

TAINARA ROMANI FERREIRA

**TRATAMENTO DE SEMENTES COM O MICRONUTRIENTE NÍQUEL EM
PLÂNTULAS DE GENÓTIPOS DE SOJA**

Presidente Prudente – SP
2025

TAINARA ROMANI FERREIRA**TRATAMENTO DE SEMENTES COM O MICRONUTRIENTE NÍQUEL EM
PLÂNTULAS DE GENÓTIPOS DE SOJA**

Dissertação apresentada à Pró-Reitoria de Pesquisa e Pós-Graduação, Universidade do Oeste Paulista, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Agronomia. Área de concentração: Produção Vegetal.

Orientadora: Prof^a. Dr^a. Jessica Pigatto
Barcellos Putti

Catalogação Internacional de Publicação (CPI)

633.34
F383t

Ferreira, Tainara Romani

Tratamento de sementes com o micronutriente níquel em
plântulas de genótipos de soja / Tainara Romani Ferreira.

-- Presidente Prudente, 2025.

42 f.: il.

Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Universidade do Oeste
Paulista – Unoeste, Presidente Prudente, SP, 2025.

Bibliografia.

Orientadora: Jessica Pigatto Barcellos Putti.

1. Cultivares. 2. Germinação. 3. *Glycine max* (L.) merril. 4.
Nitrogênio I. Título.

Bibliotecária: Sofia da Cunha Gonçalves – CRB 8\10943

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO: “TRATAMENTO DE SEMENTES COM O MICRONUTRIENTE NÍQUEL EM PLÂNTULAS DE GENÓTIPOS DE SOJA”

AUTOR(A): TAINARA ROMANI FERREIRA

ORIENTADOR(A): Profa. Dra. JÉSSICA PIGATTO BARCELOS PUTTI

Aprovado(a) como parte das exigências para obtenção do título de MESTRE em AGRONOMIA

Área de Concentração PRODUÇÃO VEGETAL, pela Comissão Examinadora:

Profa. Dra. JÉSSICA PIGATTO BARCELOS PUTTI (orientadora)

UNOESTE - Universidade do Oeste Paulista / Presidente Prudente (SP)

Profa. Dra. CECI CASTILHO CUSTÓDIO

UNOESTE - Universidade do Oeste Paulista / Presidente Prudente (SP)

Profa. Dra. RAYSSA CAMARGO DE OLIVEIRA

UFU – Universidade Federal de Uberlândia (MG)

Data da realização: Presidente Prudente, 30 de abril de 2025.

Central de Assinaturas Eletrônicas

Sobre o documento

Assunto: Documento eletrônico
Status do documento: Concluído
Data de criação do documento: 05/05/2025 11:31
Fuso horário: (UTC-03:00) Brasília
Número de assinaturas: 3
Solicitante: KEID RIBEIRO KRUGER (#6115754)

Signatários do documento

JESSICA PIGATTO BARCELOS PUTTI (FUNCIONÁRIO)
jessica.pgb@gmail.com
Recebido em 05/05/2025 11:31
Assinado em 05/05/2025 12:16
Assinatura Interna UNOESTE
Usando endereço IP: 45.70.86.78
ID da assinatura: 4786017

CECI CASTILHO CUSTODIO (PROFESSOR)
ceci@unoeste.br
Recebido em 05/05/2025 11:31
Assinado em 05/05/2025 13:58
Assinatura Interna UNOESTE
Usando endereço IP: 2804:7f0:90b2:a8c3:5936:d5fc:b02c:de48
ID da assinatura: 4786018

RAYSSA CAMARGO DE OLIVEIRA (SIGNATÁRIO EXTERNO)
rayssacamargo@yahoo.com.br
Recebido em 05/05/2025 11:31
Assinado em 05/05/2025 12:02
Assinatura Interna UNOESTE
Usando endereço IP: 191.54.5.224
ID da assinatura: 4786019

URL do documento: <https://www.unoeste.br/ca/cfe7ee08>
Assinatura digital do documento: 5ea7e0c9836b977e87a3784fab43a25d10cbfab22bcb2ed346c78f3562fa999
UNOESTE - Universidade do Oeste Paulista
Mantida pela Associação Prudentina de Educação e Cultura - APEC

Utilize o QRCode abaixo para conferir a autenticidade deste documento:



RESUMO

Tratamento de sementes com o micronutriente níquel em plântulas de genótipos de soja

As práticas de manejo nutricional são essenciais para garantir a sustentabilidade da agricultura em agroecossistemas tropicais. No sistema de cultivo da soja, os genótipos modernos são cada vez mais produtivos e mais exigentes em nutrientes, dessa forma, surge a preocupação em termos da recomendação da adubação vigente em suprir a demanda nutricional das plantas. Nesse cenário, a aplicação de nutrientes emergentes, como por exemplo, o níquel (Ni), pode desempenhar um papel chave. Esse micronutriente é cofator das enzimas urease e hidrogenase, que atuam no metabolismo de nitrogênio (N) nas plantas, além de atuar na germinação das sementes. Contudo, estudos sobre métodos de aplicação desse micronutriente, principalmente tratamento de sementes, são incipientes. O presente projeto de pesquisa teve por objetivo avaliar a resposta das plântulas de uma gama de genótipos modernos de soja a fertilização com micronutriente Ni fornecido via tratamento de sementes. Ademais, visou determinar a dose agronômica desse micronutriente, bem como avaliar quais os sintomas característicos da sua fitotoxicidade. Em laboratório, seis doses de Ni foram testadas em seis genótipos modernos amplamente cultivados em condições tropicais. Para tal, o experimento foi implementado em papel próprio para germinação e conduzido em germinador sob condições controladas. Após 7 dias da implantação, foram avaliadas a altura da parte aérea e comprimento do sistema radicular. O delineamento do experimento foi inteiramente casualizados, com quatro repetições. Os resultados obtidos foram analisados por análise de variância e, quando significativos, foram realizadas análises de regressão e as médias comparadas pelo teste de Tukey ($p < 0,05$). As cultivares respondem de maneira diferente as doses de Ni. Para as cultivares responsivas, a aplicação de Ni via tratamento de sementes foi eficiente até a dose de Ni de 66 mg kg^{-1} de sementes. Doses de Ni maiores que 66 mg kg^{-1} de sementes aumentaram as porcentagens de plântulas anormais e sementes mortas, e reduziram os comprimentos radiculares e de parte aérea de plântulas.

Palavras-chave: Cultivares; germinação; *Glycine max* (L.) Merril; nitrogênio; variedades.

ABSTRACT

Seed treatment with the micronutrient nickel in soybean genotype seedlings

Nutritional management practices are essential to ensure the sustainability of agriculture in tropical agroecosystems. In the soybean cultivation system, modern genotypes are becoming more productive and more demanding in terms of nutrients, thus, there is concern regarding the current fertilizer recommendation to attend the nutritional plants demand. In this scenario, the application of emerging nutrients, such as nickel (Ni), can play a key role. This micronutrient is a cofactor of the enzymes urease and hydrogenase, which act in the nitrogen (N) metabolism in plants, in addition to acting in seed germination. However, studies on methods of application for this micronutrient, especially seed treatment, are incipient. The research project aims to evaluate the response of seedlings of modern soybean genotypes to fertilization with micronutrient Ni supplied in seed treatment. Furthermore, the project aims to determine the agronomic dose of this micronutrient, as well as evaluate the symptoms of its phytotoxicity. In the laboratory, six doses of Ni will be tested on six modern genotypes cultivated in tropical conditions. For this purpose, the experiment was implemented on germination paper and conducted in an incubator under controlled conditions. After seven days of implantation, the height of the aerial part and length of the root system were evaluated. The experimental design was completely randomized, with four replicates. The results were analyzed by analysis of variance and, when significant were analyzed by regression test, and the means were compared by the Tukey test ($p < 0.05$). Cultivars respond differently to Ni doses. For responsive cultivars, Ni application via seed treatment was beneficial up to a Ni dose of 66 mg kg⁻¹ of seeds. Ni doses greater than 66 mg kg⁻¹ of seeds increased the percentages of seedlings abnormal and dead seeds, and reduced the root and shoot lengths of seedlings.

Keywords: Cultivars; germination; *Glycine max* (L.) Merril; nitrogen; varieties.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 —	Característica dos seis genótipos de soja que foram utilizados no experimento.....	18
Tabela 2 —	Tabela de probabilidade de teste F ($p<0,005$) para os seguintes fatores: Cultivar (C), Dose de níquel (D), Cultivar x Dose de níquel, teste significância de regressão polinomial linear (px1) ou quadrática (px2).....	21

LISTA DE TABELA — ANEXO I

Tabela 3 —	Tabela de teste significância de regressão polinomial linear (p Linear) ou quadrática (p Quadrática) para os desdobramentos da interação C x D.....	40
------------	---	----

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 —	Plântulas normais.....	19
Figura 2 —	Plântulas anormais.....	19
Figura 3 —	Plântulas duras ou mortas.....	19
Figura 4 —	Porcentagem de Plântulas Normais em função da interação entre as cultivares e as doses de Ni.....	22
Figura 6 —	Porcentagem de Plântulas Anormais em função da interação entre as cultivares e as doses de Ni.....	23
Figura 7 —	Porcentagem de Sementes Mortas em função da interação entre as cultivares e as doses de Ni.....	24
Figura 9 —	Porcentagem de Germinação de Sementes em função dos diferentes cultivares.....	25
Figura 11 —	Comprimento radicular de plântulas em função da interação entre as cultivares e as doses de Ni.....	26
Figura 12 —	Ressessões lineares e quadráticas para Comprimento radicular de plântulas em função da interação entre as cultivares e as doses de Ni.....	27
Figura 13 —	Comprimento de Parte Aérea de plântulas em função da interação entre as cultivares e as doses de Ni.....	28
Figura 14 —	Ressessões lineares e quadráticas para o Comprimento de Parte Aérea de plântulas em função da interação entre as cultivares e as doses de Ni.....	29
Figura 15 —	Correlação de Pearson para as variáveis analisadas em função das diferentes cultivares e doses de Ni.....	30

LISTA DE FIGURAS — ANEXO I

Figura 5 —	Ressessão linear para a Porcentagem Plântulas Normais em função das Doses de Ni (mg kg^{-1} de semente).....	41
Figura 8 —	Ressessão linear para a Porcentagem Sementes Mortas em função dos diferentes cultivares.....	42
Figura 10 —	Ressessão linear para a Porcentagem de Germinação de Sementes em função das Doses de Ni (mg kg^{-1} de semente) ..	42

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	9
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	11
2.1	Cultivo de soja em condições tropicais.....	11
2.2	Uso do micronutriente Ni na agricultura.....	12
2.3	Métodos de aplicação do Ni na cultura da soja.....	13
2.4	Tratamento de sementes com micronutrientes.....	14
3	HIPÓTESE.....	16
4	OBJETIVOS.....	17
4.1	Objetivo geral.....	17
4.2	Objetivos específicos.....	17
5	MATERIAL E MÉTODOS.....	18
5.1	Delineamento experimental.....	18
5.2	Condução do experimento.....	18
5.3	Parâmetros avaliados.....	20
5.4	Análise de dados.....	20
6	RESULTADOS.....	21
7	DISCUSSÃO.....	31
8	CONCLUSÃO.....	33
	REFERÊNCIAS.....	34
	ANEXO I.....	40

1 INTRODUÇÃO

A soja [*Glycine max* (L.) Merril] é uma das culturas produtoras de grãos mais importantes da cadeia alimentar do mundo. O Brasil, atualmente é o país de maior produção de soja com uma área plantada de 47.449,9 milhões de hectares, com uma produção de 167.367,1 milhões de toneladas e uma média de produtividade de 3,5 toneladas por hectare. Dentre os estados brasileiros, o Mato Grosso lidera a produção de soja no Brasil, com uma colheita 48,4 milhões de toneladas colhidos em uma área de 12.735 milhões de hectares tendo uma produtividade média de 3,8 Kg de grãos por hectare (CONAB, 2023).

A semente é um dos principais insumos agrícolas que influenciam diretamente a produtividade da cultura da soja. Ela compreende o primórdio de sucesso da produção, pois contém todo o potencial genético e produtivo da planta (Reis *et al.*, 2005). Nesse contexto, a aplicação de elementos minerais nas sementes é uma prática rotineira na dinâmica de campo que contribui para elevar o desempenho produtivo das culturas. Embora os micronutrientes (Co, Mo, Ni, Zn, Fe, B, Mn, e Cu) sejam necessários em menores quantidades pelas plantas em comparação com os macronutrientes, sua importância não é menor. A deficiência desses elementos resulta em taxas de desenvolvimento de plantas comprometidas e produtividade reduzida.

