Effects of host on the expression of the H₂-uptake hydrogenase of *Rhizobium* in legume nodules. *Plant Science Letters*, 29:191-199, 1983.

MALAVOLTA, E. Elementos de nutrição mineral de plantas. São Paulo, Agronômica Ceres, 1980. 215p.

MALAVOLTA, E.; VITTI, G.C. & OLIVEIRA, S.A. Avaliação do estado nutricional das plantas: princípios e aplicações. 2.ed. Piracicaba, POTAFOS, 1997. 319p.

McCLURE, P.R. & ISRAEL, D.W. Transport of nitrogen in the xylem of soybean. *Plant Physiology*, 64:411-416, 1979.

McCULLOUGH, H. Determination of ammonia in whole blood by a direct colorimetric method. *Clinica Chimica Acta*, 17(2):297-304, 1967.

McILVEEN, W.D. & NEGUSANTI, J.J. Nickel in the terrestrial environment. *Science of the Total Environment*, 148:109-138, 1994.

MISHRA, D. & KAR, M. Nickel in plant growth and metabolism. *Botanical Review*, 40(4):395-452, 1974.

MISRA, S.G. & PANDE, P. Effect of organic matter on availability of nickel. *Plant and Soil*, 40:679-684, 1974.

MORAES, M.F.; REIS, A.R.; MORAES, L.A.C.; LAVRES-JUNIOR, J.; VIVIAN, R.; CABRAL, C.P. & MALAVOLTA, E. Effects of molybdenum, nickel, and nitrogen sources on the mineral nutrition and growth of rice plants. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 40:3238-3251, 2009.

MORAES, M.F.; ABREU JUNIOR, C.H. & LAVRES JUNIOR, J. Micronutrientes. In: PROCHNOW, L.I.; CASARN, V. & STIPP, S.R. (Eds.). *Boas práticas para uso eficiente de fertilizantes*. Piracicaba, International Plant Nutrition Institute, v.2. 2010. p.205-278.

MULDER, E.G.; BOXMA, R. & VEEN, W.L.V. The effect of molybdenum and nitrogen deficiencies on nitrate reduction in plant tissues. *Plant and Soil*, 10:335-355, 1959.

NEVES, O.S.C.; FERREIRA, E.V.O.; CARVALHO, J.G. & SOARES, C.R.F.S. Adição de níquel na solução nutritiva para o cultivo de mudas de umbuzeiro. *Revista Brasileira Ciência do Solo*, 31(3):485-490, 2007.

NICOULAND, B.A.L. & BLOOM, A.J. Nickel supplements improve growth when foliar urea is the sole nitrogen source for tomato. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 123:556-559, 1998.

OLIVEIRA, T.C.; FONTES, R.L.F.; REZENDE, S.T. & VICTOR HUGO, A.V. Effects of nickel and nitrogen soil fertilization on lettuce growth and urease activity. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 37(3):698-706, 2013.

PAINTER, L.I.; TOTH, S.J. & BEAR, F.E. Nickel status of New Jersey soils. *Soil Science*, 76:421-429, 1953.

PIMENTEL-GOMES, F. & GARCIA, C.H. *Estatística aplicada a experimentos agrônômicos e florestais: exposição com exemplos e orientações para uso de aplicativos*. Piracicaba, FEALQ, 2002. 309p.

QIAN, J.; SHAN, X.; WANG, Z. & TU, Q. Distribution and plant availability of heavy metals in different particle-size fractions of soil. *Science of the Total Environment*, 186:131-141, 1996.

RAHMAN, H.; SABREEN, S.; ALAM, S. & KAWAI, S. Effects of nickel on growth and composition of metal micronutrients in barley plants grown in nutrient solution. *Journal of Plant Nutrition*, 28:393-404, 2005.

RAIJ, B. van; ANDRADE, J.C.; CANTARELLA, H. & QUAGGIO, J.A. *Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais*. Campinas, Instituto Agrônômico de Campinas, 2001. 285p.

REBAFKA, F.P.; SCHULZ, R. & MARSCHNER, H. Erhebungsuntersuchungen zur pflanzenverfügbarkeit von nickel auf böden mit hohen geogenen nickelgehalten. *Angewandte Botanik*, 64:317-328, 1990.

SELLSTEDT, A. & SMITH, G.D. Nickel is essential for active hydrogenase in free-living *Frankia* isolated from *Casuarina*. Federation of European Microbiological Societies Microbiology Letters, 70:137-140, 1990.

SHIMADA, N.; ANDO, T.; TOMIYAMA, M. & KAKU, H. Role of nickel in plant nutrition. (I). Effects of nickel on growth of tomato and soybean. Japanese Journal of Soil Science and Plant Nutrition, 51:487-492, 1980.

SIGMAPLOT. Scientific graphing software: versão 10.0. San Rafael, Hearne Scientific Software, 2006.

SINGH, Z.; SINGH, L.; ARORA, C.L. & DHILLON, B.S. Effect of cobalt, cadmium and nickel as inhibitors of ethylene biosynthesis on floral malformation, yield and fruit quality of mango. Journal of Plant Nutrition, 17(10):1659-1670, 1994.

SMITH, N.G. & WOODBURN, J. Nickel and ethylene involvement in the senescence of leaves and flowers. Naturwissenschaften, 71(4):210-211, 1984.

STULTS, L.W.; O'HARA, E.B. & MAIER, R.J. Nickel is a component of hydrogenase in *Rhizobium japonicum*. Journal Bacteriol, 159(1):153-158, 1984.

TAN, X.W.; IKEDA, H. & ODA, M. Effects of nickel concentration in the nutrient solution on the nitrogen assimilation and growth of tomato seedlings in hydroponic culture supplied with urea or nitrate as the sole nitrogen source. Scientia Horticulturae, 84:265-273, 2000.

TILLER, K.G. The geochemistry of basaltic materials and associated soils of southern. Journal of Soil Science, 9:225-241, 1958.

UREN, N.C. Forms, reaction and availability of nickel in soils. Advances in Agronomy, 48:141-203, 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, 71(11):7603-7606, 2005.

WALKER, C.D.; GRAHAM, R.D.; MADISON, J.D.; CARY, E.E. & WELCH, R.M. Effects of Ni deficiency on some nitrogen metabolites in cowpeas (*Vigna unguiculata* L. Walp). Plant Physiology, 79:474-479, 1985.

WENG, L.P.; WOLTHOORN, A.; LEXMOND, T.M.; TEMMINGHOFF, E.J.M. & RIEMSDIJK, W.H. Understanding the effects of soil characteristics on phytotoxicity and bioavailability of nickel using speciation models. Environmental Science and Technology, 38:156-162, 2004.

WELCH, R.M. The biological significance of nickel. Journal of Plant Nutrition, 3:345-356, 1981.

WELLS, M.L. & WOOD, B.W. Foliar boron and nickel applications reduce water-stage fruit-split of pecan. *HortScience*, 43(5):1437-1440, 2008.

WONG, P.K. & CHANG, L. Effects of copper, chromium, and nickel on growth, photosynthesis, and chlorophyll a synthesis of *Chlorella pyrenoidosa* 251. *Environmental Pollution*, 72:127-139, 1991.

XUE, W.T.; HIDEO, I. & MASYUKI, O. Effects of Ni concentration in the nutrient solution on the N assimilation and growth of tomato seedlings in hydroponic culture supplied with urea or nitrate as the sole N source. *Scientia Horticulturae*, 84:265-273, 2000.

ZHENG, Q.L.; NAKATSUKA, A.; MATSUMOTO, T. & ITAMURA, H. Pre-harvest nickel application to the calyx of 'Saijo' persimmon fruit prolongs postharvest shelf-life. *Postharvest Biology and Technology*, 42:98-103, 2006.

CAPÍTULO III - NÍVEIS CRÍTICOS DE NÍQUEL NA PARTE AÉREA DE SOJA EM SOLOS DO ESTADO DO PARANÁ SOB CONDIÇÕES CONTROLADAS

RESUMO

Pesquisas avaliando o comportamento de plantas de soja (*Glycine max* [L.] Merrill) sob variações na disponibilidade de Ni no solo são necessárias para estabelecimento de níveis críticos e adequação da adubação com esse micronutriente. O objetivo do trabalho foi verificar o efeito do Ni no crescimento de plantas de soja, visando estabelecer níveis críticos desse micronutriente em solos do estado do Paraná e na parte aérea de plantas de soja, bem como estudar os extratores Mehlich-1 e DTPA na avaliação da disponibilidade do Ni. Foi utilizado o cultivar de soja BRS 360 RR em oito solos do estado do Paraná, com teores naturais de Ni disponível variáveis, submetidos à aplicação de 0,0 e 0,5 mg dm⁻³ de Ni. Foram avaliados atividade enzimática da urease e nitrato redutase, conteúdo de clorofila, taxa fotossintética, matéria seca da parte aérea das plantas, teor foliar de Ni e N total, disponibilidade de Ni no solo em Mehlich-1 e DTPA. Para determinação do nível crítico de Ni no solo e na planta foi tomado como base o rendimento relativo da massa seca da parte aérea e o acúmulo de Ni na planta. O fornecimento de Ni proporcionou incremento no aparato fisiológico das plantas de soja, como aumento da atividade da enzima urease, conteúdo de clorofila e taxa fotossintética. Entretanto, não afetou a atividade da enzima nitrato redutase, teor de N total e a produção de massa seca da parte aérea da soja. Os extratores Mehlich-1 e DTPA apresentaram alta correlação entre si quanto à disponibilidade no solo e acúmulo de Ni no tecido vegetal, mas não com os teores foliares. O micronutriente Ni não apresentou níveis críticos para os solos estudados e para a parte aérea das plantas de soja. Entretanto, teores foliares de 0,82 mg kg⁻¹ de Ni, teores disponíveis de 0,59 mg dm⁻³ de Ni em DTPA e 0,81 mg dm⁻³ de Ni em Mehlich-1, proporcionaram maiores estímulos fisiológicos as plantas.

Palavras chaves: Micronutrientes, urease, Mehlich-1, DTPA, *Glycine max*.

