RESSALVA

Atendendo a solicitação do autor, o texto completo desta dissertação será disponibilizado somente a partir de 29/08/2024.

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA "JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
FACULDADE DE ENGENHARIA
CÂMPUS DE ILHA SOLTEIRA

THALITA FISCHER SANTINI MENDES

USO DE FEIJÃO GUANDU (*Cajanus cajan*) NA REMOÇÃO DO EXCESSO DE ELEMENTO TRAÇO EM SOLO AGRÍCOLA

Ilha Solteira
2023

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA: ECOFISIOLOGIA VEGETAL

THALITA FISCHER SANTINI MENDES

USO DE FEIJÃO GUANDU (*Cajanus cajan*) NA REMOÇÃO DO EXCESSO DE ELEMENTO TRAÇO EM SOLO AGRÍCOLA

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira – Unesp como parte dos requisitos para obtenção do título de mestre em agronomia. Especialiadade: Ecofisiologia Vegetal

Nome do orientador
Liliane Santos de Camargos

Nome do coorientador
Jailson Vieira Aguilar

Ilha Solteira
2023

FICHA CATALOGRÁFICA
Desenvolvido pelo Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação

M538u

Mendes, Thalita Fischer Santini.
Uso de feijão guandu (Cajanus cajan) na remoção do excesso de elemento traço em solo agrícola / Thalita Fischer Santini Mendes. -- Ilha Solteira: [s.n.], 2023
59 f. : il.

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira. Área de conhecimento: Sistemas de Produção, 2023

Orientador: Liliane Santos de Camargos
Coorientador: Jailson Vieira Aguilar
Inclui bibliografia

1. Cobre. 2. Fitoextração. 3. Elementos potencialmente tóxicos. 4. Fisiologia.

Raiane da Silva Santos
Supervisora Técnica de Seção
Seção Técnica de Referência, Atendimento ao usuário e Documentação
Diretoria Técnica de Biblioteca e Documentação
CRB/8 - 9999

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO: Uso de feijão guandú (Cajanus cajan) na remoção do excesso de elementostraço em solo agrícola

AUTORA: THALITA FISCHER SANTINI MENDES
ORIENTADORA: LILIANE SANTOS DE CAMARGOS
COORIENTADOR: JAILSON VIEIRA AGUILAR

Aprovada como parte das exigências para obtenção do Título de Mestra em Agronomia, especialidade: Sistemas de Produção pela Comissão Examinadora:

Profa. Dra. LILIANE SANTOS DE CAMARGOS (Participaçao Virtual)
Departamento de Biologia e Zootecnia / UNESP/ Câmpus de Ilha Solteira

Prof. Dr. PAULO RENATO MATOS LOPES (Participaçao Virtual)
Departamento de Produção Vegetal / Faculdade de Ciências Agrárias e Tecnológicas de Dracena - UNESP

Prof. Dr. ELCIO FERREIRA DOS SANTOS (Participaçao Virtual) Departamento de Agronomia / Instituto Federal de Mato Grosso do Sul - IFMS

Ilha Solteira, 27 de fevereiro de 2023

Dedico

Aos meus professores que me fizeram crescer e ver o mundo de outra forma.

Espero um dia poder retribuir tudo o que vocês fizeram por mim.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente gostaria de agradecer a minha orientadora Liliane, que esteve sempre tão presente em minha vida acadêmica desde os primeiros passos com a iniciação-científica. Agradeço pela oportunidade que me ofereceu. Também sou grata aos integrantes do Laboratório LFMV, em especial Jailson, Tássia e Nayane. Muito obrigada pelas parcerias, ensinamentos, confiança e paciência!

Agradeço imensamente à minha família, principalmente minha mãe Karina por estar sempre na linha de frente torcendo por mim. Agradeço meu pai Alex e meus avós Marta e Valter por todo apoio e esforço para que tudo ocorresse bem durante toda essa jornada. Gostaria de deixar um agradecimento super especial para o meu irmãozinho querido Enrico, meu gêmeo 14 anos mais novo e a minha irmã Gabriele. Esses 700km de distância entre a gente só fortaleceu meu amor e carinho por todos vocês!