Para que o tratamento de sementes com micronutrientes seja eficaz e estimule de forma positiva o desenvolvimento inicial das culturas, os produtos utilizados precisam ser manejados corretamente para que não proporcionem respostas negativas a qualidade fisiológica das sementes. Levando em consideração que é importante que não seja afetada nem a fase inicial quanto após colhido em período de armazenagem (Bork *et al.*, 2018).

Dentre os micronutrientes, o níquel (Ni) é um metal pesado, e foi o último nutriente a ser considerado essencial. Sua essencialidade foi demonstrada por Dixon *et al.* (1975) que identificaram a presença de dois átomos de Ni na composição estrutural da enzima urease. Essa metaloenzima é responsável pela catalização da ureia em dióxido de carbono (CO₂) e amônia (NH₃), influenciando a eficiência e a produtividade das culturas (Rodak *et al.*, 2015; Santos Neto *et al.*, 2018). Além da urease, o Ni participa da composição de outras enzimas importantes, como a

nitrogenase e a hidrogenase, desempenhando um papel fundamental no metabolismo do nitrogênio (N) nas espécies leguminosas.

A deficiência de Ni reduz a atividade da urease, levando ao acúmulo de ureia nos tecidos vegetais e provocando o aparecimento de manchas necróticas nas pontas das folhas. Em contrapartida, seu excesso diminui a taxa fotossintética e como consequência ocorre a redução dos pigmentos fotossintéticos, além de causar efeitos nocivos em processos fisiológicos e bioquímicos das plantas (Shahzad *et al.*, 2018).

Contudo, estudos sobre métodos de aplicação desse micronutriente, especialmente via tratamento de sementes, ainda são incipientes. Condicionado a resultados promissores do tratamento de sementes com o micronutriente Ni realizado em laboratório, ou seja, classificação dos genótipos em grupos distintos de responsividade, bem como adequação da dose agronômica, experimentos em condições de cultivo a campo ou casa de vegetação podem ser desenvolvidos para checar a responsividade das plantas ao tratamento de Ni via semente nos estádios fenológicos subsequentes de desenvolvimento das plantas de soja.

O presente projeto de pesquisa teve por objetivo avaliar a resposta das plântulas de uma gama de genótipos modernos de soja a fertilização com micronutriente Ni fornecido via tratamento de sementes. Ademais, visou determinar a dose agronômica desse micronutriente, bem como avaliar quais os sintomas característicos da sua fitotoxicidade.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Cultivo de soja em condições tropicais

A soja é uma planta herbácea, da classe Rosideae, ordem Fabales, família Fabaceae, subfamília Papilonoideae, gênero *Glycine* e espécie *Glycine max*, tem como centro de origem de cultivo a região asiática, norte da China, a partir do cruzamento de duas espécies de soja selvagem, inicialmente rasteira e cultivada as margens dos rios, introduzida provavelmente no período de 1.500 a 1.027 a.C., indicando que esta cultura pode ter sido uma das espécies mais antigas cultivadas pelo homem, onde, a partir de então, foram melhoradas e domesticadas (Reenberg, Fenger, 2011).

Atualmente, a soja é a leguminosa cultivada de maior relevância global. O alto teor de proteína de seus grãos – cerca de 40% – representa parte nutricional importante da dieta de humanos e animais, além de suas amplas aplicações industriais (Reenberg; Fenger, 2011). Embora a soja tenha sido introduzida no Brasil no final do século XIX, seu plantio comercial expressivo só ocorreu a partir da década de 1960; hoje o país é o maior produtor de soja produzindo em torno de 153 milhões de toneladas em uma área de 43,5 milhões de hectares, que corresponde a cerca de 42% da produção mundial (CONAB, 2023; USDA, 2023).

A introdução de cultivares de soja adaptados às condições tropicais de baixa latitude fizeram parte do programa brasileiro de incentivo ao cultivo de soja na década de 1960 e disseminaram seu cultivo nacionalmente. Eficiência da colheita mecanizada, resistência a doenças e pragas, bem como tolerância a solos de baixa fertilidade foram os objetivos desse programa (Cattelan, Dall'Agnol, 2018). Nesse contexto, deve-se destacar as tecnologias de manejo nutricional adotadas na cultura da soja, uma vez que os fertilizantes impactam significativamente o custo de produção e proporcionam efeitos diretos na produtividade, logo, na rentabilidade e na sustentabilidade dos sistemas de cultivo com essa leguminosa. Atualmente, a recomendação de adubação para soja é realizada com a interpretação da análise do solo e da análise foliar visando a aplicação de quantidades adequadas dos nutrientes, logo, proporcionando maior eficiência de uso pelas plantas. Práticas como calagem, gessagem, inoculação com bactérias fixadoras para suprimento de nitrogênio (N), adubação com os macronutrientes fósforo (P) e potássio (K), bem como dos

micronutrientes como boro (B), cobre (Cu), manganês (Mn), zinco (Zn) e molibdênio (Mo) e, do elemento benéfico cobalto (Co), são amplamente adotadas no cultivo sojícola (Embrapa Soja, 2020).

No entanto, com o surgimento de cultivares modernos de soja cada vez mais produtivos e mais exigentes em nutrientes, surge uma preocupação em termos da recomendação da adubação vigente não suprir a demanda nutricional das plantas, consequentemente, o máximo potencial produtivo desses genótipos provavelmente não está sendo expresso (Bruun; Pedersen, 2009). Nesse cenário, a aplicação de nutrientes emergentes, como por exemplo, o níquel (Ni), pode desempenhar um papel chave.

2.2. Uso do micronutriente Ni na agricultura

O Ni foi o último elemento químico a ser inserido na lista de micronutrientes às plantas. A primeira evidência de sua essencialidade, após décadas de estudo com enfoque apenas na sua toxicidade (Piccini; Malavolta, 1992; Seregin; Kozhevnikova, 2006; Yusuf *et al.*, 2011), foi em plantas de soja em 1983, quando em condições controladas sob depleção de Ni, essas plantas apresentaram acúmulo tóxico de ureia na ponta dos folíolos (Eskew; Welch; Cary, 1983). Contudo, foi apenas quatro anos mais tarde que o Ni foi considerado um micronutriente às plantas, quando, sob privação de Ni, plantas de cevada (*Hordeum vulgare* L.), após três gerações sucessivas de cultivo, não mais produziram grãos viáveis (Brown; Welch; Cary, 1987).

Em plantas, o Ni compõe o sítio ativo da metaloenzima urease (Dixon *et al.*, 1975), que é responsável pela hidrólise da ureia em duas moléculas de amônia e gás carbônico, desempenhando função direta no metabolismo de N (Witte, 2011; Polacco; Mazzafera; Tezotto, 2013), por consequência, beneficiando uma ampla gama de processos fisiológicos, desde a germinação até estádios subsequentes do desenvolvimento das plantas (Gerendás; Sattelmacher, 1997). Recentes estudos acerca da deficiência de Ni no metabolismo antioxidante, ureideos, aminoácidos e ácidos orgânicos sugerem que esse micronutriente possa exercer papéis adicionais na nutrição das plantas ainda não descobertos (Bai; Reilly; Wood, 2006, 2007; Fabiano *et al.*, 2015).

Até o presente momento, a deficiência de Ni a campo foi relatada em plantas de pecã (*Carya illinoiensis* [Wangenh.] K. Koch) e bétula (*Betula nigra* L.), espécies

arbóreas cultivadas em solos arenosos com baixa disponibilidade de Ni no sudeste dos Estados Unidos (Wood *et al.*, 2004a, 2004b, 2006; Ruter, 2005). A sintomatologia de deficiência de Ni é conhecida popularmente como “orelha-de-rato” e caracteriza-se pelo arredondamento da ponta das folhas associado à clorose ou necrose devido ao acúmulo tóxico de ureia no tecido foliar, semelhantemente ao observado por Eskew; Welch; Cary (1983) quando evidenciaram a essencialidade do Ni em plantas de soja. Atualmente, a aplicação foliar de doses anuais de 10 a 100 mg L⁻¹ são realizadas para superar a deficiência de Ni nos pomares de pêra e bétula, sendo esse o caso mais bem-sucedido de fertilização com esse micronutriente na agricultura (Ruter, 2005; Nyczepir; Wood, 2012; Ojeda-Barrios *et al.*, 2016). Contudo, a recomendação da sua fertilização em outras espécies cultivadas, perenes ou anuais, ainda necessita de mais estudos, quando realizada usualmente é de maneira empírica.

Recentemente em condições tropicais de cultivo a campo, estudo de Freitas *et al.* (2018) constatou haver deficiência oculta (latente) de Ni em uma ampla gama de genótipos de soja. Segundo esses autores, a deficiência de Ni, devido a sua baixa disponibilidade em alguns solos, não permite que o máximo potencial produtivo desses genótipos seja expresso. Essa questão já havia sido levantada também por Wood (2013), que sugere que a deficiência de Ni em muitas espécies vegetais não apresenta sintomas visíveis. Esse comportamento é reiterado no estudo recente de Sawyer e Barak (2024), onde uma gama de amostras de solos dos Estados Unidos foi analisada quanto a disponibilidade de Ni, concluindo que os teores são baixos e podem induzir a deficiência deste micronutriente nas culturas agrícolas. Esses resultados evidenciam a necessidade da fertilização com esse micronutriente nos cultivos agrícolas.

2.3 Métodos de aplicação do Ni na cultura da soja

A supressão da deficiência oculta de Ni com o manejo desse micronutriente nos sistemas de cultivo com plantas leguminosas, como a soja, além da urease (Witte, 2011; Polacco; Mazzafera; Tezotto, 2013), tem apresentado relação direta com a eficiência da fixação biológica de nitrogênio (FBN) (González-Guerrero *et al.*, 2014; Lavres; Franco; Câmara, 2016; Freitas *et al.*, 2019). Em eubactérias, arqueobactérias e fungos, o Ni é um cofator catalítico essencial em pelo menos mais oito enzimas além da urease (Li; Zamble, 2009), dessas merece destaque a NiFe-hidrogenase, que

promove a reação de oxidação do gás hidrogênio (H_2) em prótons e elétrons (Bagyinka, 2014; Brazzolotto *et al.*, 2016). No processo de FBN, a nitrogenase ao catalisar amônia de maneira colateral produz H_2 , esse gás é reoxidando pela NiFe-hidrogenase nos nódulos e gera energia adicional para a nitrogenase, ou seja, melhora o processo de FBN (Ruiz-Argüeso; Palacios; Imperial, 2001; Rees *et al.*, 2005).

Dessa forma, o comprovado efeito benéfico do Ni no crescimento das plantas de soja, principalmente no metabolismo de N, com ênfase na FBN, promoveu uma rede crescente de estudos avaliando principalmente doses e fontes adequadas para o seu suprimento a essa leguminosa (Kutman; Kutman; Cakmak, 2012, 2014; Freitas *et al.*, 2019; Macedo *et al.*, 2016; Macedo; Santos; Lavres, 2020; Rodak *et al.*, 2015, 2018, 2021; Zhou *et al.*, 2023). Contudo, os métodos de aplicação de Ni nos sistemas agrícolas, ou seja, via semente, solo e/ou foliar, ainda não estão estabelecidos, cogitando-se que seu manejo, muito provavelmente pode ser realizado via tratamento de sementes. O estudo de Lavres, Franco e Câmara (2016) é um dos poucos que trata sobre a aplicação de doses de Ni via tratamento de sementes na soja. Nesse trabalho, a dose ideal de 45 mg de Ni kg⁻¹ de sementes resultou em melhorias do metabolismo de N, com aumento de 12% da FBN associado ao maior crescimento das plantas. Recentemente, Oliveira *et al.* (2022) demonstraram que o fornecimento de Ni via semente, mesmo em doses elevadas de 360 mg kg⁻¹, utilizando fontes agrícolas convencionais, é seguro ao desenvolvimento das plântulas de soja, pois o Ni permanece aderido ao tegumento das sementes, principalmente ao hilo, não se movendo diretamente em direção aos cotilédones emergentes, mas sim, move-se primeiramente para o solo rizosférico para em seguida ser absorvido pela radícula ou raízes primárias das plântulas. Esses resultados são promissores para adequação de doses seguras de Ni almejando seu manejo agrícola via tratamento de sementes, contudo, como relatado anteriormente, os estudos são escassos para definição da sua dose agronômica por esse método de aplicação, bem como testando sua resposta em uma gama de genótipos modernos de soja.