CAPÍTULO III - CRITICAL LEVELS OF NICKEL IN SHOOT AND IN SOILS OF PARANÁ STATE UNDER CONTROLLED CONDITIONS

ABSTRACT

Research evaluating the behavior of soybean plants (*Glycine max* [L.] Merrill) under variations in Ni availability in soil are necessary in order to establish critical levels and adequacy fertilization recommendations with this micronutrient. The objective of this work was to verify the effect of Ni on the growth of soybean plants, aiming to establish critical levels of this micronutrient in soils of Paraná state and in shoot of soybean plants, as well as to study the extractants Mehlich-1 and DTPA in assessing Ni availability. A soybean cultivar BRS 360 RR were used in eight soils of Paraná state, with contrasting natural levels of Ni available, subject to Ni application of 0.0 and 0.5 mg dm⁻³. The following evaluations were made: urease and nitrate reductase activity, chlorophyll content, photosynthetic rate, shoot dry matter of plants, foliar concentration of Ni and total N, Ni availability in soil using Mehlich-1 and DTPA. For determination of the critical level of Ni in soil and plant were calculate the relative yield of shoot dry mass and the Ni accumulation in the plant. Ni supply increase physiological apparatus of soybean plants, such as increased urease activity, chlorophyll content and photosynthetic rate. However, did not affected nitrate reductase activity, total N and shoot dry matter of soybean. Mehlich-1 and DTPA extractant presented high correlation amongst themselves with regard Ni availability and accumulation in plant, but not with foliar concentration. There was no critical levels for Ni in soils and plant shoot of soybean. However, foliar concentrations of 0.82 mg kg⁻¹ of Ni and soil available levels of 0.59 mg dm⁻³ of Ni in DTPA and 0.81 mg dm⁻³ of Ni in Mehlich-1, provided higher physiological stimulus to plants.

Key words: Micronutrients, urease, Mehlich-1, DTPA, *Glycine max*.

3.1 INTRODUÇÃO

A soja (*Glycine max* [L.] Merrill) é o quarto grão mais produzido no mundo (FAO, 2013), sendo a principal fonte mundial de proteína empregada na formulação de rações animais e a segunda maior fonte de óleo vegetal (USDA, 2013). O Brasil é o principal produtor e exportador mundial dessa leguminosa (CONAB, 2013; USDA, 2013).

O níquel (Ni) foi o último elemento inserido na lista de micronutrientes de plantas (Eskew et al., 1983; 1984; Brown et al., 1987). Esse micronutriente é componente estrutural da enzima urease que desdobra a ureia [$\text{CO}(\text{NH}_2)_2$] hidroliticamente em amônia (NH_3) e dióxido de carbono (CO_2) (Dixon et al., 1975), além de influenciar o processo de fixação biológica de nitrogênio (FBN), pois é componente estrutural da enzima hidrogenase (Sellstedt & Smith, 1990). Apesar de desempenhar função sobre o metabolismo do nitrogênio (N), que por sua vez é um dos nutrientes mais exigidos e o que mais limita o crescimento das plantas, o Ni foi inserido recentemente na legislação de fertilizantes (MAPA, 2013; EPA, 2013).

As informações sobre diagnose foliar e níveis críticos de Ni em plantas de soja nos solos brasileiros ainda não foram estudadas. Desta forma, não existe um posicionamento oficial de recomendação de adubação de Ni para essa cultura.

O conhecimento dos níveis críticos dos nutrientes no solo e no tecido vegetal possibilita uma recomendação mais precisa da adubação. O nível crítico de um nutriente corresponde à concentração mínima necessária para atingir o crescimento máximo ou para um percentual deste máximo (Fritz, 1976). Níveis críticos são variáveis entre solos e espécies de plantas, bem como entre genótipos de uma mesma espécie e, também, em função das características inerentes das classes de solo e técnicas de manejo adotadas no cultivo (Faquin et al., 1995; Fonseca et al., 1997).

Para determinação de níveis críticos de Ni em solos, deve-se considerar a capacidade de extração das soluções utilizadas e suas correlações com os teores desse micronutriente no solo, no tecido vegetal, produtividade e seu acúmulo na planta. Portanto, distintos níveis críticos podem ser estabelecidos dependendo do extrator e classes de solos.

Extratores como Mehlich-1 e DTPA são comumente empregados para determinação da disponibilidade dos micronutrientes Fe, Mn, cobre (Cu) e zinco (Zn) no Brasil (EMBRAPA, 2009; Rajj et al., 2001). Entretanto, a eficiência dos mesmos não está bem elucidada para o Ni.

O presente estudo teve como objetivo verificar o efeito do Ni no crescimento de plantas de soja, para estabelecer níveis críticos desse micronutriente em solos do estado do Paraná (PR) e parte aérea de plantas de soja, bem como estudar os extratores Mehlich-1 e DTPA na avaliação da disponibilidade do Ni.

3.2 MATERIAL E MÉTODOS

3.2.1 LOCAL

O experimento foi realizado em ambiente controlado no período de abril a julho de 2013, na Fazenda Santa Terezinha da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária / Centro Nacional de Pesquisa de Soja (EMBRAPA SOJA), Londrina, PR, Brasil.

3.2.2 CARACTERIZAÇÃO DOS SOLOS

Foram utilizados oito solos, coletados na profundidade de 0 a 20 cm, com teores contrastantes de Ni disponível (Figura 1 e Tabelas 1 e 2). Solos classificados segundo EMBRAPA SOLOS (2006).

Ressalta-se que a escolha dos solos foi baseada nos resultados obtidos no estudo do Capítulo I, selecionando solos com teores naturais de Ni disponível variáveis.

3.2.3 DELINEAMENTO EXPERIMENTAL E TRATAMENTOS

O delineamento experimental empregado foi inteiramente casualizado (DIC) em esquema fatorial (8 x 2), sendo oito solos com teores disponíveis de Ni contrastantes e duas doses de Ni (0,0 e 0,5 mg dm⁻³), efetuando-se quatro repetições por tratamento, totalizando 64 parcelas.

Ressalta-se que a dose de Ni adotada nesse estudo foi estabelecida considerando-se os resultados do estudo do Capítulo II, em que a aplicação de aproximadamente 0,5 mg dm⁻³ de Ni melhor estimulou o metabolismo e crescimento da soja.

3.2.4 DESENVOLVIMENTO EXPERIMENTAL E MANEJO

As amostras dos solos foram secas ao ar e tamisadas em peneiras de 2 mm, em seguida, alocadas em vasos de 4 dm³. Juntamente com esse procedimento, foi efetuada a correção da acidez dos solos, empregando uma mistura de carbonato de cálcio (CaCO₃) + carbonato de magnésio (MgCO₃) na proporção de 3:1, que foi incorporada ao solo visando

e elevar a saturação por bases (V%) para 50% e 70% nos solos com textura média ou arenosa e argilosa, respectivamente. A adubação foi realizada de acordo com Malavolta (1980), com solução nutritiva nas doses de: 200 mg dm⁻³ de fósforo (P), 50 mg dm⁻³ de potássio (K), 25 mg dm⁻³ de enxofre (S), 5 mg dm⁻³ de cloro (Cl), 5 mg dm⁻³ de manganês (Mn), 3 mg dm⁻³ de Zn, 1 mg dm⁻³ de boro (B), 1 mg dm⁻³ de Cu, 0,5 mg dm⁻³ de molibdênio (Mo) e 0,1 mg dm⁻³ de cobalto (Co). Na adubação de cobertura os nutrientes fornecidos foram K e S, nas doses de 50 e 25 mg dm⁻³, respectivamente, quando as plantas se encontravam no estágio V3 (Fehr & Caviness, 1977). No solo LVdf [2] não foi aplicado P, em razão do alto teor inicial desse nutriente. A aplicação do Ni foi efetuada juntamente com a adubação de semeadura, utilizando como fonte sulfato de Ni (NiSO₄.6H₂O).

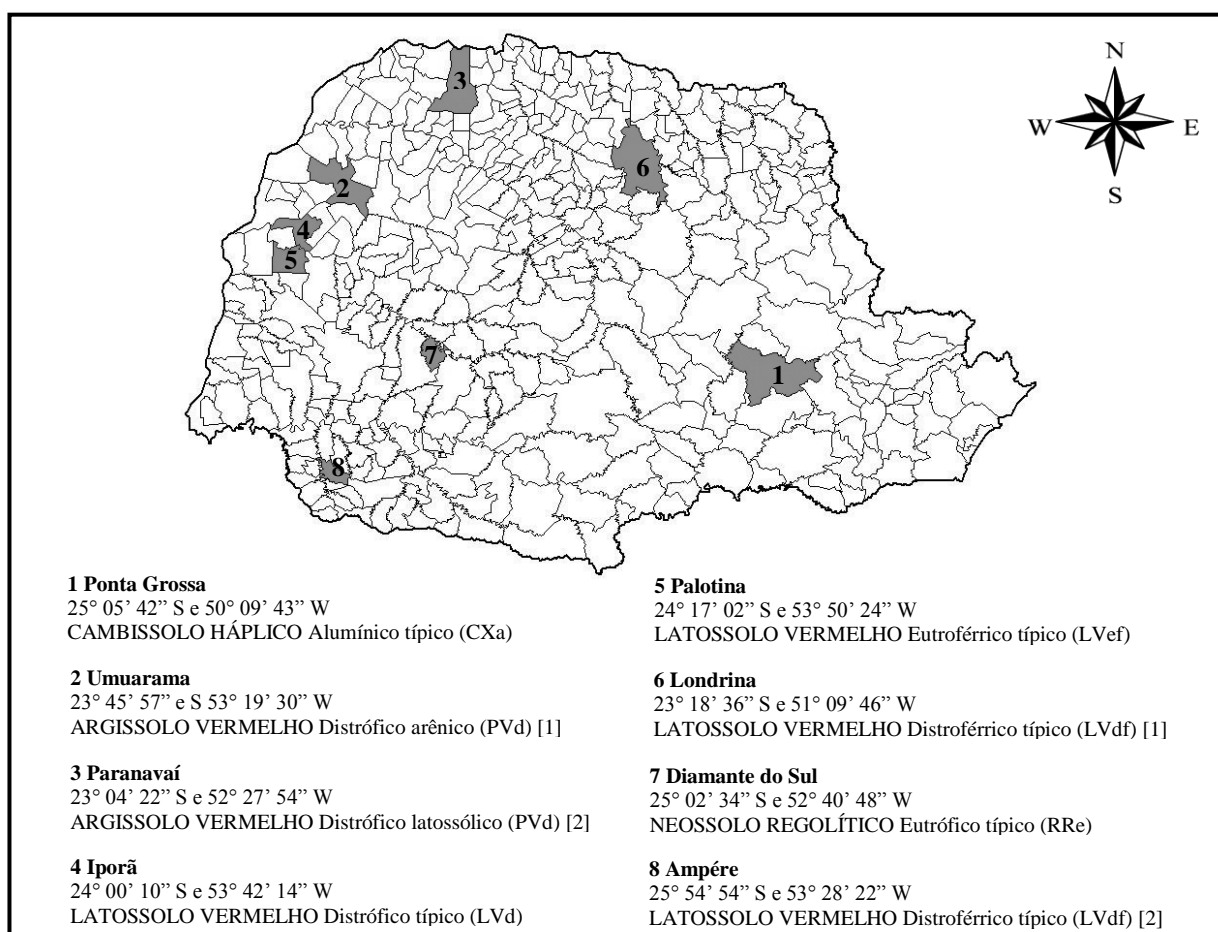


FIGURA 1. Localização e classificação dos solos do estado do Paraná.