A Ana, minha parceira, que com muito carinho cuidou de mim, e me ensinou a compreender meu tempo e sempre me apoiou a seguir no ramo acadêmico, visto o caminho que o país estava tomando rumo ao negacionismo. A todas as mulheres que lutaram pelo nosso lugar no espaço acadêmico, ou em qualquer outro meio. A todos os envolvidos na luta contra a desinformação, principalmente no momento da pandemia de COVID-19.

A banca de qualificação e de defesa, Marcelo Minhoto, Lucas Souza, Paulo Lopes e Elcio dos Santos que atenderam meu pedido e dispuseram de seu tempo para leitura e contribuições para este trabalho.

Eterna gratidão à Ilha Solteira, à UNESP, aos seus funcionários e às inúmeras oportunidades oferecidas. Meu reconhecimento e gratidão aos cidadãos paulistas que me permitiram um ensino de qualidade. Desejo poder retornar ao menos parte deste investimento para vocês e para toda a população brasileira.

Também agradeço a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES), pela concessão da bolsa de mestrado.

RESUMO

Nos últimos anos, estudos sobre *trace elements* (TEs), ou elementos traço ganharam atenção do público pois muitas doenças têm sido associadas a altas concentrações desses elementos em alimentos e água devido à contaminação do solo. A ameaça que esses elementos representam para a saúde humana e animal é agravada por sua persistência a longo prazo no meio ambiente. O material de origem de cada solo revela suas características texturais e mineralógicas, no entanto, atividades antrópicas são capazes de remobilizar grandes quantidades de elementos minerais gerando desequilíbrios ambientais em nível ecossistêmico. Os potenciais TEs contaminantes de solos nacionais podem ser mercúrio (Hg), cromo (Cr), chumbo (Pb), cádmio (Cd) zinco (Zn), cobre (Cu), ferro (Fe), manganês (Mn), níquel (Ni), arsênio (As). O Cu, apesar de ser considerado um micronutriente para plantas, em excesso, pode contribuir para alterações negativas no crescimento e desenvolvimento vegetal. Desta maneira o desenvolvimento de tecnologias sustentáveis, efetivas e de baixo custo que auxiliam o manejo das concentrações destes elementos do solo, são de extrema importância. Neste cenário, o presente trabalho objetiva quantificar a translocação e acúmulo de Cu em *Cajanus cajan* (feijão-guandu), cultivada sob dose de aproximadamente 100 $mg \cdot kg^{-1}$ em solo agrícola e solo de pastagem, além de avaliar os efeitos deste metal no metabolismo de carbono e nitrogênio, e investigar possíveis danos ao sistema simbiótico nodular. No presente trabalho foi observado que em plantas de *C. cajan* cultivadas em solo agrícola, a eficiência do sistema fotossintetizante e simbiótico sub acúmulo de 1,07 mg/planta de Cu na parte aérea e 1,25 mg/planta na raiz, não foram afetados, todavia foi observada uma variação metabólica através do aumento da concentração de aminoácidos nos tratamentos V e PCu, o que pode ser uma resposta metabólica afim de fornecer material molecular para complexação de íons livres de Cu por essas moléculas e/ou estratégia compensatória ao transporte de nitrogênio via ureídeos. Devido ao acumulo considerável de Cu na raiz e na parte aérea, *C. cajan* se mostrou tolerante sob dose aproximadamente 100 $mg \cdot kg^{-1}$ de Cu em solo agrícola, podendo ser indicada como uma agente fitoextratora deste metal em solos agrícolas.

Palavras-chave: cobre; fitoextração; fisiologia; elementos potencialmente tóxicos.