2.4 Tratamento de sementes com micronutrientes

Os micronutrientes são essenciais para o crescimento das plantas. As aplicações no solo e foliar são os métodos mais utilizados atualmente na agricultura

para o fornecimento as plantas. Contudo, devido o custo elevado, bem como o emprego de altas doses de fertilizantes por esses métodos, uma alternativa viável é realizar os tratamentos de sementes com micronutrientes. Para tal, as sementes podem ser tratadas com esses micronutrientes por imersão em solução nutritiva por um determinado tempo em concentrações adequadas (doses agronômicas) ou por processos de revestimento. Esses procedimentos, tem sido denominado na literatura científica com “revigeração das sementes”. De maneira geral, a aplicação de micronutrientes por meio desses métodos melhora a porcentagem de germinação, consequentemente, o estabelecimento das plântulas, bem como pode antecipar o desenvolvimento destas, além, do fato, de também proporcionar aumentos produtivos e dos teores dos micronutrientes nos grãos/sementes na maioria dos casos (Farooq; Wahid; Siddique, 2012).

Os estudos com tratamento de sementes na agricultura para uma gama de espécies vegetais estão focados prioritariamente nos micronutrientes Zn, B, Mo, Mn, Cu e no elemento benéfico Co (Farooq; Wahid; Siddique, 2012), as pesquisas com o Ni ainda são incipientes (Lavres; Franco; Câmara, 2016; Oliveira *et al.*, 2022). Em relação a emergente fertilização com Ni na agricultura, principalmente na cultura da soja, deve-se ressaltar seu papel na germinação e desenvolvimento inicial das plântulas. A decomposição da arginina pela arginase em ureia e ornitina, com posterior atuação da enzima urease, a qual o Ni é cofator como abordado anteriormente, é de extrema importância para mobilização de N no processo de germinação das sementes como relatado por Brown, Welch e Cary (1987), Witte (2011) e Polacco, Mazzafera e Tezotto (2013), com destaque para vários estudos na cultura da soja (Matsubara; Suzuki, 1984; Kang; Cho, 1990; Goldraij; Polacco, 1999; Barcelos *et al.*, 2017; Rechenmacher *et al.*, 2017; Oliveira *et al.*, 2022). Nesse cenário, o fornecimento de Ni via tratamento de sementes pode apresentar a vantagem de garantir a nutrição das plantas na fase inicial de crescimento, quando o sistema radicular pouco desenvolvido limita a absorção desse micronutriente do solo, além de beneficiar a eficiência do processo de FBN pelo contato direto do Ni com a superfície da semente e com as bactérias fixadoras. No entanto, o tratamento de sementes pode provocar fitotoxicidade às plântulas, pois há pequena amplitude de variação entre a dose adequada e a tóxica. Portanto, são necessários estudos para definição de doses agronômicas desse micronutriente via tratamento de semente, principalmente, nos modernos genótipos de soja.

3 HIPÓTESE

O fornecimento de doses agronômicas do micronutriente Ni via tratamento de sementes proporcionará benefícios no desenvolvimento das plântulas dos genótipos de soja, uma vez que este micronutriente desempenha funções no metabolismo de N nas plantas, por meio da atividade da enzima urease, principalmente no processo de germinação.

4 OBJETIVOS

4.1 Objetivo geral

Avaliar a resposta das plântulas de seis genótipos de soja a fertilização do micronutriente Ni fornecido via tratamento de sementes.

4.2 Objetivos específicos

- I. Determinar a dose agronômica de Ni para realização da sua fertilização via tratamento de sementes;
- II. Avaliar quais os sintomas característicos da fitotoxicidade de Ni em plântulas de soja.

5 MATERIAL E MÉTODOS

5.1 Delineamento experimental

O experimento foi conduzido no Laboratório de Sementes do Centro Universitário La Salle (UniLaSalle), Lucas do Rio Verde, Mato Grosso (MT), Brasil. Seis doses do micronutriente Ni 0, 25, 50, 75, 100, 150 mg kg⁻¹ diluídas em 80 mL de água deionizada por Kg de sementes testadas em 6 genótipos de soja (Tabela 1). A fonte utilizada para fornecimento de Ni foi o sulfato de níquel hexahidratado (NiSO₄.6H₂O).

Tabela 1 — Característica dos seis genótipos de soja que foram utilizados no experimento.

Genótipo	Companhia	Patente	Grupo de maturação	Habito de crescimento	PMS
DOMINIO	GDM	84I86RSF IPRO	8.4	Indeterminado	181g
SPARTA	GDM	80IX81RSF I2X	8.1	Indeterminado	183g
NEO 750	GDM	750IPRO	7.5	Indeterminado	162g
COARI	HO	81SC120i2x	8.2	Indeterminado	175g
ULTRA	GDM	75I77RSF	7.5	Indeterminado	175g
NEO790	GDM	790IPRO	7.9	Indeterminado	168g

Fonte: A autora.

5.2 Condução do experimento

Após a definição das seis doses a serem testadas, as sementes de soja, sem nenhum tipo de tratamento prévio, foram submersas em calda contendo as respectivas doses dos tratamentos de Ni, durante o período de 30 min., em seguida, foram transferidas para papel próprio de germinação (papel toalha). Para tal, cada unidade experimental (parcela), foi montada com três folhas de papel de germinação com dimensões de 28 cm de largura e 38 cm de comprimento, duas debaixo das sementes e uma cobrindo-as. O papel foi umedecido com água deionizada duas vezes

e meio o peso do seu peso seco. Para cada unidade experimental, 50 sementes de soja tratadas com Ni, com as respectivas doses tratamento, foram alocadas no papel pré-umedecido, no sentido longitudinal, distanciadas equidistantes, 25 sementes na parte superior e 25 na parte central. Posteriormente, os papeis germinação foram enrolados, presos com atilho de borracha, identificados de acordo com os respectivos tratamentos e recobertos com saco plástico, colocados de pé no interior do germinador, câmara vertical – tipo B.O.D., contendo 10 prateleiras removíveis de arame, controle de temperatura, circulador de ar, através de ventoinha contínua e difusor vertical, com água na cuba superior e inferior. Os sacos plásticos foram utilizados para manter constante a umidade dos rolos. O germinador foi mantido sob ausência de luz e regulado a uma temperatura de 25 °C. Aos sete dias após a implantação do experimento foram avaliados os parâmetros de desenvolvimento das plântulas.

As plântulas foram avaliadas em normais, anormais, mortas e duras, e as sementes que germinaram foram consideradas para o cálculo de porcentagem de germinação das sementes. Os procedimentos seguiram a metodologia descrito nas Regras de Análise de Sementes (Brasil, 2009).

Figura 1 — Plântulas normais



Fonte: A autora.

Figura 2 — Plântulas anormais



Fonte: A autora.

Figura 3 — Plântulas duras ou mortas



Fonte: A autora.

Notavelmente, a inoculação isolada de *B. subtilis* foi responsável pelo melhor desempenho no rendimento do milho em dois locais distintos, evidenciando seu

potencial como bioestimulante. No entanto, as combinações de *B. subtilis* com biochar ou carvão não apresentaram diferenças significativas em comparação aos demais tratamentos, sugerindo que os efeitos positivos podem depender de condições específicas.

Dessa forma, a utilização de *B. subtilis* surge como uma estratégia promissora para aprimorar a qualidade biológica do solo e aumentar a produtividade agrícola em curto prazo. Contudo, é recomendável a realização de estudos adicionais para compreender melhor os mecanismos envolvidos, sobretudo no que diz respeito ao papel do carvão em diferentes tipos de solo e às interações entre os tratamentos e os atributos do solo.

5.3 Parâmetros avaliados

Após 7 dias da implantação do experimento, o comprimento da parte aérea e comprimento do sistema radicular das plântulas de soja foram avaliados com o auxílio de um paquímetro.

5.4 Análise de dados

Os dados obtidos foram submetidos a testes de normalidade e análise de variância e, quando significativos, foram realizados teste de regressão e as médias foram comparadas pelo teste de Tukey ($p < 0,05$). O software utilizado para análise estatística dos dados foi o AgroEstat 1.1.0.712. Ao final os dados foram submetidos a teste de correlação de Pearson utilizando o software R-studio.

6 RESULTADOS

O teste F para as variáveis analisadas estão descritas na Tabela 2. Os dados de porcentagem de plântulas normais, de plântulas anormais e de sementes mortas, comprimento radicular e comprimento de parte aérea apresentaram efeito significativo para a interação Cultivar x Dose. Já a variável de porcentagem germinação de sementes apresentaram diferença significativa para os fatores Cultivar e Dose, de forma isolada, com efeito significativo para regressão linear.

Tabela 2 —Tabela de probabilidade de teste F ($p<0,005$) para os seguintes fatores: Cultivar (C), Dose de níquel (D), Cultivar x Dose de níquel, teste significância de regressão polinomial linear (px1) ou quadrática (px2).

Fator	Variável		
	Plântulas Normais	Plântulas Anormais	Sementes Mortas
Cultivar (C)	0,965	0,256	0,410
Dose (D)	0,081	0,003	0,398
Cultivar x Dose	0,044	0,020	0,008
CV%	15,16%	39,12%	48,69%
px1	0,901	0,182	0,132
px2	0,939	0,242	0,449

Fator	Variável		
	Germinação de sementes	Comprimento Radicular	Comprimento Parte aérea
Cultivar (C)	<0,001	<0,001	<0,001
Dose (D)	<0,001	<0,001	<0,001
Cultivar x Dose	0,157	0,009	<0,001
CV%	9,14%	10.17%	15.49%
p Linear	<0,001	<0,001	<0,001
quadrática	0,673	0,019	<0,001

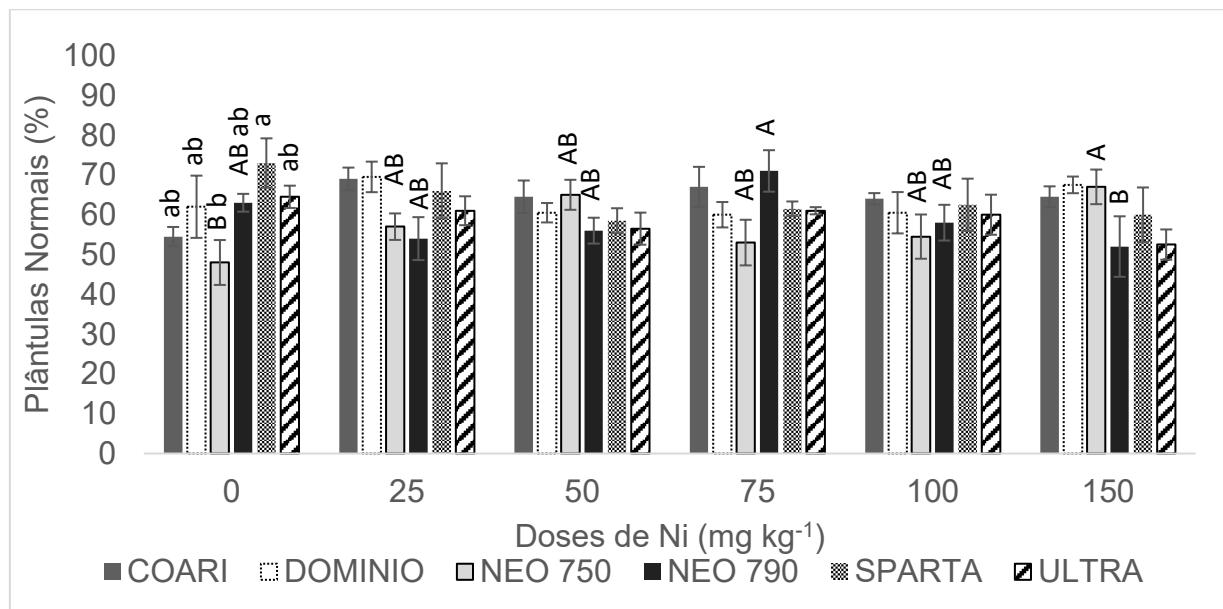
Fonte: A autora.

Nota: Números em negrito: significativo ao nível de 5 ou 1% pelo teste F.

Os dados do desdobramento entre Cultivar x Dose para o teste de significância para regressão polinomial linear ou quadrática estão demonstrados na Tabela 3 (Anexo I). As variáveis porcentagem de plântulas normais e porcentagem de plântulas mortas apresentaram efeito significativo para regressão linear apenas para as cultivares NEO 750 e NEO 790, respectivamente

Apenas as cultivares NEO750 e NEO790 apresentaram diferenças para as doses de Ni aplicadas quanto a porcentagem de plântulas normais, as demais cultivares não foram afetadas pelas doses de Ni quanto a porcentagem de plântulas normais (Figura 4). A cultivar NEO 750 apresentou maior porcentagem de plântulas normais para a dose de Ni de 150 mg kg^{-1} de semente, porém essa porcentagem só foi diferente do tratamento controle. Já a cultivar NEO 790 apresentou as menores porcentagens de plântulas normais para as doses controle e de 150 mg kg^{-1} em comparação com a dose de Ni de 75 mg kg^{-1} de semente, sendo que as demais doses não diferiram entre si. Com relação as diferenças entre as cultivares, houve diferenças entre a porcentagem de plântulas normais apenas para o tratamento controle. Nesse tratamento, a cultivar SPARTA apresentou maior porcentagem de plântulas normais em comparação com a cultivar NEO 750, porém elas não foram significativamente diferentes da porcentagem de plântulas normais das cultivares.