Após a correção da acidez dos solos esses foram mantidos incubados por 10 dias até realizar a adubação de base e, posteriormente, foram mantidos mais 10 dias incubados, totalizando 20 dias desde a correção até a semeadura da soja. No período destinado a

incubação a umidade dos solos foi mantida em aproximadamente 50% da capacidade de retenção de água. A semeadura do cultivar BRS 360 RR foi realizada logo em seguida na profundidade de 1 cm. Foram semeadas dez sementes por vaso e procederam-se desbastes periódicos até restarem duas plantas por vaso. As sementes foram inoculadas com 2 mL kg⁻¹ (EMBRAPA SOJA, 2011) do produto comercial líquido SEMIA 5079 e SEMIA 5080, que continha a estirpe de *Bradyrhizobium japonicum*. Também foi efetuada inoculação no solo em V3, empregando-se uma solução com dose seis vezes maior que a utilizada nas sementes (EMBRAPA SOJA, 2011). A realização da segunda inoculação teve por objetivo garantir a efetividade da FBN.

Durante o ciclo de desenvolvimento das plantas foram efetuadas irrigações periódicas com água deionizada e o controle fitossanitário foi realizado sempre que necessário.

O experimento foi finalizado no estágio de desenvolvimento R3.

3.2.5 VARIÁVEIS ANÁLISADAS

No estágio de desenvolvimento R1 foram realizadas medições indiretas do teor de clorofila com um medidor eletrônico portátil de intensidade da cor verde das plantas (SPAD), modelo Digital SPAD 502. A leitura foi efetuada em dois pontos do folíolo central da terceira folha da haste principal do terço superior. Foi coletada a quarta folha do terço superior das plantas para quantificação da atividade das enzimas urease (Hogan et al., 1983; McCullough, 1967) e nitrato redutase (Hewitt & Smith, 1975; Mulder et al., 1959). A taxa fotossintética foi determinada na terceira folha da haste principal do terço superior, utilizando o aparelho *Portable Photosynthesis System* modelo LCpro-SD.

Foram coletadas a terceira folha e pecíolo do terço superior da haste principal para análise foliar de Ni e N total, quando as plantas encontravam-se no estágio de desenvolvimento R2 (EMBRAPA SOJA, 2011).

No estágio de desenvolvimento R3 a parte aérea das plantas foi seca em estufa com circulação de ar, a aproximadamente 60 a 65°C, por 72 horas. Após esse procedimento foi determinada a massa seca da parte aérea. O acúmulo de Ni nas plantas foi obtido a partir da multiplicação dos valores de teores de Ni da parte aérea versus sua massa seca. Foi efetuada análise dos teores disponíveis de Ni no solo após a coleta das plantas.

3.2.5.1 Análises dos solos e do tecido vegetal

As análises de solo foram realizadas segundo metodologia da EMBRAPA (2009), com exceção da determinação de carbono (C), S-SO₄, B e Ni (DTPA), realizadas segundo Raij et al. (2001). O teor de Ni disponível foi obtido por extrações simples, em Mehlich-1, relação solo:solução 1:10, e DTPA, relação solo:solução de 10:20. A quantificação foi realizada em espectrometria de emissão atômica (ICP-OES), modelo PerkinElmer Optima 8300 DV. A textura foi determinada pelo método da pipeta, conforme descrito em Camargo et al. (1986), utilizando como dispersante químico o hidróxido de sódio (NaOH) e hexametáfosfato de sódio (Na[NaPO₃]_nONa).

Para quantificação do N total no tecido vegetal foi efetuada digestão sulfúrica em sistema aberto (Jackson, 1958) e determinação de acordo com método analítico Kjeldahl (Bremner & Edwards, 1965). Para determinação dos teores de Ni no tecido vegetal o método analítico descrito por Malavolta et al. (1997) foi otimizado objetivando concentrar o extrator de determinação, para isso foram adicionados 6 mL de HNO₃ em 0,5 g de massa seca vegetal moída e realizada pré digestão das amostras durante 30 minutos antes de serem levadas ao forno micro-ondas modelo Mars Xpress (CEM) previamente programado para atingir a temperatura de 170 °C. Ao término da digestão as amostras eram diluídas para 15 mL utilizando água pura e quantificadas em ICP-OES.

O limite de quantificação do Ni em ICP-OES para o tecido vegetal foi de 0,084 mg kg⁻¹ e Ni disponível no solo de 0,1 e 0,013 mg dm⁻³ para Mehlich-1 e DTPA, respectivamente. Amostras de referência de solo (BCR[®] - 142R) e liquen (BCR[®] - 402) certificadas pela *European Commission - Joint Research Centre, Institute for Reference Materials and Measurements*, foram utilizadas para garantir o controle de qualidade das análises.

3.2.6 ANÁLISE ESTATÍSTICA

Os resultados foram submetidos à análise de variância (Teste F) e comparados pelo teste de Tukey (p < 0,05). As relações entre massa seca da parte aérea das plantas de soja, teores de Ni foliar, acúmulo de Ni no tecido vegetal e disponibilidade de Ni nos solos foram avaliadas mediante ajustes de modelos de regressão e correlação linear de Pearson. A massa seca da parte aérea das plantas foi transformada em valores relativos com base na produção máxima (100%). Foi realizada análise de componentes principais (ACP) entre as variáveis avaliadas. Os softwares utilizados para a análise estatística foram CANOCO versão 4.5 (Ter

Braak & Smilauer, 1988), SigmaPlot 10.0 (2006) e *Statistical Analysis System* (SAS), conforme Pimentel-Gomes & Garcia (2002).

3.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

As plantas de soja cultivadas com fornecimento de Ni apresentaram maior atividade da enzima urease quando comparadas com as plantas sem fornecimento desse micronutriente (Tabela 3). O solo LVdf [2] foi a exceção, devido apresentar teor inicial disponível de 1,33 e 0,74 mg dm⁻³ de Ni em Mehlich-1 e DTPA, respectivamente. Neste solo a atividade enzimática foi reduzida com a aplicação de Ni, indicando provável excesso/toxidez desse micronutriente as plantas. A menor atividade enzimática nas plantas foi de 9,35 μmol N-NH₄⁺ g MF⁻¹ h⁻¹, verificada nas plantas cultivadas no solo CXa sem fornecimento de Ni. Esse solo apresentava o menor teor inicial disponível de Ni entre os solos estudados e, também como nos demais solos de característica textural arenosa, mostrou maior amplitude de resposta da atividade da urease ao Ni. Os maiores valores da atividade enzimática foram de 28,35 e 28,72 μmol N-NH₄⁺ g MF⁻¹ h⁻¹, nas plantas cultivadas nos solos de PVd [1] e PVd [2] com fornecimento de Ni, respectivamente. Desta forma, ficando evidente que o fornecimento de Ni pode aumentar a atividade dessa enzima, uma vez que esse micronutriente é componente estrutural da urease (Dixon et al., 1975).

Aumentos de atividade da enzima urease com fornecimento de Ni também foram relatados em plantas de soja por Dalton et al. (1985), Eskew et al. (1983; 1984), Klucas et al. (1983) e Krogmeier et al. (1991).

A atividade da enzima nitrato redutase variou de 0,86 a 1,48 μmol N-NO₂⁻ g MF⁻¹ h⁻¹, não apresentando diferença estatística em função da aplicação de Ni ou entre os solos estudados (Tabela 3). Esses resultados corroboram com os estudos de Kevresan et al. (1998), os quais não verificaram influência do Ni sobre atividade da nitrato redutase.

O conteúdo de clorofila nas plantas de soja variou de 0,013 a 0,023 mg cm⁻² e a taxa fotossintética de 13,16 a 18,16 μmol CO₂ m⁻² s⁻¹, diferindo estatisticamente (Tabela 3). O comportamento observado foi semelhante ao da atividade da enzima urease, em que o fornecimento de Ni proporcionou incrementos no conteúdo de clorofila e na taxa fotossintética, principalmente nos solos com baixos teores iniciais disponíveis. Diversos estudos relatam que o Ni exerce influência no conteúdo de clorofila (Gerendás &

TABELA 1. Caracterização química de amostras de solos (0 a 20 cm) do estado do Paraná.