ABSTRACT

In recent years, studies on trace elements (TEs) have gained public attention as many diseases have been associated with high concentrations of these elements in food and water due to soil contamination. The threat these elements pose to human and animal health is compounded by their long-term persistence in the environment. The source material of each soil reveals its textural and mineralogical characteristics, however, anthropic activities are capable of remobilizing large amounts of mineral elements, generating environmental imbalances at an ecosystem level. Potential TEs contaminating national soils can be mercury (Hg), chromium (Cr), lead (Pb), cadmium (Cd) zinc (Zn), copper (Cu), iron (Fe), manganese (Mn), nickel (Ni), arsenic (As). Copper, despite being considered a micronutrient for plants, in excess, can contribute to negative changes in plant growth and development. Thus, the development of sustainable, effective and low-cost technologies that help manage the concentrations of these elements in the soil are extremely important. In this scenario, the present work aims to quantify the translocation and accumulation of Cu in *Cajanus cajan* (pigeon bean), cultivated at a dose of approximately 100 $mg \cdot kg^{-1}$ in agricultural soil (V) and pasture soil (PCu), to evaluate the effects of this metal on carbon and nitrogen metabolism, and investigate possible damage to the nodular symbiotic system. In the present work, it was observed that in plants of *C. cajan* cultivated in agricultural soil, the efficiency of the photosynthetic and symbiotic system under accumulation of 1.07 mg/plant of Cu in the aerial part and 1.25 mg/plant in the root were not affected, however, a metabolic variation was observed through the increase in concentration of amino acids in the V and PCu treatments, which may be a metabolic response in order to provide molecular material for the complexation of free Cu ions by these molecules and/or a compensatory strategy for the transport of nitrogen via ureides. Due to the considerable accumulation of Cu in the root and shoot, *C. cajan* was tolerant to a dose of approximately 100 $mg \cdot kg^{-1}$ of Cu in agricultural soil, and may be indicated as a phytoextractor agent for this metal in agricultural soils.

Keywords: copper; phytoextraction; physiology; potentially toxic elements.

SUMÁRIO

1	**INTRODUÇÃO GERAL**	8
	REFERÊNCIAS	10
2	**CAPÍTULO 1: DINÂMICA DOS ELEMENTOS TRAÇO (TEs) NOS BIOMAS BRASILEIROS: FONTES DE CONTAMINAÇÃO E EFEITOS NA CADEIA TRÓFICA (REVISÃO)**	12
2.1	INTRODUÇÃO	12
2.2	DINÂMICA DOS TEs DENTRO DOS BIOMAS BRASILEIROS	14
2.3	PRINCIPAIS FONTES DE CONTAMINAÇÃO DO SOLO POR TEs	19
2.3.1	**Incendios florestais e desmatamento**	16
2.3.2	**Agricultura**	21
2.3.3	**Mineração**	22
2.3.4	**Urbanização**	25
2.3.5	**Efeitos na cadeia trófica**	26
2.4	CONSIDERAÇÕES FINAIS	28
	REFERÊNCIAS	30
3	**CAPÍTULO 2: MANUTENÇÃO DA FIXAÇÃO BIOLÓGICA DE NITROGÊNIO EM *Cajanus cajan* POTENCIALIZA A REMOÇÃO DO EXCESSO DE COBRE EM SOLO AGRÍCOLA**	38
3.1	INTRODUÇÃO	38
3.2	MATERIAL E MÉTODOS	40
3.2.1	**Condução do experimento**	40
3.2.2	**Análise do aparato fotossintético**	41
3.2.3	**Coleta do experimento**	42
3.2.4	**Quantificação de metabólitos**	42
3.2.5	**Quantificação de macro e micronutrientes nos tecidos e no solo**	43
3.2.6	**Determinação do potencial fitoextrator**	44
3.2.7	**Análise estatística**	44
3.3	RESULTADOS	44
3.4	DISCUSSÃO	50
3.5	CONCLUSÃO	53
	REFERÊNCIAS	54
4	**CONSIDERAÇÕES FINAIS**	59

1 INTRODUÇÃO GERAL

O solo é o ecossistema mais complexo e diverso do mundo. Além de fornecer à humanidade 98,8% de seus alimentos, os solos fornecem uma ampla gama de outros serviços, desde armazenamento de carbono e regulação de gases de efeito estufa até mitigação de enchentes e suporte para nossas cidades em expansão (KOPITTKE *et al*., 2019). Mas o solo é um recurso finito, e isso precisa ser explicitamente considerado em estruturas econômicas e processos de tomada de decisão em todos os níveis de governança, incluindo investimento em difusão tecnológica e inovação, além da conscientização sistêmica entre todas as partes interessadas (ROJAS *et al*., 2016).