Figura 4 — Porcentagem de Plântulas Normais em função da interação entre as cultivares e as doses de Ni.



Fonte: A autora.

Legenda: Letras maiúsculas indicam diferenças entre doses de Ni para cada cultivar. Letras minúsculas indicam diferenças entre as cultivares para cada dose de Ni.

Apenas a cultivar NEO750 apresentou efeito significativo para o desdobramento da regressão polinomial, com ajuste linear crescente Figura 5 (Anexo I). Segundo o ajuste da equação, para a cultivar NEO750, A cada mg de Ni adicionado

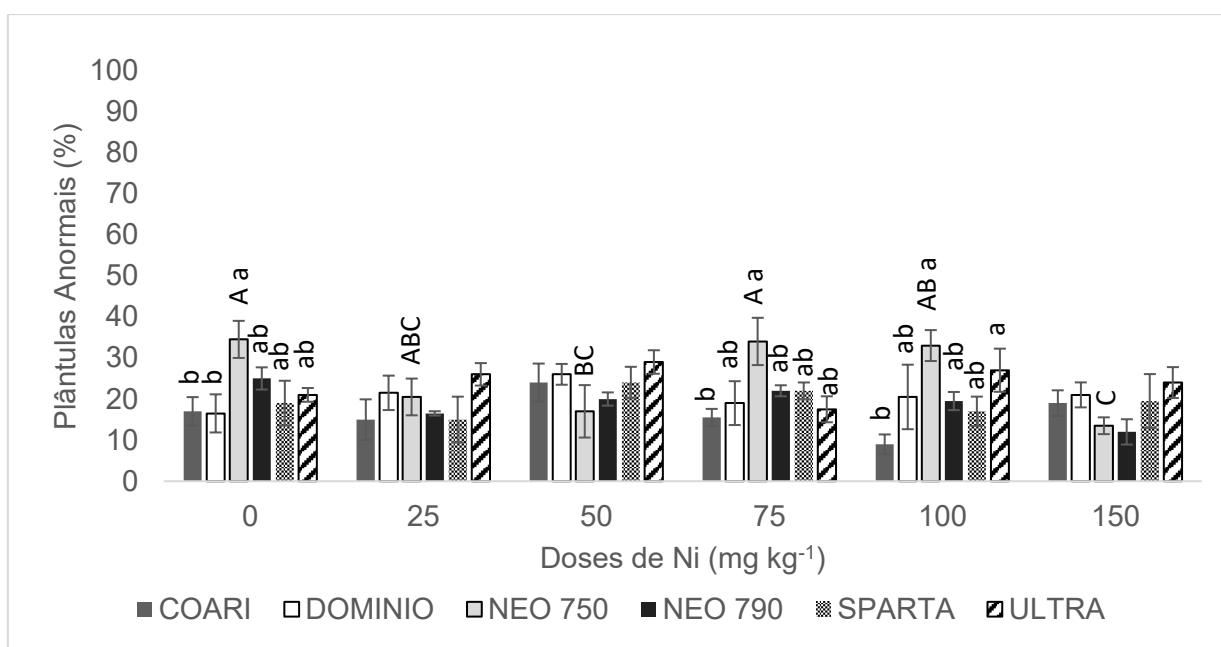
ao tratamento de semente a porcentagem de plântulas normais aumentava em 0,0811%, porém o ajuste da equação teve um baixo R^2 (0,3607).

Para a porcentagem de plântulas anormais, apenas a cultivar NEO750 apresentou diferença significativa para as doses de Ni aplicadas, sendo que as demais cultivares não foram afetadas pelas doses de Ni quanto a porcentagem de plântulas anormais (Figura 6). A cultivar NEO 750 apresentou menor porcentagem de plântulas anormais para a dose de Ni de 150 mg kg^{-1} de semente, em comparação com os tratamentos controle, 75 mg kg^{-1} de Ni. Esses tratamentos, porém, não diferiram das demais doses.

Com relação as diferenças entre as cultivares, houve diferenças entre a porcentagem de sementes plântulas anormais para os tratamentos controle e para as doses de Ni de 75 e 100 mg kg^{-1} de semente (Figura 6). Nesses tratamentos, a cultivar COARI apresentou menor porcentagem de plântulas anormais em comparação com a cultivar NEO 750, porém elas não foram significativamente diferentes da porcentagem de plântulas normais das cultivares.

Não houve efeito significativo para regressão polinomial para o desdobramento da interação entre cultivar e dose nessa variável (Tabela 3).

Figura 6 — Porcentagem de Plântulas Anormais em função da interação entre as cultivares e as doses de Ni.



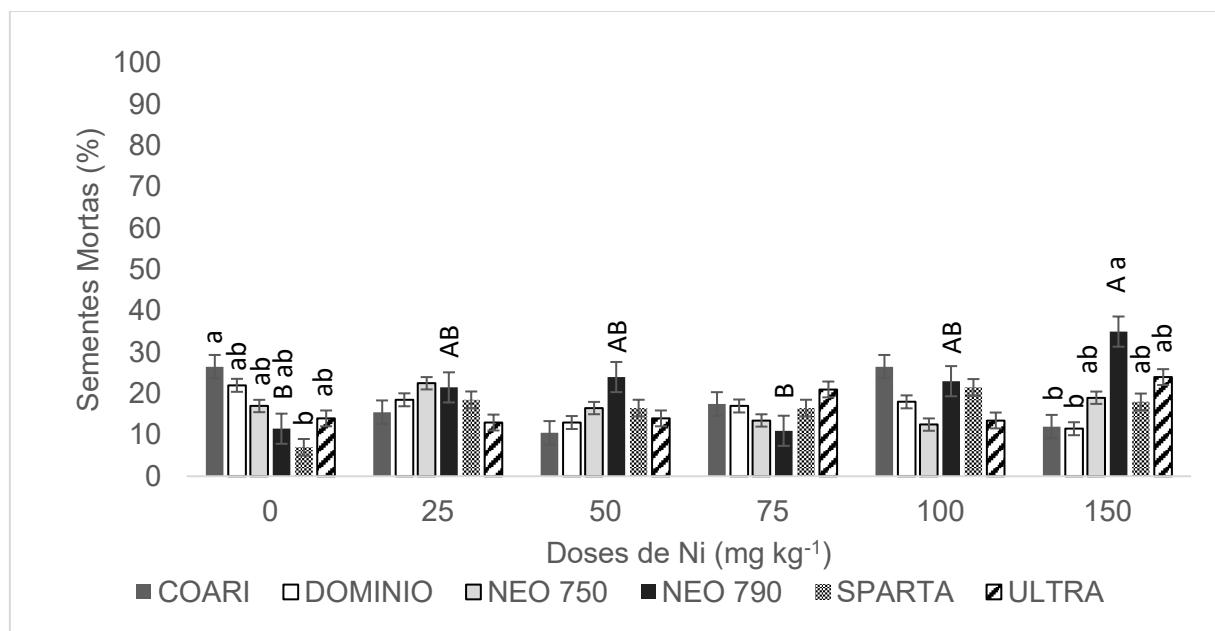
Fonte: A autora.

Legenda: Letras maiúsculas indicam diferenças entre doses de Ni para cada cultivar. Letras minúsculas indicam diferenças entre as cultivares para cada dose de Ni.

Já a porcentagem de sementes mortas, a cultivar NEO 790 foi a que apresentou maior valor, com média de 24% sementes mortas na dose de Ni de 150 mg kg^{-1} de semente, enquanto as demais cultivares apresentaram menos que 16% sementes mortas média (Figura 7). Essa foi a única cultivar a apresentar efeito significativo para as doses de Ni, as demais cultivares não apresentaram diferenças. Esse resultado refletiu na porcentagem de germinação de sementes em função dos diferentes cultivares, com a cultivar NEO 790 com 10% menor porcentagem de germinação em comparação com as demais cultivares (Figura 3).

Com relação as diferenças entre as cultivares, houve diferenças entre a porcentagem de plântulas anormais para os tratamentos controle e para a dose de Ni de 150 mg kg^{-1} de semente (Figura 7). No tratamento controle, a cultivar SPARTA apresentou menor porcentagem de sementes mortas em comparação com a cultivar COARI. Entretanto, não houve diferenças entre essas cultivares e as demais cultivares. Na dose de Ni de 150 mg kg^{-1} de semente a cultivar NEO 790 apresentou 10% mais sementes mortas em comparação com as cultivares COARI e DOMÍNIO. Essas cultivares porém não diferiram das demais.

Figura 7 — Porcentagem de Sementes Mortas em função da interação entre as cultivares e as doses de Ni.



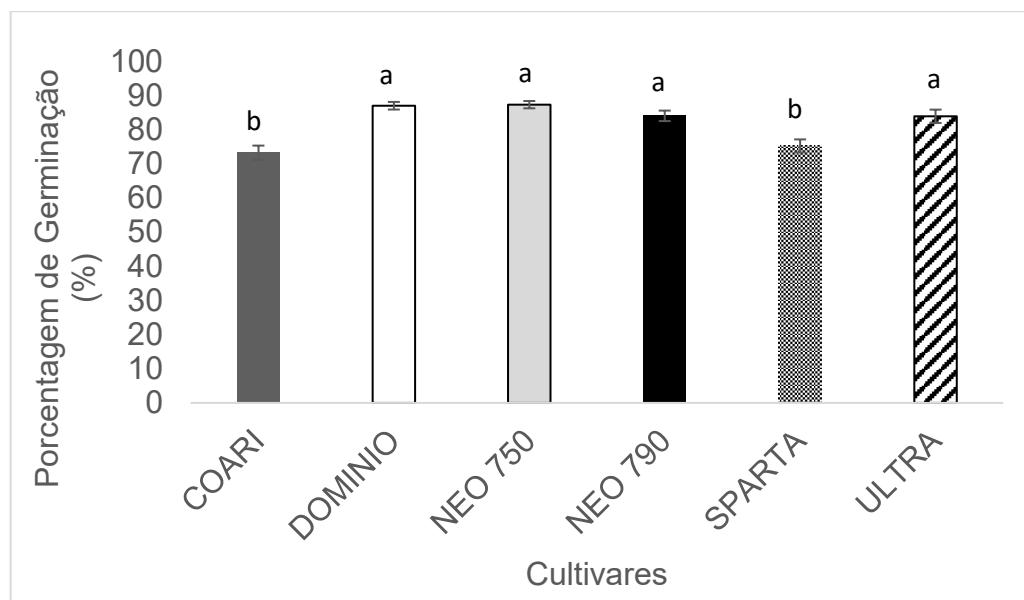
Fonte: A autora.

Legenda: Letras maiúsculas indicam diferenças entre doses de Ni para cada cultivar. Letras minúsculas indicam diferenças entre as cultivares para cada dose de Ni.

A cultivar NEO790 apresentou efeito significativo para o desdobramento da regressão polinomial, com ajuste linear crescente Figura 8 (Anexo I). Segundo o ajuste da equação, a cada mg de Ni adicionado ao tratamento de semente a porcentagem de sementes mortas aumenta em 0,1174%, sendo que o ajuste da equação teve R^2 de 0,5034.

A porcentagem de germinação de sementes em função dos cultivares de soja está demonstrado na figura 9. As cultivares COARI e SPARTA apresentaram porcentagens de germinação 10% menores que as demais cultivares, em média.

Figura 9 — Porcentagem de Germinação de Sementes em função dos diferentes cultivares.



Fonte: A autora.

Legenda: Letras distintas indicam diferenças entre as cultivares.