Solo	C	pH	H + Al	Al	Ca	Mg	K	S-SO ₄	P	Cu	Zn	Fe	Mn	B	Ni-M1 ⁽¹⁾	Ni- DTPA ⁽²⁾
	g dm ⁻³	CaCl ₂	.....	.....	cmolc dm ⁻³	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	mg dm ⁻³	.....	.....	.....
CXa	29,29	4,74	6,95	0,22	2,29	0,9	0,19	6,52	2,31	1,79	1,47	78,01	24,2	0,24	0,11	0,08
PVd [1]	11,69	4,79	3,11	0,24	0,83	0,15	0,11	2,46	3,57	1,18	2,57	34,13	113,6	0,14	0,15	0,09
PVd [2]	14,04	5,16	3,22	0,17	1,36	0,67	0,1	4,05	1,81	1,47	1,92	80,51	133,08	0,18	0,2	0,11
LVd	12,65	5,29	3,32	0,05	2,15	0,44	0,04	1,88	6,47	1,53	3,09	29,19	93,66	0,23	0,24	0,13
PVef	12,67	4,35	6,69	0,61	4,04	0,72	0,79	4,78	60	7,57	9,23	40	222,5	0,98	0,33	0,16
LVdf [1]	16,7	5,12	5,12	0,13	3,81	1,8	0,51	17,98	3,03	26,62	3,64	44,79	166,6	0,28	0,75	0,45
RRe	27,24	5,12	5,95	0,14	5,19	2,29	1,39	119,74	12,11	14,59	11,35	102,24	280,56	0,41	1,1	0,65
LVdf [2]	31,6	5,68	4,58	0,14	8,11	2,16	0,59	4,64	166,4	18,71	25,82	32,1	277,18	0,34	1,33	0,74

⁽¹⁾ Ni disponível extraído com Mehlich-1 (determinação em ICP-OES); ⁽²⁾ Ni disponível extraído com DTPA (determinação em ICP-OES); Al, Ca e Mg - Cloreto de potássio; P, K, Cu, Zn, Fe e Mn - Mehlich-1; C - Colorimetria; H + Al - Solução tampão SMP; S-SO₄ Fosfato mono cálcico; B - Cloreto de bário; CXa - CAMBISSOLO HÁPLICO Alumínico típico (Ponta Grossa); PVd - ARGISSOLO VERMELHO Distrófico arênico (Umuarama [1] e Paranavaí [2]); LVd - LATOSSOLO VERMELHO Distrófico típico (Iporã); LVef - LATOSSOLO VERMELHO Eutrófico típico (Palotina); LVdf - LATOSSOLO VERMELHO Distrófico típico (Londrina [1] e Ampére [2]); RRe - NEOSSOLO REGOLÍTICO Eutrófico típico (Diamante do Sul).

TABELA 2. Caracterização textural de amostras de solos (0 a 20 cm) do estado do Paraná.

Solo	Textura (g kg ⁻¹) ⁽¹⁾			Classe ⁽²⁾
	Argila	Silte	Areia	
CXa	44,1	5,7	50,2	Argilo-arenosa
PVd [1]	6,1	1,22	92,68	Arenosa
PVd [2]	12,62	2	85,38	Areia franca
LVd	20,25	3,62	76,13	Franco-arenosa
PVef	77	12	11	Muito argilosa
LVdf [1]	73,4	15,22	11,38	Muito argilosa
RRe	61,4	27,62	10,98	Muito argilosa
LVdf [2]	64,04	21,88	14,08	Muito argilosa

⁽¹⁾ Camargo et al. (1986); ⁽²⁾ EMBRAPA SOLOS (2006); CXa - CAMBISSOLO HÁPLICO Alumínico típico (Ponta Grossa); PVd - ARGISSOLO VERMELHO Distrófico arênico (Umuarama [1] e Paranavaí [2]); LVd - LATOSSOLO VERMELHO Distrófico típico (Iporã); LVef - LATOSSOLO VERMELHO Eutrófico típico (Palotina); LVdf - LATOSSOLO VERMELHO Distrófico típico (Londrina [1] e Ampére [2]); RRe - NEOSSOLO REGOLÍTICO Eutrófico típico (Diamante do Sul).

TABELA 3. Influência do níquel (Ni) na atividade das enzimas urease e nitrato redutase, conteúdo de clorofila, taxa fotossintética, nitrogênio (N) total e massa seca da parte aérea em plantas de soja cultivada em oito classes de solos do estado do Paraná.

Solo	Dose de Ni (mg dm ⁻³)	Urease ($\mu\text{mol N-NH}_4^+$ g MF ⁻¹ h ⁻¹)	Nitrato redutase ($\mu\text{mol N-NO}_2^-$ g MF ⁻¹ h ⁻¹)	Clorofila (mg cm ⁻²)	Taxa fotossintética ($\mu\text{mol CO}_2$ m ⁻² s ⁻¹)	N total (g kg ⁻¹)	Massa seca da parte aérea (g/planta)
CXa	0,0	9,35 b D	1,1	0,016 b ABCD	15,54 b A	45,17	13,33
	0,5	23,91 a B	1,45	0,023 a A	18,16 a A	46,04	13,92
PVd [1]	0,0	22,71 b A	1,08	0,013 b D	13,16 b B	46	9,09
	0,5	28,35 a A	1,02	0,017 a C	16,22 a BC	46,25	8,23
PVd [2]	0,0	22,03 b A	1,35	0,015 b BCD	14,13 b AB	45,4	11,9
	0,5	28,72 a A	1,36	0,019 a BC	16,65 a ABC	46,38	13,69
LVd	0,0	17,52 b B	1,16	0,015 b CD	14,56 b AB	46,22	9,8
	0,5	25,55 a B	1,02	0,02 a ABC	17,52 a AB	46,44	8,3
PVef	0,0	13,23 b C	1,07	0,014 b CD	13,26 b B	41,74	13,11
	0,5	20,88 a C	1,12	0,017 a C	15,2 a C	45,32	9,83
LVdf [1]	0,0	18,27 b B	1,14	0,019 b AB	14,35 b AB	43,52	12,46
	0,5	21,35 a C	1,48	0,021 a AB	16,9 a ABC	45,99	11,43
RRe	0,0	18,51 b B	0,86	0,019 b A	15,41 a A	46,5	13,95
	0,5	23,74 a B	1,07	0,022 a AB	16,34 a ABC	44,16	14,13
LVdf [2]	0,0	23,4 a A	1,18	0,017 a ABC	14,9 a AB	45,57	14,23
	0,5	20,44 b C	1,05	0,017 a C	15,55 a C	44,03	14,08
Teste F		**	ns	**	*	ns	ns
CV(%)		4,17	21,15	8,74	5,55	4,43	12,33

^{ns} não significativo; ** significativo ao nível de $p < 0,01$; * significativo ao nível de $p < 0,05$; As médias seguidas de uma mesma letra minúscula, para dose no mesmo solo, e maiúsculas entre os solos na mesma dose, não diferem entre si pelo teste Tukey ao nível de $p < 0,05$. CXa - CAMBISSOLO HÁPLICO Alumínico típico (Ponta Grossa); PVd - ARGISSOLO VERMELHO Distrófico arênico (Umuarama [1] e Paranavaí [2]); LVd - LATOSSOLO VERMELHO Distrófico típico (Iporã); LVef - LATOSSOLO VERMELHO Eutrófico típico (Palotina); LVdf - LATOSSOLO VERMELHO Distrófico típico (Londrina [1] e Ampére [2]); RRe - NEOSSOLO REGOLÍTICO Eutrófico típico (Diamante do Sul).

Sattelmacher, 1997a; McIlveen & Negusanti, 1994; Moraes et al., 2009; Rahman et al., 2005; Tan et al., 2000; Wong & Chang, 1991) e na taxa fotossintética (Moraes et al., 2009).

O aumento da atividade da enzima urease com o fornecimento do Ni pode ter possibilitado maior assimilação e utilização mais eficiente do N pelas plantas de soja. Conseqüentemente aumentando a taxa fotossintética, com isso ocorre aumento do conteúdo de clorofila, pois esse nutriente é um dos principais constituintes desse pigmento.

Entretanto, os teores de N total nas plantas de soja variaram de 41,74 a 46,50 g kg⁻¹ não diferindo estatisticamente (Tabela 3). Os resultados desse estudo corroboram com os obtidos por Gerendás & Sattelmacher (1999), Neves et al. (2007) e Oliveira et al. (2013). Por outro lado, contrapõem com os resultados de Tan et al. (2000), que verificaram aumento no teor de N total com fornecimento de Ni.

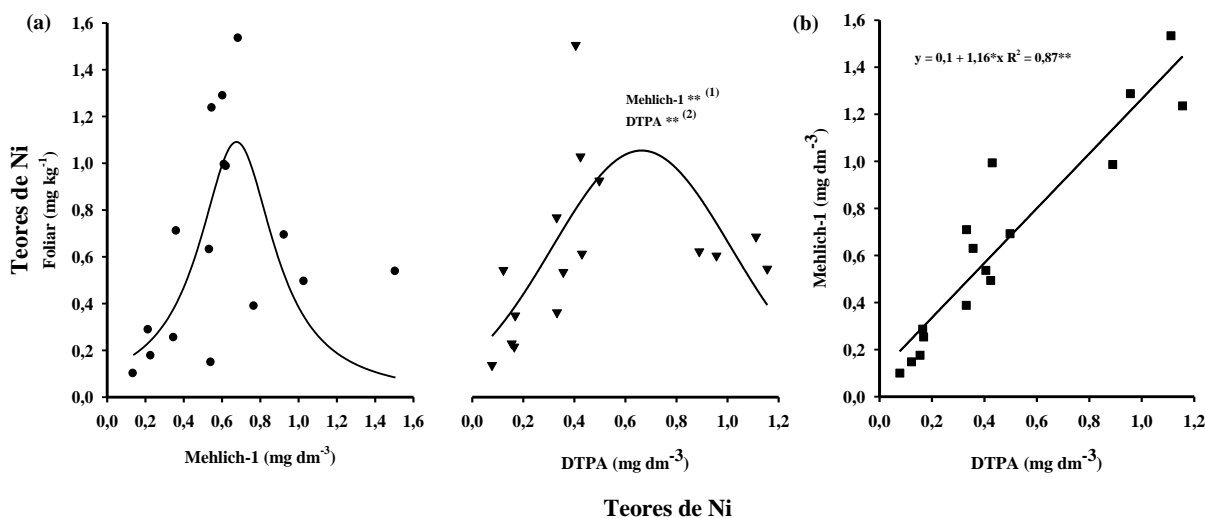
A massa seca da parte aérea das plantas de soja variou de 8,23 a 14,23 g/planta, sem diferir estatisticamente em razão do fornecimento de Ni e dos solos estudados (Tabela 3). Oliveira et al. (2013) e Gerendás & Sattelmacher (1997a) não verificaram aumento da massa seca de plantas de alface e centeio com o fornecimento de Ni. Todavia, diversos autores tem relatado aumento de crescimento em plantas com aplicação de Ni em várias espécies vegetais: Arnon (1937), Gerendás & Sattelmacher (1997a,b), Nicouland & Bloom (1998), Xue et al. (2000), Khoshgoftarmanesh et al. (2011), incluindo plantas de soja cultivadas em solução nutritiva (Krogmeier et al., 1991). Ressalta-se que a maioria dos estudos os quais verificou-se aumento de massa seca de plantas com o fornecimento de Ni foi realizado em solução nutritiva e, desta forma, desconsiderando o efeito do solo no suprimento desse micronutriente.