Os termos *trace elements* (TEs) "elementos-traço" e *potentially toxic elements* (PTEs) "elementos potencialmente tóxicos" têm sido utilizados para definir elementos químicos que em baixas concentrações no ambiente podem vir a constituir uma fonte potencial para a poluição ambiental devido ao processo de bioacumulação (SOUZA *et al*., 2015). Estas substâncias afetam o equilíbrio químico, físico e biológico do solo e podem entrar na cadeia alimentar, de modo a chegar aos seres humanos através do processo de bioacumulação (SHAYLER; MCBRIDE; HARRISON, 2009; CRISTALDI *et al*., 2017), um exemplo do processo de contaminação por TEs em solo agrícola é o aplicação contínua ao longo dos anos de fungicidas a base de cobre utilizados na prática de viticultura, que contribuíram para aumentar a concentração de Cu nos solos, sendo que hoje, não é incomum encontrar solos de vinhedos com concentrações totais de cobre superior a 100 mg kg^{-1} (WIDMER; NORGROVE, 2023).

Considerando-se a necessidade de preservação e de recuperação de solos degradados, a contaminação por elementos traço ou elementos potencialmente tóxicos tem se apresentado como um dos grandes desafios atuais. Os metais-traço se acumulam em diversas fases geoquímicas do sedimento por meio de adsorção, co-precipitação e complexação (MARTINS *et al*., 2011). À vista disso, a prevenção é sempre a opção mais rentável no controle da contaminação, no entanto, em casos em que o solo já esteja contaminado, medidas de remediação devem ser implementadas para possibilitar a recuperação dos solos, afim de garantir o preceito do desenvolvimento sustentável.

A fitorremediação, neste sentido, é uma técnica de alto potencial para recuperar solos contaminados, é uma abordagem potencialmente econômica e promissora. Existem diversas técnicas de fitorremediação, entre elas a fitoextração, que utiliza plantas que acumulam metais pesados em seus tecidos, assim as partes aéreas podem então ser colhidas e exportadas para

tratamento seguro por secagem, cinzas ou compostagem (WUANA; OKIEIMEN, 2011). A escolha da espécie vegetal usada no processo de remediação é um fator de grande relevância, sendo necessário identificar plantas que apresentem bom desenvolvimento em ambientes contaminados, bem como tolerância e adaptação às condições locais de cultivo (ALI; KHAN; SAJAD, 2013; SIPOS *et al*., 2013). O potencial de tolerância da planta ao elemento-traço depende de mecanismos como a ligação do metal na parede celular, transporte ativo de íons metálicos nos vacúolos, quelação de íons metálicos, e formação complexa de proteínas e peptídeos (MEMON; SCHRÖDER, 2009).

Estudos realizados com o intuito de estabelecer a capacidade de tolerância e fitorremediação de *Cajanus Cajan*, indicam potencial elevado destas plantas para a aplicação da técnica por apresentarem adaptações metabólicas sob condições de estresse causado por metais no solo (RAO; SRESTY, 2000; FELIPE; OLIVEIRA; LEÃO, 2009; VENDRUSCOLO, 2013; AWANA *et al*., 2020; BUCH *et al*., 2020; SILVA *et al*., 2022). Tais observações despertaram nosso interesse sobre o potencial de *Cajanus cajan* na fitoextração de elementos potencialmente tóxicos presentes no solo. Diante disso, o presente trabalho teve como objetivo estudar a capacidade de *Cajanus cajan* na fitoextração de Cu em solo agrícola e elaboração de uma revisão de literatura visando compreender o estado de contaminação dos solos nacionais por elementos-traço.