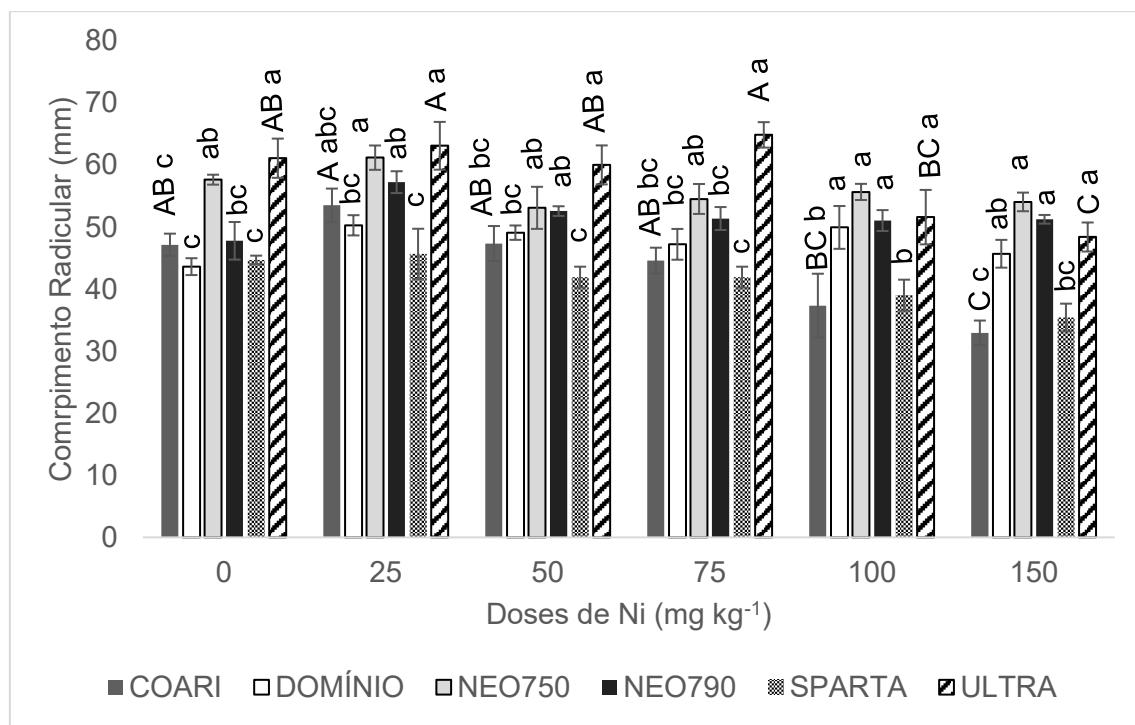
A porcentagem de germinação de sementes considerou a partir da protusão de raiz, em função das doses de Ni aplicadas no tratamento de sementes está demonstrado na figura 9. A diminuição da germinação de sementes em função das doses de Ni demonstradas na figura 6 podem estar relacionadas ao aumento da concentração de Ni e causar fitotoxicidade nas sementes dos modernos genótipos de soja de modo geral.

Com relação ao comprimento radicular, as cultivares COARI e ULTRA foram as únicas a apresentar efeito significativo para as doses de Ni. Figura 10 (Anexo I).

Ambas as cultivares apresentaram menor comprimento radicular para as sementes tratadas com 100 e 150 mg kg⁻¹ de Ni, e maior comprimento radicular para as doses de Ni de 25 mg kg⁻¹ de semente na cultivar COARI, e para as doses de Ni de 25 e 75 mg kg⁻¹ de semente na cultivar ULTRA. Essas doses, porém, não diferiram das demais doses para o comprimento radicular.

As diferenças entre as cultivares dentro de cada dose de Ni, de maneira geral a cultivar SPARTA apresentou os menores comprimentos radiculares em comparação com os demais cultivares, independente da dose de Ni, enquanto a cultivar ULTRA obteve os maiores comprimentos.

Figura 11 — Comprimento radicular de plântulas em função da interação entre as cultivares e as doses de Ni



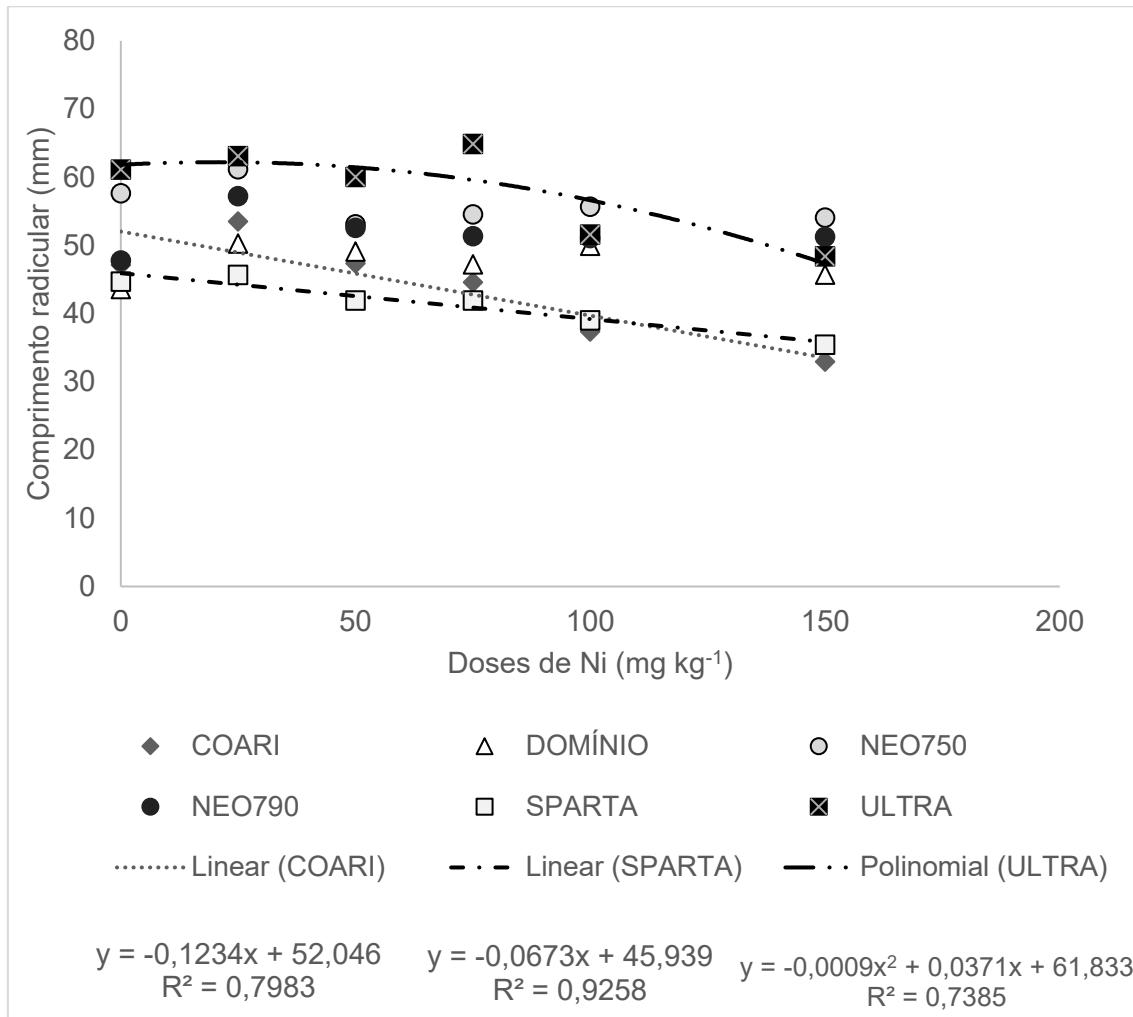
Fonte: A autora.

Legenda: Letras maiúsculas indicam diferenças entre doses de Ni para cada cultivar. Letras minúsculas indicam diferenças entre as cultivares para cada dose de Ni.

As cultivares COARI, SPARTA e ULTRA apresentaram efeito significativo para o teste de regressão polinomial (Figura 12). As cultivares COARI e SPARTA apresentaram ajuste linear negativo, com redução no comprimento radicular com o aumento nas doses de Ni, diminuindo 0,1234 e 0,0673 mm a cada mg de Ni adicionados ao tratamento de sementes, respectivamente. Já a cultivar ULTRA obteve

ajuste linear quadrático, com maior comprimento radicular para a dose de 25 mg kg⁻¹ de Ni. Os ajustes das curvas apresentaram R² acima de 0,7.

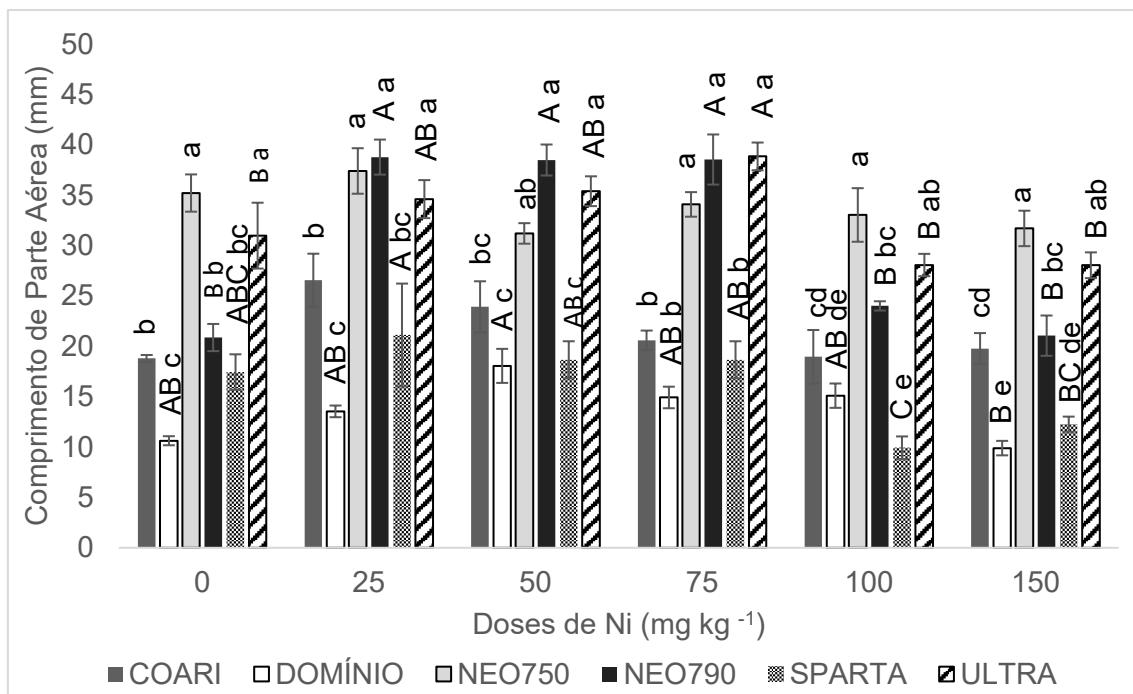
Figura 12 — Regressões lineares e quadráticas para Comprimento radicular de plântulas em função da interação entre as cultivares e as doses de Ni.



Fonte: A autora.

Quanto ao comprimento de parte aérea, apenas as cultivares COARI e NEO 750 não diferiram significativamente para as doses de Ni (Figura 13). De maneira geral, as doses de 100 e 150 mg kg⁻¹ de Ni apresentaram os menores comprimentos de parte aérea para as demais cultivares. A cultivar NEO 790 apresentou o maior comprimento radicular para as doses entre 25 e 75 mg kg⁻¹ de Ni.

Figura 13 — Comprimento de Parte Aérea de plântulas em função da interação entre as cultivares e as doses de Ni.

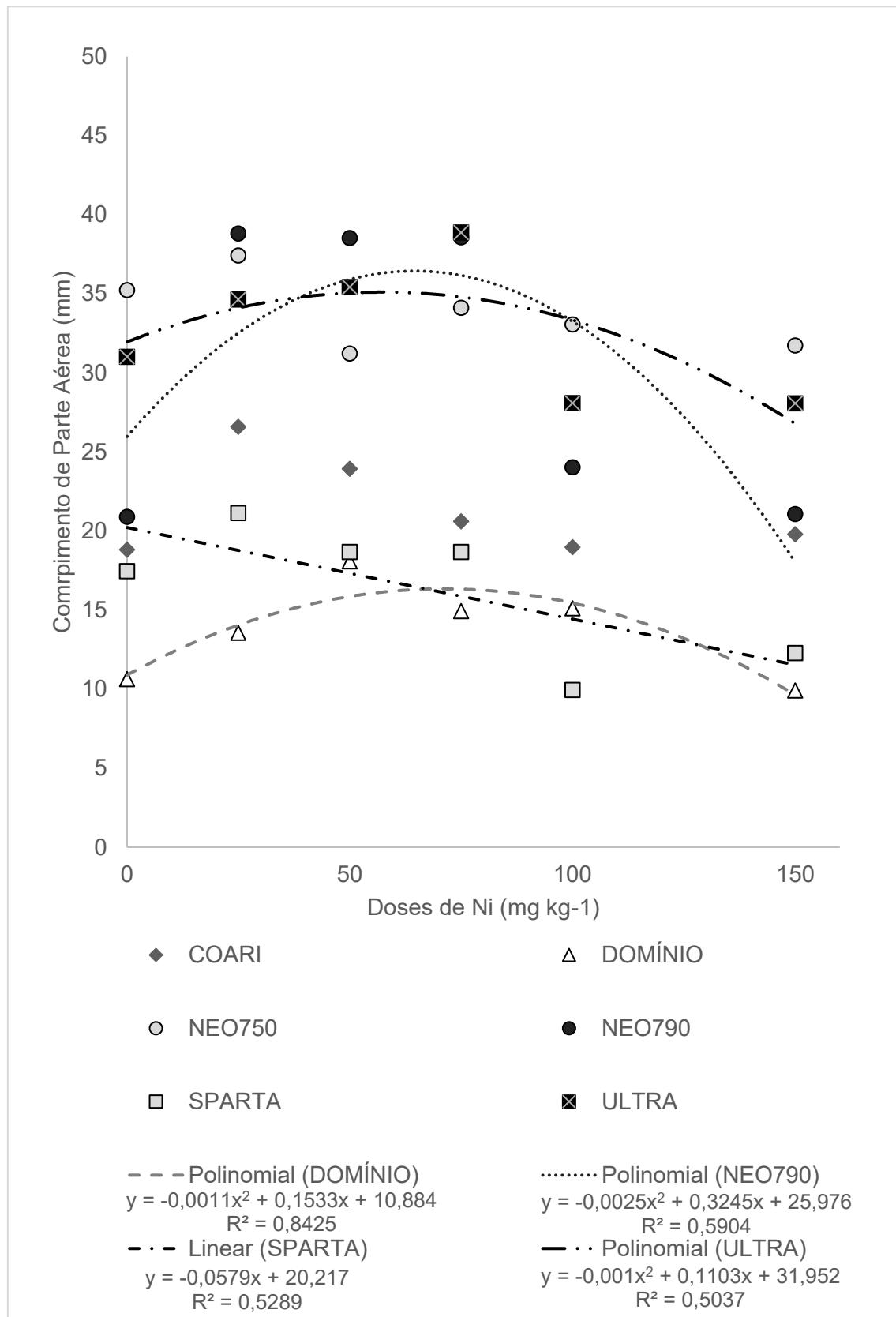


Fonte: A autora.