Portanto, apesar das plantas apresentarem respostas fisiológicas em função do fornecimento de Ni, como aumento da atividade da enzima urease, conteúdo de clorofila e taxa fotossintética, não foi o bastante para aumentar a produção de massa seca das plantas. Provavelmente o Ni proporciona maior acúmulo e/ou melhor utilização das substâncias de reservas das plantas. Entretanto, em condições ótimas de crescimento, como em condições controladas, na qual não se tem nenhum tipo de estresse, esse melhor uso das reservas não é significante. Todavia, ressalta-se que essa pressuposição precisa ser comprovada, uma vez que, no presente estudo, não foram avaliadas as substâncias de reservas das plantas e também condições com variação de estresse.

O cultivar de soja BRS 360 RR apresentava teores iniciais de Ni na semente de 1,96 mg kg⁻¹. Como os teores de Ni requeridos pelas plantas são quantias pequenas, acredita-se que a ausência de resposta da massa seca da parte aérea da soja também possa estar relacionada ao

suprimento desse micronutriente pelos teores iniciais das sementes. Tomando como base o teor inicial de Ni na semente do cultivar empregado nesse estudo, pode-se aferir que uma semente de soja apresentou em média aproximadamente 0,34 μg de Ni. Desta forma, o teor inicial da semente contribuiu com aproximadamente 2,43 a 18,88% da quantia total de Ni acumulado pelas plantas: 1,8 a 14 μg (Figura 3).

Os teores disponíveis no solo após o cultivo variaram de < 0,10 a 1,53 e 0,07 a 1,15 mg dm^{-3} de Ni em Mehlich-1 e DTPA, respectivamente, com correlação (r) entre os extratores altamente significativa ($r = 0,93^{**}$) (Tabela 4 e Figura 2b). Os teores foliares de Ni nas plantas de soja variaram de 0,13 a 1,50 mg kg^{-1} (Tabela 4 e Figura 2a). Entretanto, não foi verificada correlação entre os teores foliares de Ni e sua disponibilidade, determinada com extração em Mehlich-1 ($r = 0,24^{\text{ns}}$) e DTPA ($r = 0,27^{\text{ns}}$). Os teores foliares obtidos no presente trabalho enquadram-se na faixa de 0,05 a 5 mg kg^{-1} de Ni, usualmente encontrada em plantas cultivadas em solos não contaminados com esse micronutriente (Brooks, 1980; Welch, 1981). Bem como são similares aos obtidos no estudo do Capítulo II, no qual os teores foliares do cultivar de soja em questão variaram de 0,08 a 2,78 mg dm^{-3} , com aplicação de até 5,0 mg dm^{-3} Ni.



⁽¹⁾ $y = 1,09 * (1,0 * (1 / (1 + ((x - 0,67) / 0,23)^2))) + (1 - 1,0) * \exp(-0,5 * ((x - 0,67) / 0,23)^2)$ $R^2 = 0,44^{**}$; ⁽²⁾ $y = 1,05 * \exp(-,5 * ((x - 0,66) / 0,35)^2)$ $R^2 = 0,44^{**}$.

FIGURA 2. Relações entre (a) teores foliares de níquel (Ni) em plantas de soja e sua disponibilidade no solo com extração em Mehlich-1 e DTPA, (b) relação entre extratores, em oito solos do estado do Paraná (** significativo ao nível de $p < 0,01$; * significativo ao nível de $p < 0,05$ pelo teste de F).

O modelo de regressão ajustado para os teores foliares apresenta ponto de máxima estimado com teores no solo de 0,66 mg dm⁻³ de Ni para ambos os extratores (Figura 2). As plantas cultivadas nos solos com característica textural arenosa, que apresentavam menores teores disponíveis de Ni, foram as que apresentaram os maiores teores foliares desse micronutriente. Provavelmente isso se deve a pronta disponibilidade de Ni na solução desses solos, pois, devido a menor área de superfície específica (ASE) ocorre menor adsorção de Ni e, conseqüentemente, menor efeito tamponante. Comportamento oposto ocorreu nos solos com característica textural argilosa, nos quais houve fornecimento gradativo de Ni para as plantas, devido a maior adsorção desse micronutriente nos minerais silicatados da fração argila, matéria orgânica do solo (MOS) e nos óxidos de Fe e Mn (Amaral Sobrinho et al., 2009). Outra justificativa é um provável efeito tóxico do Ni provocando menor crescimento do sistema radicular das plantas de soja e reduzindo sua absorção pelas plantas.

TABELA 4. Teores foliares de níquel (Ni) em soja no estágio de desenvolvimento R2 e disponibilidade em Mehlich-1 e DTPA após cultivo das plantas em oito classes de solos do estado do Paraná submetidas à aplicação de Ni.

Solo	Dose de Ni (mg dm ⁻³)	Disponibilidade Ni no solo (mg dm ⁻³) ⁽¹⁾		Teor foliar (mg dm ⁻³) ⁽¹⁾
		Mehlich-1	DTPA	
CXa	0,0	< 0,1	0,078	0,13
	0,5	0,38	0,33	0,76
PVd [1]	0,0	0,15	0,12	0,54
	0,5	0,54	0,41	1,50
PVd [2]	0,0	0,18	0,16	0,22
	0,5	0,49	0,42	1,02
LVd	0,0	0,25	0,17	0,34
	0,5	0,69	0,5	0,92
PVef	0,0	0,29	0,17	0,21
	0,5	0,63	0,36	0,53
LVdf [1]	0,0	0,71	0,33	0,36
	0,5	0,99	0,43	0,61
RRe	0,0	0,99	0,89	0,62
	0,5	1,24	1,16	0,54
LVdf [2]	0,0	1,29	0,96	0,6
	0,5	1,53	1,11	0,68

⁽¹⁾ Determinação em ICP-OES. CXa - CAMBISSOLO HÁPLICO Alumínico típico (Ponta Grossa); PVd - ARGISSOLO VERMELHO Distrófico arênico (Umuarama [1] e Paranavaí [2]); LVd - LATOSSOLO VERMELHO Distrófico típico (Iporã); LVef - LATOSSOLO VERMELHO Eutrófico típico (Palotina); LVdf - LATOSSOLO VERMELHO Distroférrico típico (Londrina [1] e Ampére [2]); RRe - NEOSSOLO REGOLÍTICO Eutrófico típico (Diamante do Sul).

O acúmulo de Ni nas plantas de soja variaram de 1,8 a 14 $\mu\text{g/planta}$ (Figura 3), exibindo correlação distinta a verificada para os teores foliares e extratores, pois diferiu estatisticamente e apresentou relação direta com os teores disponíveis extraídos em Mehlich-1 ($r = 0,79^{**}$) e DTPA ($r = 0,86^{**}$). Contudo, os modelos de regressão não apresentam ajustes altamente explicativos do seu comportamento, como também foi verificado para os teores foliares. Foi possível estimar que teores disponíveis de aproximadamente $2,6 \text{ mg dm}^{-3}$ de Ni, para ambos os extratores, proporcionariam os maiores acúmulos desse micronutriente nas plantas de soja (Figura 3). É importante enfatizar que o valor estimado de Ni no solo associado ao seu maior acúmulo, apresenta-se muito alto se comparado aos teores no solo em que houve maior produção de massa seca (Tabelas 3 e 4).

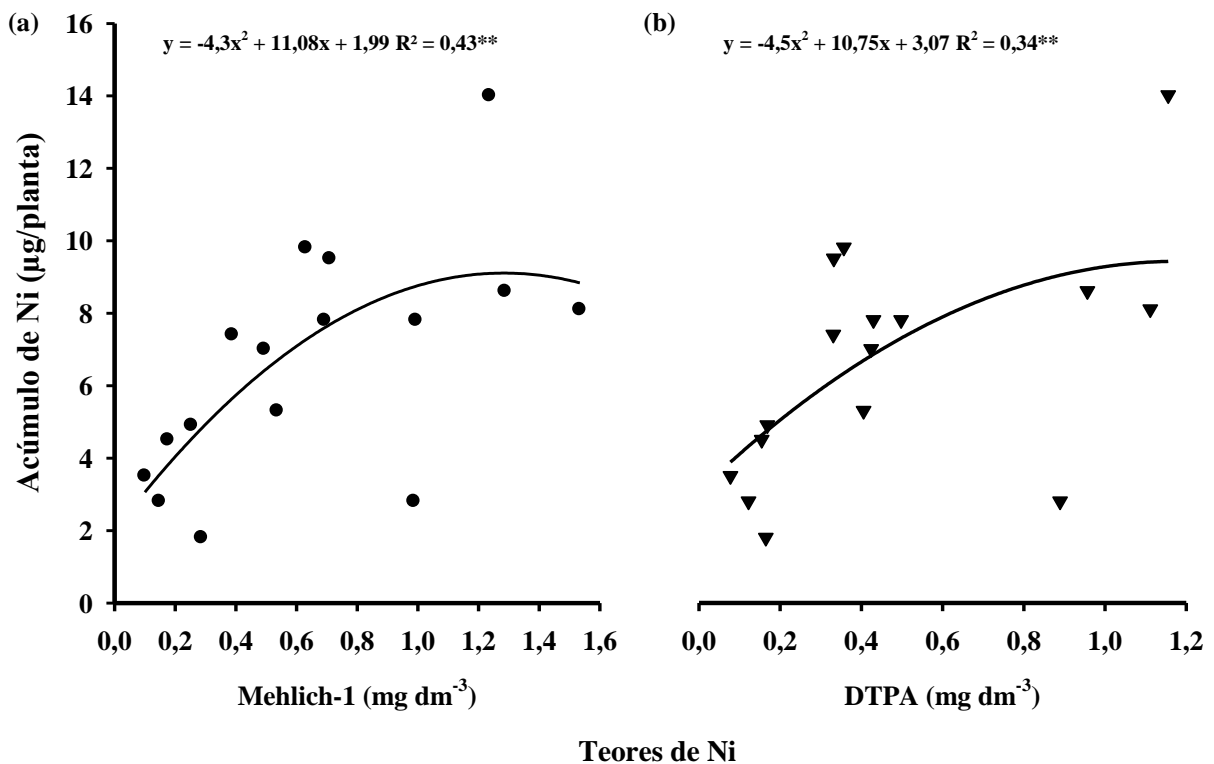


FIGURA 3. Relação entre acúmulo de níquel (Ni) em soja e seus teores disponíveis em solos, com extração em (a) Mehlich-1 e (b) DTPA (** significativo a $p < 0,01$ pelo teste de F).