3.5 CONCLUSÃO

Em plantas de *C. cajan* cultivadas sob dose de aproximadamente 100 $mg \cdot kg^{-1}$ de Cu em solo agrícola de viticultura e solo de pastagem, a translocação de Cu para os tecidos aéreos foi aproximadamente 5,7 vezes maior em solo agrícola. A eficiência do sistema fotossintetizante e simbiótico sub acúmulo de 1,07 mg/planta de Cu na parte aérea e 1,25 mg/planta na raiz, não foram afetados, todavia foi observada uma variação metabólica através do aumento da concentração de aminoácidos nos tratamentos V e PCu, o que pode ser uma resposta metabólica afim de fornecer material molecular para complexação de íons livres de Cu por essas moléculas e/ou estratégia compensatória ao transporte de nitrogênio via ureídeos. Devido ao acumulo considerável de Cu na raiz e na parte aérea, *C. cajan* se mostrou tolerante sob dose aproximadamente 100 $mg \cdot kg^{-1}$ de Cu em solo viticultura, podendo ser indicada como uma agente fitoextratora deste metal em solos agrícolas.

REFERÊNCIAS

ADREES, M. *et al*. The effect of excess copper on growth and physiology of important food crops: a review. **Environmental Science and Pollution Research**, Heidelberg, v. 22, n. 11, p. 8148–8162, 1 jun. 2015.

AMARANTE, L. DO; LIMA, J. D.; SODEK, L. Growth and stress conditions cause similar changes in xylem amino acids for different legume species. **Environmental and Experimental Botany**, Amsterdam, v. 58, n. 1, p. 123–129, 1 dez. 2006.

ANDO, Y. *et al*. Copper in xylem and phloem saps from rice (Oryza sativa): the effect of moderate copper concentrations in the growth medium on the accumulation of five essential metals and a speciation analysis of copper-containing compounds. **Functional Plant Biology**, Clayton, v. 40, n. 1, p. 89–100, 2 nov. 2012.

ANDRADE, S. A. L. *et al*. Biochemical and physiological changes in jack bean under mycorrhizal symbiosis growing in soil with increasing Cu concentrations. **Environmental and Experimental Botany**, Amsterdam, v. 68, n. 2, p. 198–207, 1 abr. 2010.

ANTUNES, F. *et al*. **Papel da redutase do nitrato e da asparagina sintetase em plantas de soja (Glycine max L.) sob condições de estresse de nitrogenio**. 2007. 108 f. Tese (Doutorado em Biologia Vegetal) - Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2007.

AWANA, M. *et al*. Protein and gene integration analysis through proteome and transcriptome brings new insight into salt stress tolerance in pigeonpea (Cajanus cajan L.). **International Journal of Biological Macromolecules**, Amsterdam, v. 164, p. 3589–3602, 1 dez. 2020.

BIELESKI, R. L.; FERGUSON, I. B. Physiology and Metabolism of Phosphate and Its Compounds. Em: LÄUCHLI, A.; BIELESKI, R. L. (ed.). **Inorganic Plant Nutrition**. Encyclopedia of Plant Physiology. Berlin, Heidelberg: Springer, 1983. p. 422–449.

BIELESKI, R. L.; TURNER, N. A. Separation and estimation of amino acids in crude plant extracts by thin-layer electrophoresis and chromatography. **Analytical Biochemistry**, Philadelphia, v. 17, n. 2, p. 278–293, 1 nov. 1966.

BRADFORD, M. M. A rapid and sensitive method for the quantitation of microgram quantities of protein utilizing the principle of protein-dye binding. **Analytical Biochemistry**, Philadelphia, v. 72, n. 1, p. 248–254, 7 maio 1976.

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente-CONAMA. **Resolução 420/2009**. 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. Diário Oficial da República Federativa do Brasil, Poder executivo, Brasília, DF. 30 dez. 2009, Sec. 1, p. 20.