Legenda: Letras maiúsculas indicam diferenças entre doses de Ni para cada cultivar. Letras minúsculas indicam diferenças entre as cultivares para cada dose de Ni.

As cultivares DOMÍNIO, NEO 790, SPARTA e ULTRA apresentaram efeito significativo para o teste de regressão polinomial. (Figura 14). A cultivar SPARTA obteve ajuste linear negativo, com redução no comprimento de parte aérea de 0,0579 mm a cada mg de Ni adicionado ao tratamento de semente. As cultivares DOMÍNIO, NEO790 e ULTRA obtiveram efeito significativo para o ajuste de regressão polinomial quadrático, com pontos de máximo de 75, 63 e 55 mg kg⁻¹ de N, reduzindo o comprimento de parte aérea para doses maiores. Os ajustes das curvas apresentaram R² acima de 0,5, o melhor ajuste de curva foi obtido pela cultivar DOMÍNIO, com R² de 0,8425.

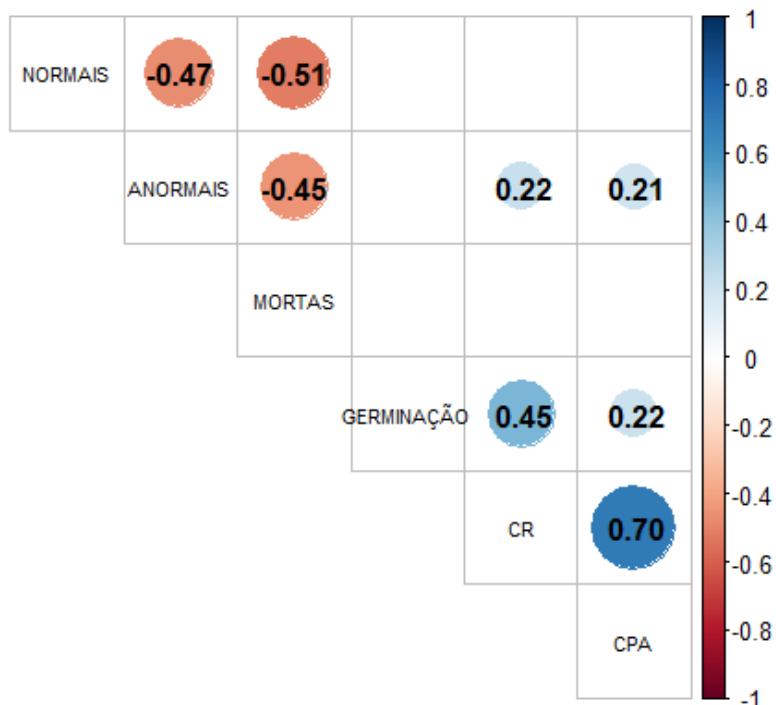
Figura 14 — Regressões lineares e quadráticas para o Comprimento de Parte Aérea de plântulas em função da interação entre as cultivares e as doses de Ni.



Fonte: A autora.

Os dados de correlação de Pearson estão apresentados na Figura 15. As variáveis porcentagem de sementes normais, porcentagens de sementes anormais e porcentagens de sementes mortas tiveram uma correlação negativa entre si, com valores próximos a -0,50. A variável porcentagem de sementes anormais teve uma correlação positiva, porém baixa, de 0,22 com o comprimento radicular e de 0,21 com o comprimento de parte aérea. A porcentagem de germinação teve correlação positiva com o comprimento radicular (0,45) e com o comprimento de parte aérea (0,22). A maior correlação encontrada foi entre o comprimento radicular e o comprimento de parte aérea, que foi de 0,70.

Figura 15 — Correlação de Pearson para as variáveis analisadas em função das diferentes cultivares e doses de Ni.



Fonte: A autora.

7 DISCUSSÃO

O tratamento de sementes com Níquel reduziu a porcentagem de germinação das cultivares conforme o aumento da concentração do micronutriente. O uso de alguns elementos no tratamento de sementes pode ocasionar um efeito fitotóxico causado pela concentração de determinado elemento e consequentemente reduzir seu potencial fisiológico. Os resultados obtidos no trabalho diferem dos resultados obtidos por Oliveira *et al.* (2022), que ao aplicar doses 20 g ha⁻¹ de Ni como Sulfato de Ni, via tratamento de semente, observaram aumento na porcentagem de germinação das sementes e aumento no comprimento radicular das plântulas quando comparado ao controle sem Ni.

Pouco se sabe sobre a mobilidade do Ni dentro das plantas (Dechen; Nachtigal, 2006). Entretanto, o grande acúmulo específico de Ni em sementes, semelhante ao que ocorre para Mo, provavelmente requer alta regulação da mobilização e da translocação de Ni das folhas mais velhas e durante o estádio de enchimento de grãos.

O teste de germinação é muito utilizado para medir a viabilidade das sementes em ambientes controlados. Demais pesquisas em diferentes culturas também evidenciam o efeito negativo do acréscimo de doses de outros elementos minerais nas sementes como Co e Mo em ervilha. (Levandoski; Menon; Carvalho, 2018). O efeito fitotóxico do aumento das doses de Ni pode ser explicado a partir da germinação e estrutura da semente, isso porque, durante o processo de germinação a raiz primária é a parte da plântula que se desenvolve primeiro e geralmente acontece pela região da micrópila. Esta região é mais permeável a água, e quando entra em contato com a hidratação contendo produtos químicos ou outras substâncias pode ocasionar a fitotoxicidade, neste caso do estudo com concentrações mais elevadas de Níquel. Lavres, Franco e Câmara (2016) observaram que doses de acima de 135 mg kg⁻¹ de semente foram prejudiciais ao crescimento da soja e em sua produtividade. Embora os autores não tenham realizado testes de germinação das sementes, o tratamento de 45 mg kg⁻¹ de Ni na semente promoveu maior fixação biológica do nitrogênio (FBN) demonstrada através de maior atividade da enzima urease, e maior concentração de N nos grãos.

Além disso, o comportamento entre as cultivares foram distintos, sendo a cultivar Domínio de grupo de maturação 8.4 com maior porcentagem de germinação,

isso pode estar atrelado a algumas características fisiológicas das sementes como o tamanho.

De acordo com AOSA (1983), sementes que se tornam plântulas de maior comprimento de parte aérea, são caracterizadas como mais vigorosas. Isso é atribuído por essas sementes apresentarem suprimento maior de reservas nos tecidos de armazenagem, consequentemente terá maior aptidão para transformar essas reservas em substâncias favoráveis pelo eixo embrionário (Dan, *et al.*, 1987).

Trabalhos realizados por Kutman, Kutman e Cakmak (2012) mostram que quando as sementes de soja continham baixo teor de Ni, as plantas apresentaram menor crescimento.

De acordo com Kutman, Kutman e Cakmak (2014) em experimento com plantas de soja suplementadas com Ni observaram que as sementes enriquecidas com doses de Ni ($8,32 \text{ mg kg}^{-1}$) a atividade da urease foi 10x superior a atividade da urease nas sementes com baixo enriquecimento ($0,04 \text{ mg kg}^{-1}$).

O níquel é de alta mobilidade na planta, estando presente em todos os tecidos, principalmente nas sementes. (Page; Feller, 2005). A concentração acontece de forma diferente nos tecidos e ao longo do desenvolvimento das plantas, sendo em maior quantidade nos grãos, folhas e tecidos mais jovens. Trabalhando com aplicação foliar de Ni, Barcelos *et al.* (2017), obtiveram resposta positiva na porcentagem de germinação de sementes para plantas tratadas até 40 g ha^{-1} , com efeitos negativos para doses maiores. Diversos trabalhos demonstraram que sementes de soja deficientes em Ni apresentam menor qualidade de sementes e menor crescimento nas plantas (Macedo *et al.*, 2016; Lavres; Franco; Câmara, 2016; Freitas *et al.*, 2019). A aplicação de Ni via tratamento de sementes em deve-se atentar à dose do nutriente, visto que o aumento da dose pode causar fitotoxicidade na planta, reduzindo a eficiência no crescimento. Estudos mais detalhados podem avaliar o efeito na produtividade de soja em função da aplicação de Ni via semente (Santos Neto *et al.*, 2018).

8 CONCLUSÃO

As cultivares respondem de maneira diferente as doses de Ni.

Para as cultivares responsivas, a aplicação de Ni via tratamento de sementes foi eficiente até a dose de Ni de 66 mg kg⁻¹ de sementes. Doses de Ni maiores que 66 mg kg⁻¹ de sementes aumentaram as porcentagens de plântulas anormais e sementes mortas, e reduziram os comprimentos radiculares e de parte aérea de plântulas, demonstrando efeito fitotóxicos.

REFERÊNCIAS

ASSOCIATION OF OFFICIAL SEED ANALYSTS. **Seed vigor testing handbook**. Ithaca, NY: AOSA, 1983. (Contribution to the Handbook on Seed Testing, 32).

BAGYINKA, C. How does the ([NiFe]) hydrogenase enzyme work?. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 39, n. 32, p. 18521-18532, 2014. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2014.07.009.

BAI, C.; REILLY, C. C.; WOOD, B. W. Nickel deficiency disrupts metabolism of ureides, amino acids, and organic acids of young pecan foliage. **Plant physiology**, v. 140, n. 2, p. 433-443, 2006. DOI: 10.1104/pp.105.072983.

BAI, C.; REILLY, C. C.; WOOD, B. W. Nickel deficiency affects nitrogenous forms and urease activity in spring xylem sap of pecan. **Journal of the American Society for Horticultural Science**, v. 132, n. 3, p. 302-309, 2007. DOI: 10.21273/JASHS.132.3.302.

BARCELOS, J. P. Q.; OSÓRIO, C. R. W. S.; LEAL, A. J. F.; ALVES, C. Z.; SANTOS, E. F.; REIS, H. P. G.; REIS, A. R. Effects of foliar nickel (Ni) application on mineral nutrition status, urease activity and physiological quality of soybean seeds. **Australian Journal of Crop Science, Lismore**, v. 11, n. 2, p. 184–192, 2017.

BORK, C.; ALMEIDA, A. S.; CASTELLANO, C. S.; ZIMMER, G.; AVILA, T. D.; MENEGHELLO, G. E.; DELLAOSTIN, S. M.; RODRIGUES, D. B.; MATTOS, F.; ROSSETTI, C.; FONSECA, H. W.; TUNES, C.; SUNÉ, A. S.; BARRETO, B.; TUNES, L. M.; SUCHCH, L. O. B. Soybean Industrial Seed Treatment: Effect On Physiological Quality During Storage. **Journal of Agricultural Science**, V. 10, N. 8, P. 468-476, 2018. DOI:10.5539/jas.v10n8p468.

BRASIL. **Regras para análise de sementes**. Brasília: Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, Secretaria de Defesa Agropecuária, 2009.

BRAZZOLOTTO. D.; GENNARI, M.; QUEYRIAUX, N.; SIMMONS, T. R.; PÉCAUT, J.; DEMESHKO, S.; MEYER, F.; ORIO, M.; ARTERO, V.; CAROLE, D. Nickel-centred proton reduction catalysis in a model of [NiFe] hydrogenase. **Nature Chemistry**, v. 8, n. 11, p. 1054-1060, 2016. DOI: 10.1038/nchem.2575.

