

**UNIVERSIDADE DO ESTADO DE SANTA CATARINA – UDESC
CENTRO DE CIÊNCIAS AGROVETERINÁRIAS – CAV
DOUTORADO EM CIÊNCIA DO SOLO**

ANDREI DE SOUZA DA SILVA

**NÍVEL CRÍTICO TÓXICO DE ZINCO EM TOMATEIRO CULTIVADO EM SOLOS
DISTINTOS**

LAGES, SC

2022

ANDREI DE SOUZA DA SILVA

**NÍVEL CRÍTICO TÓXICO DE ZINCO EM TOMATEIRO CULTIVADO EM SOLOS
DISTINTOS**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, da Universidade do Estado de Santa Catarina, como requisito parcial para obtenção do grau de Doutor em Ciência do Solo.

Orientador: Dra. Mari Lucia Campos
Coorientador: Dr. David José Miquelluti

LAGES, SC

2022

**Ficha catalográfica elaborada pelo programa de geração automática da
Biblioteca Setorial do CAV/UDESC,
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)**

Silva, Andrei de Souza
NÍVEL CRÍTICO TÓXICO DE ZINCO EM TOMATEIRO
CULTIVADO EM SOLOS DISTINTOS / Andrei de Souza
Silva. -- 2022.
96 p.

Orientadora: Mari Lucia Campo
Coorientador: David José Miquelluti
Tese (doutorado) -- Universidade do Estado de Santa
Catarina, Centro de Ciências Agroveterinárias, Programa de
Pós-Graduação em Ciência do Solo, Lages, 2022.

1. Acumulação de Zinco. 2. Toxicidade. 3. Nutrição de
Plantas. 4. Biofortificação. 5. Estresse Oxidativo. I. Campo,
Mari Lucia. II. Miquelluti, David José. III. Universidade do
Estado de Santa Catarina, Centro de Ciências
Agroveterinárias, Programa de Pós-Graduação em Ciência do
Solo. IV. Título.

ANDREI DE SOUZA DA SILVA

**NÍVEL CRÍTICO TÓXICO DE ZINCO EM TOMATEIRO CULTIVADO EM SOLOS
DISTINTOS**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo do Centro de Ciências Agroveterinárias, da Universidade do Estado de Santa Catarina, como requisito parcial para obtenção do título de doutor em Ciência do Solo.

BANCA EXAMINADORA

Orientador:



Dr^a. Mari Lucia Campos
CAV/UEDESC

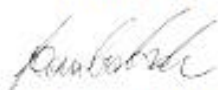
Membros:



Dr. Paulo Cezar Cassol
CAV/UEDESC



Dr. Cristiano André Steffens
CAV/UEDESC



Dr. Leandro Hahn
EPAGRI/UNIARP



Dr. Dennis Goss de Souza
IFPR

Lages, 06 de julho de 2022.

A minha, mãe, Nezi, meu Pai, João, meus irmãos, Adriano e Cristina, minha esposa, Vanessa e a minha orientadora e amiga Mari Lucia.

Dedico.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus pela vida, pela saúde e pelas oportunidades que me trouxeram até aqui, pelas vitórias e por me permitir vencer todas aquelas batalhas e desafios que se apresentaram na jornada.

A minha família, em especial a minha mãe por tudo que sempre fez para que eu pudesse chegar até onde cheguei, e ao meu pai que também nunca mediu esforços para me apoiar e permitir que eu seguisse meu caminho. Aos meus irmãos meu agradecimento pelo apoio e incentivo, carinho e amor, preocupação e zelo, sou imensamente grato. Sou imensamente grato a tudo que sempre fizeram e fazem por mim, pela infância que me proporcionaram, e por me apoiar sempre em todas as minhas decisões.

A minha esposa, Vanessa, que é minha companheira de jornada, confidente e melhor amiga, apoiadora e incentivadora. Essa que eu conheci ao longo da minha jornada de pós-graduação e foi o meu melhor presente. Só tenho o que te agradecer por sempre estar junto comigo, me apoiando das mais diversas maneiras. Te Amo.

Um agradecimento mais que especial tenho que dar a minha orientadora, professora Mari Lucia, que mesmo sem me conhecer aceitou-me como seu orientado no início da minha jornada no mestrado e me conduziu até aqui. Sem dúvidas alguma é uma excelente profissional, capaz e competente, inteligente e sábia, que para todos os seus orientados é muito mais que uma figura a ser seguida no mundo acadêmico, mas também um exemplo de caráter, bondade e ser humano. A você, professora Mari, meus mais profundos sentimentos de prosperidade e felicidade, e saiba que sempre estarei aqui para o que for preciso, pois sei que a professora sempre estará de portas abertas para me receber. Muito obrigado por tudo.