A baixa correlação ou ausência de um comportamento biológico dos teores foliares e acúmulo versus disponibilidade de Ni, deve-se provavelmente, a dificuldade de quantificação uma vez que o Ni é um micronutriente traço, tanto no solo como nas plantas. Ressalta-se também que a pequena dose de Ni fornecida às plantas, para que não ocorresse toxidez, não aumentou muito os teores do elemento no solo e plantas, justificando a baixa significância nas correlações e modelos de regressão verificados no presente estudo. O comportamento

diferenciado do Ni para cada classe de solo também pode justificar os resultados obtidos, desta forma, em futuros estudos visando o estabelecimento de níveis críticos de Ni deve-se primeiramente levar em consideração cada solo de maneira isolada para posteriormente aferir um posicionamento generalista.

Para determinação dos níveis críticos, foram plotados os rendimentos relativos da massa seca da parte aérea das plantas de soja em função dos teores disponíveis e foliares de Ni (Figura 4). Não foram verificadas relações entre essas variáveis, impossibilitando o estabelecimento de níveis críticos desse micronutriente. Portanto, o Ni não apresentou níveis críticos para os solos estudados e para a parte aérea das plantas de soja.

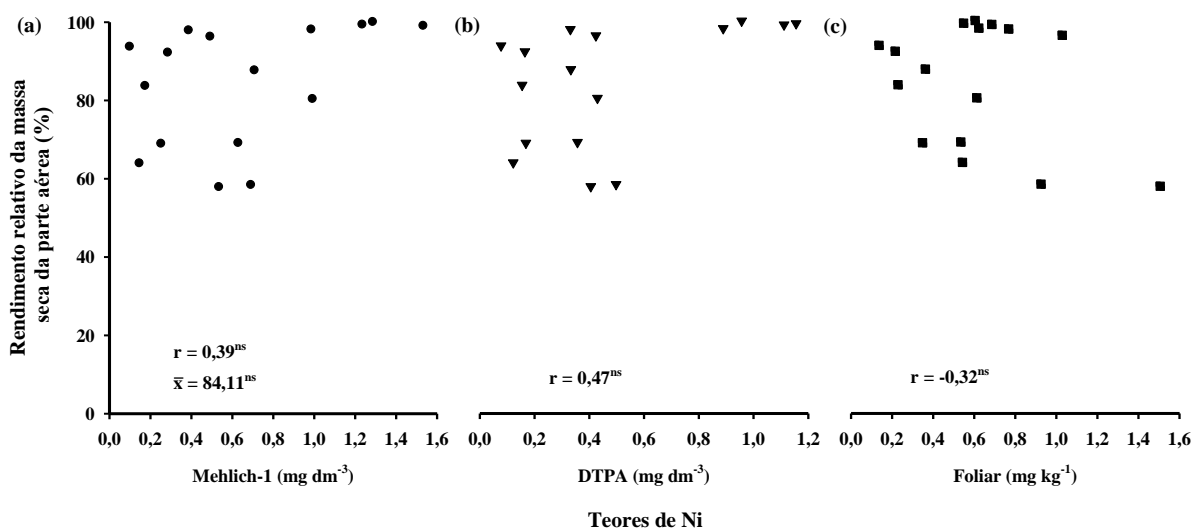
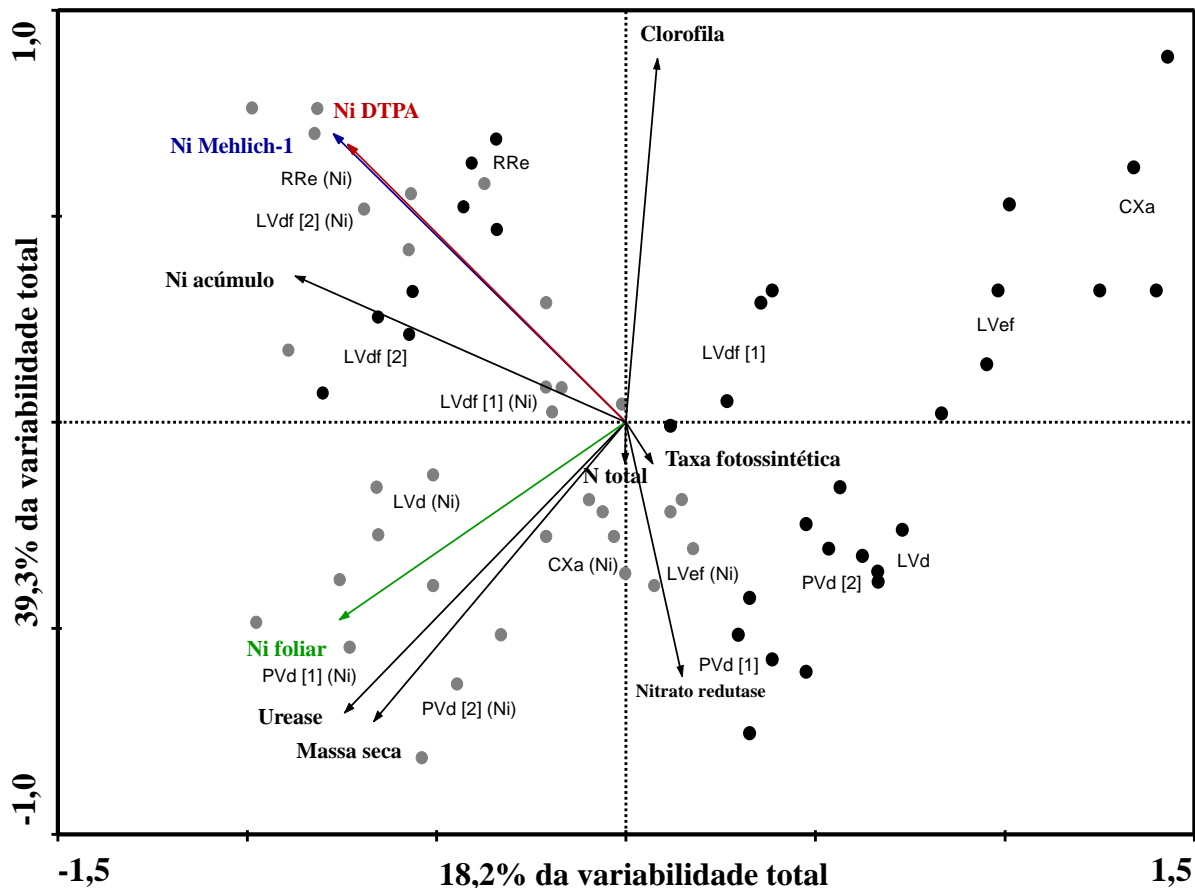


FIGURA 4. Relações entre rendimento relativo de massa seca da parte aérea de plantas de soja com teores disponíveis de níquel (Ni) em solos, com extração em (a) Mehlich-1 e (b) DTPA e com (c) teores foliares (^{ns} não significativo a $p < 0,05$ pelo teste de F e pelo coeficiente de correlação linear de Pearson).

Ressalta-se que quando a dose de $0,5 \text{ mg dm}^{-3}$ de Ni foi fornecida as plantas apresentaram teores foliares médios de $0,82 \text{ mg kg}^{-1}$ de Ni, teores disponíveis de $0,59 \text{ mg dm}^{-3}$ de Ni em DTPA e $0,81 \text{ mg dm}^{-3}$ de Ni em Mehlich-1, teores esses que estimularam o aparato fisiológico da soja. Visando o estabelecimento de níveis críticos de Ni e adequação desses valores sugere-se avaliar solos com teores disponíveis baixos, genótipos com pequenos teores desse micronutriente na semente e, principalmente, definir níveis adequados de Ni em grãos de soja.

A ACP apresenta uma síntese da influência do fornecimento de Ni em plantas de soja (Figura 5). O fornecimento de $0,5 \text{ mg dm}^{-3}$ aumenta a disponibilidade de Ni no solo, bem como no tecido vegetal, que exercem influência principalmente na atividade da enzima



CXa - CAMBISSOLO HÁPLICO Alumínico típico (Ponta Grossa); PVd - ARGISSOLO VERMELHO Distrófico arênico (Umuarama [1] e Paranavaí [2]); LVd - LATOSSOLO VERMELHO Distrófico típico (Iporã); LVef - LATOSSOLO VERMELHO Eutroférico típico (Palotina); LVdf - LATOSSOLO VERMELHO Distroférico típico (Londrina [1] e Ampére [2]); RRe - NEOSSOLO REGOLÍTICO Eutrófico típico (Diamante do Sul).