BUCH, D. U. *et al*. Characterization of microRNA genes from Pigeonpea (Cajanus cajan L.) and understanding their involvement in drought stress. **Journal of Biotechnology**, Amsterdam, v. 321, p. 23–34, 10 set. 2020.

CHAFFAI, R.; KOYAMA, H. Chapter 1 - Heavy Metal Tolerance in Arabidopsis thaliana. Em: KADER, J.-C.; DELSENY, M. (ed.). **Advances in Botanical Research**. [*S. l.*]: Academic Press, 2011. v. 60, p. 1–49.

CRISTALDI, A. *et al*. Phytoremediation of contaminated soils by heavy metals and PAHs. A brief review. **Environmental Technology & Innovation**, Amsterdam, v. 8, p. 309–326, 1 nov. 2017.

FARID, M. *et al*. Copper-Induced Responses in Different Plant Species. Em: HASANUZZAMAN, M. (ed.). **Approaches to the Remediation of Inorganic Pollutants**. Singapore: Springer, 2021. p. 259–280.

FELIPE, R. T. A.; OLIVEIRA, J. A. DE; LEÃO, G. A. Potencial de Cajanus cajan e Crotalaria spectabilis parafitorremediação: absorção de arsênio e respostas antioxidativas. **Revista Árvore**, Viçosa, MG, v. 33, p. 245–254, abr. 2009.

FERREIRA, E.; CAVALCANTI, P.; NOGUEIRA, D. ExpDes: an R package for ANOVA and experimental designs. **Applied Mathematics**, Lausanne, v. 5, p. 2952–2958, 18 nov. 2014.

FULLER, D. Q. *et al*. Cajanus cajan (L.) Millsp. origins and domestication: the South and Southeast Asian archaeobotanical evidence. **Genetic Resources and Crop Evolution**, Dordrecht, v. 66, n. 6, p. 1175–1188, 1 ago. 2019.

HADDAD, S. A. *et al*. Inhibition of Nodulation and Nitrogen Nutrition of Leguminous Crops by Selected Heavy Metals. **Air, Soil and Water Research**, London, v. 8, p. ASWR.S21098, 1 jan. 2015.

HE, Z. *et al*. **Heavy Metal Contamination of Soils: Sources, Indicators and Assessment**. 2015. Disponível em: https://www.semanticscholar.org/paper/Heavy-Metal-Contamination-of-Soils%3A-Sources%2C-and-He-Shentu/c1316de05415b98becb63d86b1b2d9d458709aa6. Acesso em: 13 jan. 2023.

JONES, J. B. Kjeldahl method for nitrogen determination. **Kjeldahl method for nitrogen determination.** 1991.

KABATA-PENDIAS, A. **Trace Elements in Soils and Plants**. 4. ed. Boca Raton: CRC Press, 2010.

KASSAMBARA, A.; MUNDT, F. **factoextra: Extract and Visualize the Results of Multivariate Data Analyses.**, 1 abr. 2020. Disponível em: https://CRAN.R-project.org/package=factoextra. Acesso em: 11 jan. 2023.

KLITTICH, C. J. Milestones in Fungicide Discovery: Chemistry that Changed Agriculture. **Plant Health Progress**, Paul, v. 9, n. 1, p. 31, jan. 2008.

KOMÁREK, M. *et al*. Contamination of vineyard soils with fungicides: A review of environmental and toxicological aspects. **Environment International**, Oxford, v. 36, n. 1, p. 138–151, 1 jan. 2010.

KUMAR, V. *et al*. Copper bioavailability, uptake, toxicity and tolerance in plants: A comprehensive review. **Chemosphere**, Oxford, v. 262, p. 127810, 1 jan. 2021.

LI, H.-B. *et al*. Evaluation of two methods for the extraction of antioxidants from medicinal plants. **Analytical and Bioanalytical Chemistry**, Heidelberg, v. 388, n. 2, p. 483–488, 1 maio 2007.

LIMA, J. D.; SODEK, L. N-stress alters aspartate and asparagine levels of xylem sap in soybean. **Plant Science**, E Park, v. 165, n. 3, p. 649–656, 1 set. 2003.