BROWN, P. H.; WELCH, R. M.; CARY, E. E. Nickel: A micronutrient essential for higher plants. **Plant physiology**, v. 85, n. 3, p. 801-803, 1987. DOI: 10.1104/pp.85.3.801.

BRUIN, J. L.; PEDERSEN, P. Growth, yield, and yield component changes among old and new soybean cultivars. **Agronomy journal**, v. 101, n. 1, p. 124-130, 2009. DOI: 10.2134/agronj2008.0187.

CATTELAN, A. J.; DALL'AGNOL, A. The rapid soybean growth in Brazil. **OCL**, v. 25, n. 1, p. D102, 2018. DOI: 10.1051/ocl/2017058.

CONAB – COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Acompanhamento da safra brasileira de grãos – safra 2024/25**: décimo segundo levantamento. Brasília: CONAB, 2023.

DAN, E. L.; MELLO, V. D. C.; WETZEL, C. T.; POPINIGIS, F.; ZONTA, E. P. Transferência de matéria seca como método de avaliação de vigor de sementes de soja. **Revista Brasileira de Sementes, Brasília**, v. 9, n. 3, p. 45-50, 1987.

DECHEM, A. R.; NACHTIGALL, G. R. Micronutrientes. In: FERNANDES, M. S. (ed.). **Nutrição mineral de plantas**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2006. p.327-354.

DIXON, N. E.; GAZZOLA, T. C.; BLAKELEY, R. L.; ZERMER, B. Jack bean urease (EC 3.5.1.5). A metalloenzyme: a simple biological role for nickel? **Journal of the American Chemical Society**, v. 97, n. 14, p. 4131–4133, 1975. DOI: 10.1021/ja00847a045.

EMBRAPA SOJA. **Tecnologias de produção de soja**. Londrina: Embrapa Soja, 2020.

ESKEW, D. L.; WELCH, R.M.; CARY, E. E. Nickel: an essential micronutrient for legumes and possibly all higher plants. **Science**, v. 222, n. 4624, p. 621-623, 1983. DOI: 10.1126/science.222.4624.621.

FABIANO, C. C.; TEZOTTO, T.; FAVARIN, J. L.; POLACCO, J. C.; MAZZAFERA, P. Essentiality of nickel in plants: a role in plant stresses. **Frontiers in Plant Science**, v. 6, 2015. DOI: 10.3389/fpls.2015.00754.

FAROOQ, M.; WAHID, A.; SIDDIQUE, K. H. M. Micronutrient application through seed treatments: a review. **Journal of soil science and plant nutrition**, v. 12, n. 1, p. 125-142, 2012. DOI: 10.4067/S0718-95162012000100011.

FREITAS, D. S.; RODAK, B. W.; CARNEIRO, M. A. C.; GUILHERME, L. R. G. How does Ni fertilization affect a responsive soybean genotype? a dose study. **Plant and Soil**, v. 441, p. 567–586, 2019. DOI: 10.1007/s11104-019-04146-2.

FREITAS, D. S.; RODAK, B. W.; REIS, A. R. dos; REIS, F. B.; CARVALHO, T. S. de; SCHULZE, J.; CARNEIRO, M. A. C.; GUILHERME, L. R. G. Hidden nickel deficiency? Nickel fertilization via soil improves nitrogen metabolism and grain yield in soybean genotypes. **Frontiers in Plant Science**, v. 9, p. 614, 2018. DOI: 10.3389/fpls.2018.00614.

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**, v. 190, p. 153-162, 1997. DOI: 10.1023/A:1004260730027.

GOLDRAIJ, A.; POLACCO, J. C. Arginase is inoperative in developing soybean embryos. **Plant physiology**, v. 119, n. 1, p. 297-304, 1999. DOI: 10.1104/pp.119.1.297.

GONZÁLEZ-GUERRERO, M.; MATTHIADIS, A.; SÁEZ, Á.; LONG, T. A. Fixating on metals: new insights into the role of metals in nodulation and symbiotic nitrogen fixation. **Frontiers in Plant Science**, v. 5, p. 45, 2014. DOI: 10.3389/fpls.2014.00045.

KANG, J. H.; CHO, Y. D. Purification and properties of arginase from soybean, *Glycine max*, axes. **Plant physiology**, v. 93, n. 3, p. 1230-1234, 1990. DOI: 10.1104/pp.93.3.1230.

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**, v. 363, p. 61-75, 2012. DOI: 10.1007/s11104-012-1284-6.

KUTMAN, B. Y.; KUTMAN, U. B.; CAKMAK, I. Effects of seed nickel reserves or externally supplied nickel on the growth, nitrogen metabolites and nitrogen use efficiency of urea- or nitrate-fed soybean. **Plant and Soil**, v. 376, p. 261–276, 2014. DOI: 10.1007/s11104-013-1983-7.

LAVRES, J.; FRANCO, G. C.; CÂMARA, G. M. S. Soybean seed treatment with nickel improves biological nitrogen fixation and urease activity. **Frontiers in Environmental Science**, v. 4, p. 37, 2016. DOI: 10.3389/fenvs.2016.00037.

LEVANDOSKI, J. G.; MENON, E. E.; CARVALHO, T. C. Potencial fisiológico de sementes de ervilha submetidas ao tratamento com CoMo. **Revista Cultivando o saber**, v. 11, n. 1, p. 66-77, 2018.

LI, Y.; ZAMBLE, D. B. Nickel homeostasis and nickel regulation: an overview. **Chemical reviews**, v. 109, n. 10, p. 4617-4643, 2009. DOI: 10.1021/cr900010n.

MACEDO, F. G.; SANTOS, E. F.; LAVRES, J. Agricultural crop influences availability of nickel in the rhizosphere; a study on base cation saturations, Ni dosages and crop succession. **Rhizosphere**, v. 13, p. 100182, 2020. DOI: 10.1016/j.rhisph.2019.100182.

MACEDO, F. G.; BRESOLIN, J. D.; SANTOS, E. F.; FURLAN, F.; SILVA, W. T. L.; POLACCO, J. C.; LAVRES, J. Nickel availability in soil as influenced by liming and its role in soybean nitrogen metabolism. **Frontiers in Plant Science**, v. 7, p. 1358, 2016. DOI: 10.3389/fpls.2016.01358.

MATSUBARA, S.; SUZUKI, Y. Arginase activity in the cotyledons of soybean seedlings. **Physiologia Plantarum**, v. 62, n. 3, p. 309-314, 1984. DOI: 10.1111/j.1399-3054.1984.tb04578.x.

NYCZEPIR, A. P.; WOOD, B. W. Foliar nickel application can increase the incidence of peach tree short life and consequent peach tree mortality. **HortScience**, v. 47, n. 2, p. 224-227, 2012. DOI: 10.21273/HORTSCI.47.2.224.

OJEDA-BARRIOS, D. L.; SÁNCHEZ-CHÁVEZ, E.; SIDA-ARREOLA, J. P.; VALDEZ-CEPEDA, R.; BALANDRAN-VALLADARES, M. The impact of foliar nickel fertilization

on urease activity in pecan trees. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, v. 16, n. 1, 2016. DOI: 10.4067/S0718-95162016005000019.

OLIVEIRA, J. B.; MARQUES, J. P. R.; RODAK, B. W.; GALINDO, F. S.; CARR, N. F.; ALMEIDA, E.; ARAKI, K.; GONÇALVES, J. M.; REIS, A. R.; VAN DER ENT, A.; CARVALHO, H. W. P.; LAVRES, J. Fate of nickel in soybean seeds dressed with different forms of nickel. **Rhizosphere**, v. 21, p. 100464, 2022. DOI: 10.1016/j.rhisph.2021.100464.

PAGE, V.; FELLER, U. R. S. Selective transport of zinc, manganese, nickel, cobalt and cadmium in the root system and transfer to the leaves in young wheat plants. **Annals of botany**, v. 96, n. 3, p. 425-434, 2005. DOI: 10.1093/aob/mci189.

PICCINI, D. F.; MALAVOLTA, E. Toxicidade de níquel em arroz de feijão em solos ácidos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 16, n. 2, p. 229-233, 1992.

POLACCO, J. C.; MAZZAFERA, P.; TEZOTTO, T. Opinion–nickel and urease in plants: still many knowledge gaps. **Plant Science**, v. 199, p. 79-90, 2013. DOI: 10.1016/j.plantsci.2012.10.010.

RECHENMACHER, C.; WIEBKE-STROHM, B.; OLIVEIRA-BUSATTO, L. A.; POLACCO, J. C.; CARLINI, C. R.; BODANESE-ZANETTINI, M. H. Effect of soybean ureases on seed germination and plant development. **Genetics and Molecular Biology**, v. 40, n. 1 supl. 1, p. 209–216, 2017. DOI: 10.1590/1678-4685-GMB-2016-0107.

REENBERG, A.; FENGER, N. A. Globalizing land use transitions: the soybean acceleration. **Geografisk Tidsskrift-Danish Journal of Geography**, v. 111, n. 1, p. 85-92, 2011. DOI: 10.1080/00167223.2011.10669524.

REES, D. C.; TEZCAN, F. A.; HAYNES, C. A.; WALTON, M. Y.; ANDRADE, S.; EINSLE, O.; HOWARD, J. B. Structural basis of biological nitrogen fixation. **Philosophical Transactions of the Royal Society a: Mathematical, Physical and Engineering Sciences**, v. 363, n. 1829, p. 971-984, 2005. DOI: 10.1098/rsta.2004.1539.

REIS, M. S.; CAMPOS, S. R. F.; BORÉM, A.; GIÚDICE, M. P. DEL. Produção e comercialização de sementes. In: BORÉM, A. (ed.). **Melhoramento de espécies cultivadas**. Viçosa, MG: UFV, 2005. p. 897–930.

RODAK, B. W.; FREITAS, D. S.; BERNARDES, L. F.; LIMA, G. J. E. O.; REIS, A. R.; LAVRES JUNIOR, J.; GUIMARÃES GUILHERME, L. R. Short-term nickel residual effect in field-grown soybeans: nickel-enriched soil acidity amendments promote plant growth and safe soil nickel levels. **Archives of Agronomy and Soil Science**, v. 68, n. 11, p. 1586–1600, 2021. DOI: 10.1080/03650340.2021.1912325.

RODAK, B. W.; FREITAS, D. S.; LIMA, G. J. E. O.; REIS, A. R.; SCHULZE, J.; GUIMARÃES GUILHERME, L. R. Beneficial use of Ni-rich petroleum coke ashes:

product characterization and effects on soil properties and plant growth. **Journal of Cleaner Production**, v. 198, p. 785–796, 2018. DOI: 10.1016/j.jclepro.2018.07.090.

RODAK, B. W.; MORAES, M. F.; PASCOALINO, J. A. L.; OLIVEIRA JUNIOR, A.; CASTRO, C.; PAULETTI, V. Methods to quantify nickel in soils and plant tissues. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 39, n. 3, p. 788–793, 2015. DOI: 10.1590/01000683rbcs20140542.

RUIZ-ARGÜESO, T.; PALACIOS, J. M.; IMPERIAL, J. Regulation of the hydrogenase system in *Rhizobium leguminosarum*. **Plant and soil**, v. 230, p. 49-57, 2001. DOI: 10.1023/A:1004578324977.

RUTER, J. M. Effect of nickel applications for the control of mouse ear disorder on river birch. **Journal of Environmental Horticulture**, v. 23, n. 1, p. 17–20, 2005. DOI: 10.24266/0738-2898-23.1.17.

SAWYER, D. C.; BARAK, P. Mehlich III predicts that soils in Wisconsin and Illinois may cause nickel deficiency in crops. **Plant and Soil**, v. 497, n. 1, p. 523-534, 2024. DOI: 10.1007/s11104-023-06411-x.

SEREGIN, I.; KOZHEVNIKOVA, A. D. Physiological role of nickel and its toxic effects on higher plants. **Russian journal of plant Physiology**, v. 53, p. 257-277, 2006. DOI: 10.1134/S1021443706020178.

SHAHZAD, B.; TANVEER, M.; REHMAN, A.; CHEEMA, S. A.; FAHAD, S.; REHMAN, S.; SHARMA, A. Nickel: whether toxic or essential for plants and environment – a review. **Plant Physiology and Biochemistry**, v. 132, p. 641–651, 2018. DOI: 10.1016/j.plaphy.2018.10.014.

SANTOS NETO, J. V.; LIMA, L. C.; CARDOSO, A. F.; LANA, R. M. Q.; TORRES, J. L. R. Micronutrientes na cultura da soja em sistemas de plantio direto em solos do cerrado sob condições adversas. **Scientific Electronic Archives**, v. 11, n. 5, p. 33–39, 2018.

UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE – USDA. **Soybean explorer**. 2023. Disponível em: <https://ipad.fas.usda.gov/cropexplorer/cropview/commodityview.aspx?cropid=2222000>. Acesso em: 29 nov. 2023.

WITTE, C. P. Urea metabolism in plants. **Plant Science**, v. 180, n. 3, p. 431-438, 2011. DOI: 10.1016/j.plantsci.2010.11.010.

WOOD, B. W. Iron-induced nickel deficiency in pecan. **HortScience**, v. 48, n. 9, p. 1145-1153, 2013. DOI: 10.21273/HORTSCI.48.9.1145.

WOOD, B. W.; REILLY, C. C.; NYCZEPIR, A. P. Mouse-ear of pecan: I. Symptomatology and occurrence. **HortScience**, v. 39, n. 1, p. 87–94, 2004a. DOI: 10.21273/HORTSCI.39.1.87.

WOOD, B. W.; REILLY, C. C.; NYCZEPIR, A. P. Mouse-ear of pecan: II. Influence of nutrient applications. **HortScience**, v. 39, n. 1, p. 95–100, 2004b. DOI: 10.21273/HORTSCI.39.1.95.

WOOD, B. W.; REILLY, C. C.; NYCZEPIR, A. P. Field deficiency of nickel in trees: symptoms and causes. **Acta Horticulturae**, v. 721, p. 83–98, 2006. DOI: 10.17660/ActaHortic.2006.721.10..

YUSUF, M.; FARIDUDDIN, Q.; HAYAT, S.; AHMAD, A. Nickel: an overview of uptake, essentiality and toxicity in plants. **Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology**, v. 86, n. 1, p. 1–17, 2011. DOI: 10.1007/s00128-010-0171-1.

ZHOU, P.; JIANG, Y.; ADEEL, M.; SHAKOOR, N.; ZHAO, W.; LIU, Y.; LI, Y.; LI, M.; AZEEM, I.; RUI, Y.; TAN, Z.; WHITE, J. C.; GUO, Z.; LYNCH, I.; ZHANG, P. Nickel oxide nanoparticles improve soybean yield and enhance nitrogen assimilation. **Environmental Science & Technology**, v. 57, n. 19, p. 7547–7558, 2023. DOI: 10.1021/acs.est.3c00959.

ANEXO I

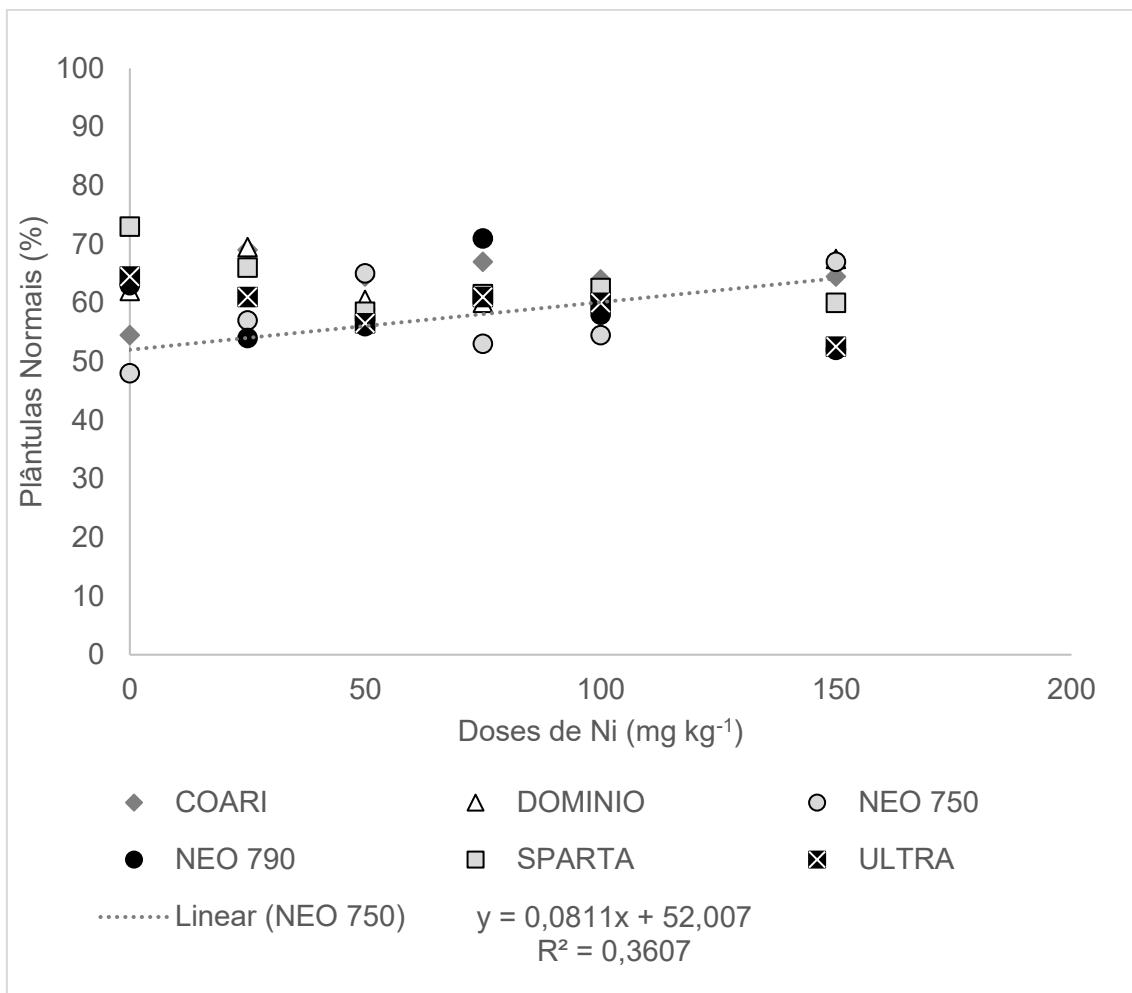
Tabela 3 — Tabela de teste significância de regressão polinomial linear (p Linear) ou quadrática (p Quadrática) para os desdobramentos da interação C x D.

	Plântulas Normais	Plântulas Anormais	Sementes Mortas	Comprimento Radicular	Comprimento de Parte Aérea
p Linear					
COARI	0,388	0,737	0,283	<0,001	0,186
DOMÍNIO	0,352	0,743	0,148	0,885	0,600
NEO 750	0,036	0,062	0,653	0,134	0,087
NEO 790	0,329	0,087	0,001	0,881	0,001
SPARTA	0,104	0,866	0,107	0,002	0,001
ULTRA	0,109	0,873	0,079	<0,001	0,032
p Quadrática					
COARI	0,169	0,614	0,770	0,172	0,304
DOMÍNIO	0,295	0,457	0,869	0,093	0,002
NEO 750	0,915	0,223	0,323	0,5465	0,754
NEO 790	0,230	0,568	0,229	0,364	<0,001
SPARTA	0,152	0,623	0,164	0,668	0,499
ULTRA	0,841	0,729	0,551	0,046	0,005

Fonte: A autora.

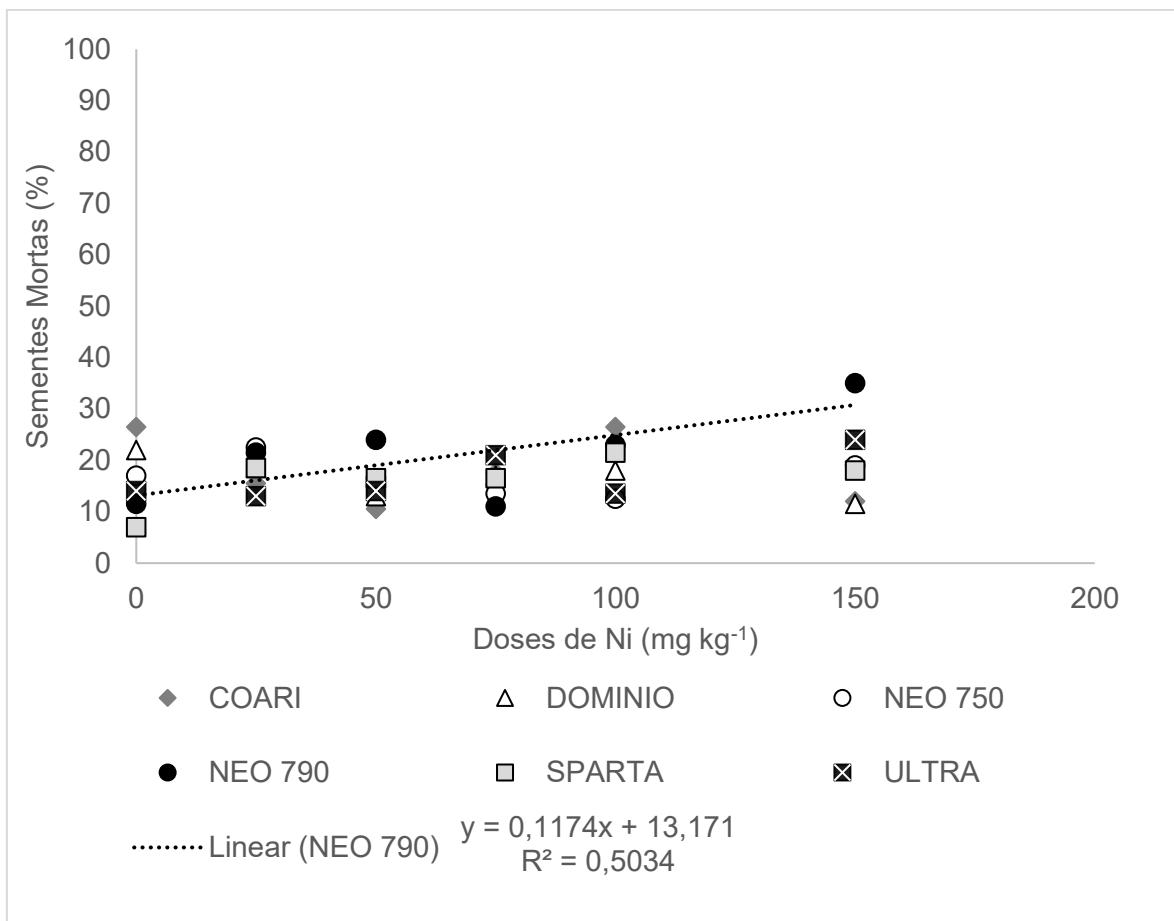
Legenda: Números em negrito: significativo ao nível de 5 ou 1% pelo teste F.

Figura 5 — Regressão linear para a Porcentagem Plântulas Normais em função das Doses de Ni (mg kg^{-1} de semente).



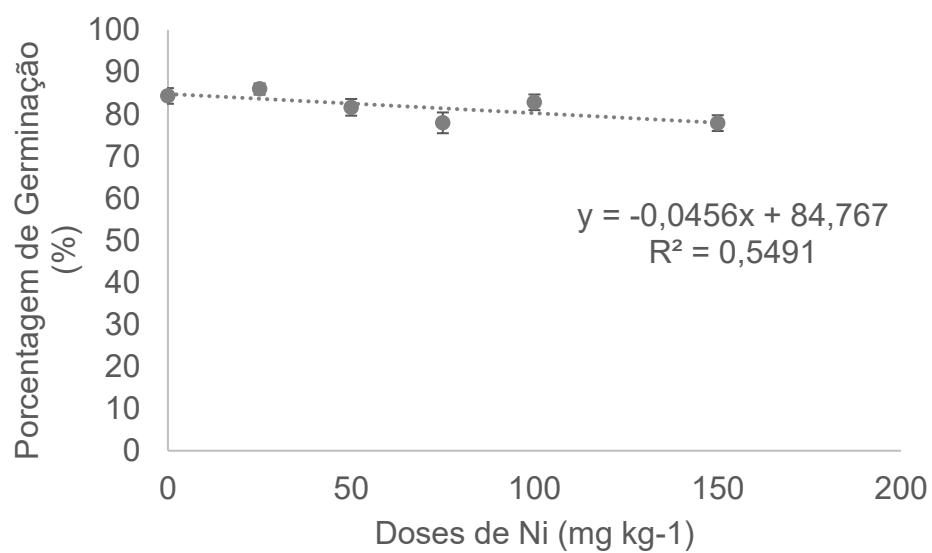
Fonte: A autora.

Figura 8 — Regressão linear para a Porcentagem Sementes Mortas em função dos diferentes cultivares.



Fonte: A autora.

Figura 10 — Regressão linear para a Porcentagem de Germinação de Sementes em função das Doses de Ni (mg kg^{-1} de semente).



Fonte: A autora.