FIGURA 5. Análise de componentes principais (ACP) entre atividade das enzimas urease e nitrato redutase, conteúdo de clorofila, taxa fotossintética, nitrogênio (N) total, massa seca da parte aérea, teor de níquel (Ni) foliar, acúmulo de Ni e disponibilidade de Ni (Mehlich-1 e DTPA) em plantas de soja cultivadas em oito classes de solos do estado do Paraná, submetidas à aplicação de $0,0 \text{ mg dm}^{-3}$ (●) e $0,5 \text{ mg dm}^{-3}$ (●) de Ni (Solos que apresentam o último símbolo Ni foram submetidos a aplicação desse micronutriente).

urease, a qual o Ni é componente estrutural. O aumento da atividade enzimática relaciona-se diretamente com a massa seca da parte aérea das plantas de soja, como pode ser evidenciado pela ACP, apesar de não verificada diferença significativa (Tabela 3). Esse comportamento pode estar relacionado à atuação do Ni no metabolismo do N, que por sua vez é o principal nutriente relacionado ao crescimento vegetativo das plantas. Entretanto, o teor de N total e a taxa fotossintética não foram afetados de maneira preponderante pelo fornecimento de Ni, como abordado anteriormente. Acredita-se que o Ni possa exercer influência no melhor aproveitamento de substâncias de reserva nas plantas, tendo maior exigência quando as

plantas passam por condições de estresse durante seu ciclo de desenvolvimento. Por outro lado, o conteúdo de clorofila e a atividade da nitrato redutase não apresentam relação direta com o fornecimento de Ni, entretanto foram afetados de maneira indireta e mais preponderante que as alterações na taxa fotossintética e teor de N total. A explicação para este resultado deve-se provavelmente ao maior desenvolvimento do sistema radicular, que possibilita maior absorção de formas nítricas disponíveis no solo pelas plantas, permitindo maior atividade da enzima nitrato redutase, como observado no estudo do Capítulo II. Enquanto o conteúdo de clorofila é influenciado indiretamente pelos teores de N assimilado pelas plantas, uma vez que o N é um dos principais constituintes desse pigmento.

3.4 CONCLUSÕES

O fornecimento de Ni proporcionou incrementos no aparato fisiológico das plantas de soja, como aumento da atividade da enzima urease, conteúdo de clorofila e taxa fotossintética. Entretanto, não afetou a atividade da enzima nitrato redutase, teor de N total e a produção de massa seca da parte aérea da soja. Os extratores Mehlich-1 e DTPA apresentaram correlação entre si quanto à disponibilidade de Ni e com o acúmulo desse micronutriente no tecido vegetal, mas não com os teores foliares. O micronutriente Ni não apresentou níveis críticos para os solos estudados e para a parte aérea das plantas de soja. Entretanto, teores foliares de $0,82 \text{ mg kg}^{-1}$ de Ni, teores disponíveis de $0,59 \text{ mg dm}^{-3}$ de Ni em DTPA e $0,81 \text{ mg dm}^{-3}$ de Ni em Mehlich-1, proporcionaram maiores estímulos fisiológicos as plantas.

3.5 AGRADECIMENTOS

Ao Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo da Universidade Federal do Paraná (UFPR), a EMBRAPA SOJA e a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES).

3.6 LITERATURA CITADA

AMARAL SOBRINHO, N.M.B.; BARRA, C.M. & LÃ, O.R. Química dos metais pesados no solo. In: MELO, V.F. & ALLEONI, L.R.F. (Eds.). Química e mineralogia do solo. Viçosa, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2009. p.249-312.

ARNON, D.I. Ammonium and nitrate nitrogen nutrition of barley and rice at different seasons in relation to hydrogen ion concentrations, manganese, copper and oxygen supplied. *Soil Science*, 44(2):91-121, 1937.

BREMNER, J.M. & EDWARDS, H.L. Determination and isotope ratio analysis of different forms of nitrogen in soils. I. Apparatus and procedures for distillation and determination for ammonium. *Soil Science Society of America Proceedings*, 29:504-507, 1965.

BROOKS, R.R. Accumulation of nickel by terrestrial plants. In: NRIAGU, J.O. (Ed.). *Nickel in the environment*. New York, Wiley and Sons, 1980. p.407-430.

BROWN, P.H.; WELCH, R.M. & CARY, E.E. Nickel: a micronutrient essential for higher plants. *Plant Physiology*, 85(3):801-803, 1987.

CAMARGO, O.A.; MONIZ, A.C.; JORGE, J.A. & VALADARES, J.M.A.S. Métodos de análise química, mineralógica e física de solo do Instituto Agronômico de Campinas. Campinas, Instituto Agronômico, 1986. 94p. (Boletim técnico, 106).

CONAB - COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. Acompanhamento da safra brasileira grãos 2012/13 - nono levantamento. Brasília, Companhia Nacional de Abastecimento, 2013. 31p.

DALTON, D.A.; EVANS, H.J. & HANUS, F.J. Stimulation by nickel of soil microbial urease activity and urease and hydrogenase activities in soybeans grown in a low-nickel soil. *Plant and Soil*, 88:245-258, 1985.

DIXON, N.E.; GAZZOLA, C.; BLAKELEY, R.L. & ZERNER, B. Jack bean urease (EC 3.5.1.5) a metalloenzyme: simple biological role for nickel. *Journal of the American Chemical Society*, 97(14):4131-4133, 1975.

EMBRAPA - EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes. 2.ed. Brasília, EMBRAPA Informações Tecnológicas, 2009. 627p.

EMBRAPA SOLOS - EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Sistema brasileiro de classificação de solos. 2.ed. Rio de Janeiro, EMBRAPA SOLOS, 2006. 306p.

EMBRAPA SOJA - EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Tecnologias de produção de soja - Região Central do Brasil 2012 e 2013. Londrina, EMBRAPA Soja, 2011. 261p. (Sistemas de Produção/EMBRAPA SOJA, ISSN 2176-2902, n.15).

EPA - UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. Background report on fertilizer use, contaminants and regulations. Disponível em: <<http://www.epa.gov/>>. Acesso em 08 dez. 2013.

ESKEW, D.L.; WELCH, R.M. & CARY, E.E. Nickel: an essential micronutrient for legumes and possibly all higher-plants. *Science*, 222(4624):621-623, 1983.

ESKEW, D.L.; WELCH, R.M. & NORVELL, W.A. Nickel in higher plants: further evidence for an essential role. *Plant Physiology*, 76(3):691-693, 1984.

FAO - FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS. Faostat. 2013. Disponível em: <<http://faostat.fao.org/site/567/default.aspx#ancor>>. Acesso em 24 jun. 2013.

FAQUIN, V.; HOFFMANN, C.R.; EVANGELISTA, A.R. & GUEDES, G.A.A. O potássio e o enxofre no crescimento da braquiária e do colômbio em amostras de um Latossolo da região noroeste do Paraná. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 19:87-94, 1995.

FONSECA, D.M.; GOMIDE, J.A.; ALVAREZ, V.V.H. & NOVAIS, R.F. Fatores que influenciam os níveis críticos de fósforo para o estabelecimento de gramíneas forrageiras: I. casa de vegetação. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 21: 27-34, 1997.

FEHR, W.R. & CAVINESS, C.E. Stages on soybean development. Ames: Iowa State University/Cooperative Extension Service, 1977. 11p. (Special Report, 80).

FRITZ, G.F. Mineral nutrition. In: NOGLE, G. & FRITZ, G.F. (Eds). *Introductory Plant Physiology*. New Jersey, Prentice-Hall, Inc: Englewood Cliffs, 1976. p.223-271.

GERENDÁS, J. & SATTELMACHER, B. Influence of Ni supply on grown and nitrogen metabolism of *Brassica napus* L. grown with NH_4NO_3 or urea as N source. *Annals of Botany*, 83:65-71, 1999.

GERENDÁS, J. & SATTELMACHER, B. Significance of Ni supply for growth, urease activity and the concentrations of urea, amino acids and mineral nutrients of urea-grown plants. *Plant and Soil*, 190:153-162, 1997a.

GERENDÁS, J. & SATTELMACHER, B. Significance of N source (urea vs. NH_4NO_3) and Ni supply for growth, urease activity and nitrogen metabolism of zucchini (*Cucurbita pepo convar. giromontina*). *Plant and Soil*, 196:217-222, 1997b.

HEWITT, E.J. & SMITH, T.A. *Plant mineral nutrition*. Londres, The English Universities Press, 1975. 298p.

HOGAN, M.E.; SWIFT, I.E. & DONE, J. Urease assay and ammonia release from leaf tissues. *Phytochemistry*, 22(3):663-667, 1983.

JACKSON, M.L. *Soil chemical analysis*: Englewood cliffs, N.T. Prentice Hall Inc., 1958. 498p.

KEVRESAN, S.; PETROVIC, N.; POPOVIC, M. & KANDRAC, J. Effect of heavy metals on nitrate and protein metabolism in sugar beet. *Biologia Plantarum*, 41:235-240, 1998.

KHOSHGOFTARMANESHA, A.H.; HOSSEINIB, F. & AFYUNIA, M. Nickel supplementation effect on the growth, urease activity and urea and nitrate concentrations in lettuce supplied with different nitrogen sources. *Scientia Horticulturae*, 130:381-385, 2011.

KLUCAS, R.V.; HANUS, F.J.; STERLING, A.R. & EVANS, H.J. Nickel: a micronutrient element for hydrogen-dependent growth of *Rhizobium japonicum* and for expression of urease activity in soybean leaves. Proceedings of the National Academy of Sciences, 80:2253-2257, 1983.

KROGMEIER, M.J.; McCARTY, G.W.; SHOGREN, D.R. & BREMNER, J.M. Effect of nickel deficiency in soybean on the phytotoxicity of foliar-applied urea. Plant and Soil, 135:283-286, 1991.

MALAVOLTA, E. Elementos de nutrição mineral de plantas. São Paulo: Agronômica Ceres, 1980. 215p.

MALAVOLTA, E.; VITTI, G.C. & OLIVEIRA, S.A. Avaliação do estado nutricional das plantas: princípios e aplicações. 2.ed., Piracicaba, POTAFOS, 1997. 319p.

MAPA - MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, PECUÁRIA E ABASTECIMENTO. Instrução Normativa MAPA 5/2007 (D.O.U. 01/03/2007). 2013. Disponível em:<<http://sistemasweb.agricultura.gov.br/sislegis/action/detalhaAto.do?method=recuperarTextoAtoTematicaPortal&codigoTematica=1229260>>. Acesso em 24 jun. 2013.

McCULLOUGH, H. Determination of ammonia in whole blood by a direct colorimetric method. Clinica Chimica Acta, 17(2):297-304, 1967.

McILVEEN, W.D. & NEGUSANTI, J.J. Nickel in the terrestrial environment. Science of the Total Environment, 148:109-138, 1994.