LIU, L. *et al*. Remediation techniques for heavy metal-contaminated soils: Principles and applicability. **Science of The Total Environment**, Amsterdam, v. 633, p. 206–219, 15 ago. 2018.

MADHAVA RAO, K. V.; SRESTY, T. V. S. Antioxidative parameters in the seedlings of pigeonpea (Cajanus cajan (L.) Millspaugh) in response to Zn and Ni stresses. **Plant Science**, E Park, v. 157, n. 1, p. 113–128, 8 ago. 2000.

MALAVOLTA, E.; VITTI, G. C.; OLIVEIRA, S. A. DE. **Avaliação do estado nutricional das plantas: princípios e aplicações**. [*S. l.*] POTAFOS, 1997.

MANTOVANI, A. **Composição química de solos contaminados por cobre: formas, sorção e efeito no desenvolvimento de espécies vegetais**. 2009. 178 f. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009.

MARASTONI, L. *et al*. Synergism and antagonisms between nutrients induced by copper toxicity in grapevine rootstocks: Monocropping vs. intercropping. **Chemosphere**, Oxford, v. 214, p. 563–578, 1 jan. 2019.

MARQUES, D. M. *et al*. Root morphology and leaf gas exchange in Peltophorum dubium (Spreng.) Taub. (Caesalpinioideae) exposed to copper-induced toxicity. **South African Journal of Botany**, Amsterdam, v. 121, p. 186–192, 1 mar. 2019.

MASSOUD, M. B. *et al*. Protective role of exogenous phytohormones on redox status in pea seedlings under copper stress. **Journal of Plant Physiology**, Muenchen, v. 221, p. 51–61, 1 fev. 2018.

PIRES, F. R. *et al*. Adubos Verdes Na Fitorremediação De Solos Contaminados Com O Herbicida Tebuthiuron. **Revista Caatinga**, Mossoró, v. 19, n. 1, p. 92–97, 2006.

RAHMAN, M. L. *et al*. Plant community composition and attributes reveal conservation implications for newly created grassland on capped landfill sites. **Journal for Nature Conservation**, Muenchen, v. 21, n. 4, p. 198–205, 1 ago. 2013.

RAIJ, B. VAN *et al*. **Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais**. Campinas: Instituto Agronômico, 1999.

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

SEKHAR, K. *et al*. Metallothionein 1 (CcMT1) of pigeonpea (Cajanus cajan, L.) confers enhanced tolerance to copper and cadmium in Escherichia coli and Arabidopsis thaliana. **Environmental and Experimental Botany**, Amsterdam, v. 72, n. 2, p. 131–139, 1 set. 2011.

SHABBIR, Z. *et al*. Copper uptake, essentiality, toxicity, detoxification and risk assessment in soil-plant environment. **Chemosphere**, Oxford, v. 259, p. 127436, 1 nov. 2020.

SHAYLER, H.; MCBRIDE, M.; HARRISON, E. **Sources and Impacts of Contaminants in Soils**. [*S. l.: s n.*], 2009.

SILVA, M. B. DA *et al*. Response of Cajanus cajan to excess copper in the soil: tolerance and biomass production. **Physiology and Molecular Biology of Plants**, New Delhi, v. 28, n. 6, p. 1335–1345, 1 jun. 2022.

SOUZA, L. A. *et al*. Arbuscular mycorrhiza confers Pb tolerance in Calopogonium mucunoides. **Acta Physiologiae Plantarum**, Heidelberg, v. 34, n. 2, p. 523–531, 1 mar. 2012.

SOUZA, L. A.; CAMARGOS, L. S. [UNESP; CARVALHO, M. E. A. Toxic metal phytoremediation using high biomass non-hyperaccumulator crops: New possibilities for bioenergy resources. Em: **Phytoremediation: Methods, Management and Assessment**. [s.l.] Vladimir Matichenkov, 2018. p. 1.

TORTOSA, G. *et al*. Copper modulates nitrous oxide emissions from soybean root nodules. **Environmental and Experimental Botany**, Amsterdam, v. 180, p. 104262, 1 dez. 2020.

VARDIEN, W.; STEENKAMP, E. T.; VALENTINE, A. J. Legume nodules from nutrient-poor soils exhibit high plasticity of cellular phosphorus recycling and conservation during variable phosphorus supply. **Journal of Plant Physiology**, Muenchen, v. 191, p. 73–81, 1 fev. 2016.

VENDRUSCOLO, D. **Seleção de plantas para fitorremediação de solo contaminado com cobre**. 2013. 58 f. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2013.

VOGELS, G. D.; VAN DER DRIFT, C. Differential analyses of glyoxylate derivatives. **Analytical Biochemistry**, Philadelphia, v. 33, n. 1, p. 143–157, 1 jan. 1970.

WANG, Q.-Y.; LIU, J.-S.; HU, B. Integration of copper subcellular distribution and chemical forms to understand copper toxicity in apple trees. **Environmental and Experimental Botany**, Amsterdam, v. 123, p. 125–131, 1 mar. 2016.

WICKHAM, H. **ggplot2**. New York, NY: Springer, 2009.

WIDMER, J.; NORGROVE, L. Identifying candidates for the phytoremediation of copper in viticultural soils: A systematic review. **Environmental Research**, Maryland Heights, v. 216, p. 114518, 1 jan. 2023.

YEMM, E. W.; COCKING, E. C.; RICKETTS, R. E. The determination of amino-acids with ninhydrin. **Analyst**, [*s. l.*], v. 80, n. 948, p. 209–214, 1 jan. 1955.

YRUELA, I. Copper in plants. **Brazilian Journal of Plant Physiology**, Campinas, v. 17, p. 145–156, mar. 2005.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Embora seja trabalhoso investigar o nível de contaminação dos solos pelo modelo convencional nesse país com grandeza continental, é possível rastrear as áreas de maior risco, e fazer um planejamento estratégico dada a dificuldade em processar tal volume amostral. Todavia uma nova técnica está sendo desenvolvida para estudos nesta área com auxílio de novos métodos tecnológicos usando satélites e espectroscopia, o que poderá contribuir para o monitoramento de elementos poluentes e apoiar as investigações da pedosfera ambiental. Além disso, podem auxiliar nas decisões de uso do solo, práticas de gestão e políticas públicas nacionais, para que levem em consideração as limitações e características específicas de cada bioma, afim de evitar a dispersão dos TEs e consequentemente a contaminação de áreas subjacentes à biomas mais propensos a deposição de microelementos no meio ambiente.

Até então o que conseguimos observar com o presente trabalho é que em solo de produção agrícola, devido a ser um solo fertilizado, a disponibilidade de outros elementos para além do contaminante, como fósforo por exemplo, pode ser um ponto chave para incrementar o acúmulo de biomassa e consequentemente influenciar um acúmulo maior de Cu, neste caso, pela leguminosa, que por sua vez, através do processo de fixação biológica de nitrogênio, contribuirá também para manutenção da qualidade do solo em curto e médio prazo. O próximo passo, de certa forma é estudar como esse elemento está sendo transportado via xilema, afim de confirmar a hipótese de complexação com os aminoácidos e estudar como o elemento está sendo depositado nos tecidos, a complexação do Cu em moléculas orgânicas tornará lenta a volta desse elemento para solo de devido ao processo de mineralização molecular? Caso contrário o elemento-traço retornará ao solo sem variação na velocidade de remobilização, nesta condição seria interessante então transportar esse material vegetal para áreas menos férteis, pois mesmo contendo uma alta concentração de Cu nos tecidos, essas plantas também incrementariam a qualidade destes solos com outros elementos nutricionais. Isso pode contribuir para um efeito cascata, por exemplo destinando à áreas de baixa fertilidade onde foi inserida matéria orgânica incrementada com elementos traço, uma cultura lenhosa para posterior utilização da madeira visando uso comercial, ou mesmo desenvolvendo concreto verde, como o *hempcrete* por exemplo.