MORAES, M.F.; REIS, A.R.; MORAES, L.A.C.; LAVRES-JUNIOR, J.; VIVIAN, R.; CABRAL, C.P. & MALAVOLTA, E. Effects of molybdenum, nickel, and nitrogen sources on the mineral nutrition and growth of rice plants. Communications in Soil Science and Plant Analysis, 40:3238-3251, 2009.

MULDER, E.G.; BOXMA, R. & VEEN, W.L.V. The effect of molybdenum and nitrogen deficiencies on nitrate reduction in plant tissues. Plant and Soil, 10:335-355, 1959.

NEVES, O.S.C.; FERREIRA, E.V.O.; CARVALHO, J.G. & SOARES, C.R.F.S. Adição de níquel na solução nutritiva para o cultivo de mudas de umbuzeiro. Revista Brasileira Ciência do Solo, 31(3):485-490, 2007.

NICOULAND, B.A.L. & BLOOM, A.J. Nickel supplements improve growth when foliar urea is the sole nitrogen source for tomato. Journal of the American Society for Horticultural Science, 123:556-559, 1998.

OLIVEIRA, T.C.; FONTES, R.L.F.; REZENDE, S.T. & VICTOR HUGO, A.V. Effects of nickel and nitrogen soil fertilization on lettuce growth and urease activity. Revista Brasileira de Ciência do Solo, 37(3):698-706, 2013.

PIMENTEL-GOMES, F. & GARCIA, C.H. Estatística aplicada a experimentos agronômicos e florestais: exposição com exemplos e orientações para uso de aplicativos. Piracicaba, FEALQ, 2002. 309p.

RAHMAN, H.; SABREEN, S.; ALAM, S. & KAWAI, S. Effects of nickel on growth and composition of metal micronutrients in barley plants grown in nutrient solution. *Journal of Plant Nutrition*, 28:393-404, 2005.

RAIJ, B. van; ANDRADE, J.C.; CANTARELLA, H. & QUAGGIO, J.A. Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais. IAC, 2001. 285p.

SIGMAPLOT. Scientific graphing software: versão 10.0. San Rafael, Hearne Scientific Software, 2006.

SELLSTEDT, A. & SMITH, G.D. Nickel is essential for active hydrogenase in free-living *Frankia* isolated from *Casuarina*. *Federation of European Microbiological Societies Microbiology Letters*, 70:137-140, 1990.

TAN, X.W.; IKEDA, H. & ODA, M. Effects of nickel concentration in the nutrient solution on the nitrogen assimilation and growth of tomato seedlings in hydroponic culture supplied with urea or nitrate as the sole nitrogen source. *Scientia Horticulturae*, 84:265-273, 2000.

TER BRAAK, C.J.F. & ŠMILAUER, P. CANOCO reference manual and user's guide to canoco for windows. Software for canonical community ordination (version 4). Ithaca, MicroComputer Power, 1998. 352p.

USDA - UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE. Oilseeds: world markets and trade. 2013. Disponível em: <<http://www.ers.usda.gov/topics/crops/soybeans-oil-crops.aspx#.UU-Mwxdwd6g>>. Acesso em 24 jun. 2013.

WELCH, R.M. The biological significance of nickel. *Journal of Plant Nutrition*, 3:345-356, 1981.

WONG, P.K. & CHANG, L. Effects of copper, chromium, and nickel on growth, photosynthesis, and chlorophyll a synthesis of *Chlorella pyrenoidosa* 251. *Environmental Pollution*, 72:127-139, 1991.

XUE, W.T.; HIDEO, I. & MASYUKI, O. Effects of Ni concentration in the nutrient solution on the N assimilation and growth of tomato seedlings in hydroponic culture supplied with urea or nitrate as the sole N source. *Scientia Horticulturae*, 84:265-273, 2000.

CONCLUSÃO GERAL

Em comparação a outros micronutrientes, os teores de Ni disponíveis se mostraram bastante baixos, variando em solos agrícolas e naturais de $< 0,1$ a $0,54 \text{ mg dm}^{-3}$ em Mehlich-1 e $< 0,013$ a $0,27 \text{ mg dm}^{-3}$ em DTPA. Houve alto grau de dificuldade para sua determinação, evidenciando a necessidade de mais pesquisas para determinação de faixas de valores e níveis críticos nos solos agrícolas. Os atributos químicos e texturais dos solos, bem como as atividades agrícolas, influenciam diretamente nos teores disponíveis de Ni. Os extratores Mehlich-1 e DTPA apresentaram diferenças quanto aos teores extraídos de Ni disponível, provavelmente em razão do princípio de extração: dissociação para o Mehlich-1 e complexação no caso do extrator DTPA, porém com alta relação entre si.

Aspectos fisiológicos das plantas de soja são potencializados com a aplicação de doses em torno de $0,5 \text{ mg dm}^{-3}$ de Ni, entretanto não contribuíram para o aumento dos componentes de produtividade. Portanto, a aplicação de Ni nas condições estudadas não se fez necessária. A exigência de Ni pelas plantas é baixa, sendo que o teor na semente pode suprir algumas gerações. Em solos com altos teores de Ni disponíveis pode ocorrer redução do desenvolvimento das plantas, conseqüentemente, da massa seca dos grãos de soja devido efeito excessivo/tóxico desse micronutriente.

O Ni não apresentou níveis críticos para os solos estudados e para a parte aérea das plantas de soja. Entretanto, considerando as respostas de estímulo fisiológicas as plantas deste estudo, sugere-se como níveis de referência: teores foliares de $0,30$ a $0,80 \text{ mg kg}^{-1}$ de Ni, teores disponíveis de $0,20$ a $0,60 \text{ mg dm}^{-3}$ de Ni em DTPA e $0,40$ a $0,80 \text{ mg dm}^{-3}$ de Ni em Mehlich-1.

Por fim, a disponibilidade de Ni nos solos está relacionada diretamente as características de cada classe de solo, entretanto, a resposta da soja ao Ni depende não somente do teor disponível no solo, mas também de teores iniciais das sementes e das condições do ambiente de cultivo, fatores estes que condicionam as exigências pelas plantas durante o ciclo de desenvolvimento.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Até o momento, a maioria dos estudos e discussões sobre a essencialidade do Ni nas plantas tem sido voltados na sua função como centro ativo da enzima urease. Novos estudos vêm demonstrando ou propondo outras funções do Ni as plantas, entretanto, se faz necessário que sejam comprovados e melhor compreendidos. Claramente, os estudos precisam ser expandidos para mais espécies vegetais e com abordagem mais exploratória.

O Ni desempenha importante papel no metabolismo do N nas plantas, o que sugere ampliar os estudos sobre sua influência na absorção e remobilização do N, estudando as rotas metabólicas e genéticas relacionadas à origem da ureia nas plantas. Por conseguinte, avaliar também a atividade da enzima urease, principalmente quando as plantas são submetidas a estresse durante seu desenvolvimento, o que nos leva a relatar a falta de informações do efeito do Ni em plantas cultivadas a campo, situação em que estão sujeitas a intemperes durante seu desenvolvimento. Os resultados do presente trabalho evidenciam que a atividade da enzima nitrato redutase não é afetada pelo micronutriente Ni e, desta forma, sua avaliação em estudos com Ni é dispensável.

Outra questão importante está relacionada com a concentração de Ni no tecido vegetal. Mesmo quando os teores disponíveis de Ni no solo são muito baixos, podem ser suficientes para a atividade da urease ou os próprios teores na semente podem suprir a demanda das plantas, levando ao questionamento de quanto se sabe sobre a absorção e remobilização interna de Ni nas plantas. Ressalta-se também a falta de entendimento dos mecanismos de tolerância e resistência de algumas plantas a toxidez desse micronutriente, ou mesmo, a compreensão do que acontece no aparato morfológico e fisiológico das plantas quando ocorre toxidez.

No caso específico da soja parece haver variação genotípica entre os atuais cultivares, necessitando de estudos voltados a compreensão dos mecanismos para maior eficiência e atuação do Ni no desenvolvimento das plantas de soja. Tais informações seriam úteis no posicionamento de futuros trabalhos para aferir recomendações de adubação com Ni para essa cultura. Pelos indícios do presente estudo, o fornecimento do Ni dependerá da interpretação dos teores disponíveis do solo, na semente, condições de ambiente e da variação genotípica dos cultivares.

Quanto aos estudos dos teores disponíveis no solo, se faz necessário aprofundar o conhecimento do comportamento e interação do Ni com atributos químicos, físicos e

biológicos para maior número de solos. Além de elucidar a relação entre os teores no tecido vegetal com a disponibilidade no solo sob vários extratores. Bem como definir qual seria o extrator mais adequado, possibilitando assim a padronização das análises.

Para futuros estudos visando o estabelecimento de níveis críticos de Ni sugere-se avaliar solos com teores disponíveis baixos, genótipos com pequenos teores desse micronutriente na semente e, principalmente, definir teores adequados de Ni em grãos de soja.

A compreensão desses pontos possibilitará o progresso das informações referentes ao micronutriente Ni na nutrição mineral de plantas, bem como, acredita-se, de realizar novas descobertas da sua atuação nas plantas.

RESUMO BIOGRÁFICO

Bruna Wurr Rodak, filha de Hélio José Rodak e Jacinta Wurr, nasceu em 16 de Julho de 1988, em Cruz Machado, Paraná (PR).

Cursou as séries iniciais (1^a até a 4^a) na Escola Municipal Prof. Bronislau Kapusniak, e completou os estudos do ensino fundamental e médio na Escola Estadual Barão do Cerro Azul, Cruz Machado.

Em 2007 ingressou no curso de Agronomia da Universidade Estadual do Centro-Oeste (UNICENTRO) - CAMPUS CEDETEG, Guarapuava, PR, graduando-se no ano de 2011 sob orientação da Prof.^a Dr.^a Aline Marques Genú. De fevereiro de 2012 a fevereiro de 2014, realizou o Curso de Mestrado em Ciência do Solo, na área de Propriedades e Processos Bioquímicos nos Ecossistemas sob orientação do Prof. Dr. Milton Ferreira de Moraes, no Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo da UFPR.

Estagiou na EMBRAPA SOJA sob orientação do Dr. Adilson de Oliveira Junior.