Ainda, agradeço imensamente ao professor David Miquelluti que sempre nos orientou e nos auxiliou com diversas questões, que é uma grande pessoa e que merece todo meu respeito. Muito obrigado por tudo Professor David.

Aos meus colegas de laboratório e de programa de pós-graduação, em especial a Heloisa, Natacha, Marcia Eduarda, Fernanda, Mayara, Cleiton, Diou, Gabriel, Gilmar, Jadiel, Maria Izabel, Jéssica, Fagner, Gustavo e todos outros que participaram

da minha caminhada, meu muito obrigado. A parceria e a cumplicidade fazem os momentos difíceis mais leves e fáceis de serem contornados.

Ao Leandro Hahn, que foi uma figura fundamental no desenvolvimento da nossa pesquisa, sempre disposto a contribuir com melhorias e avanços para a cultura do tomate e para a sua região de atuação. Sem dúvidas Leandro, você é uma pessoa diferenciada e merece todo sucesso do mundo. Estendo também meus agradecimentos a Jéssica e ao senhor Adão Zucatti que por intermédio do Leandro disponibilizaram tempo e estrutura de sua propriedade para o desenvolvimento de parte da nossa pesquisa. Muito obrigado.

À Universidade do Estado de Santa Catarina agradeço imensamente pelo ensino de qualidade entregue através dos professores que lecionam as disciplinas e coordenam os cursos. Agradeço a infraestrutura e por conceder condições para que possamos conduzir nossa pesquisa da melhor forma possível.

À CAPES pela concessão da bolsa e financiamento dos projetos nos quais estivemos envolvidos, agradeço.

E, por fim, agradeço a todos os professores e servidores da UDESC que contribuíram de alguma forma para que conseguisse concluir minha formação.

RESUMO

O tomate é um alimento que está presente em todas as regiões do planeta, sendo o sétimo alimento mais consumido no mundo. Por ser amplamente disseminado, estudos tem buscado enriquecer este alimento com zinco (Zn) e melhorar sua qualidade nutricional. Contudo, estudos quanto a exposição da cultura a teores elevados desse elemento ainda são necessários. Neste sentido, este estudo objetivou identificar as doses de Zn aplicadas em Cambissolo Húmico (CH) e Nitossolo Bruno (NB) que promovem níveis críticos tóxicos (NCT) do elemento em plantas de tomate. Além disso, buscou-se quantificar os efeitos da aplicação do Zn abaixo e acima do NCT em parâmetros enzimáticos e peróxido de hidrogênio e teor de MDA. Para tal, foram conduzidos dois experimentos em casa de vegetação. Os solos foram coletados em local com vegetação natural e tiveram o pH corrigido para o valor 6,0 com calcário dolomítico. No estudo I, os tratamentos foram as doses de 0, 50, 100, 150, 200, 250, 300 e 450 mg kg⁻¹ de Zn que foram aplicadas aos solos dispostos em vasos, onde as plantas de tomate foram cultivadas. Nestas foram determinados parâmetros de trocas gasosas, índice SPAD, acúmulo de Zn nos órgãos das plantas, produção de massa seca (MS) e parâmetros de raízes. O teor de Zn disponível nos solos aumentou em resposta às doses aplicadas. A taxa fotossintética líquida, o índice SPAD, a MS da parte aérea e raízes, o volume e comprimento de raízes diminuíram em função do incremento dos teores disponíveis. O NCT de Zn para plantas de tomate cultivadas em CH foi atingido na dose aplicada de 48,7 mg kg⁻¹ e NB foi atingido na dose de 122,8 mg kg⁻¹. No experimento II as plantas de tomate foram cultivadas em casa de vegetação, sendo que os tratamentos foram doses de Zn tais qual: CH controle (0,0), 20,0, 40,0 e 60,0 mg kg⁻¹ de Zn e NB Controle (0,0), 40,0, 80,0 e 120,0 mg kg⁻¹ de Zn, nomeados como controle, T0,5, T1,0 e T1,5. Os efeitos foram quantificados pela medição da atividade das enzimas SOD e POD, concentração de H₂O₂ e MDA. Foram determinados os teores de Zn, Ca, Mg, Fe, Cu, Mn e P na parte aérea das plantas, os parâmetros de trocas gasosas, índice SPAD, parâmetros de crescimento de raízes e produção de massa seca de parte aérea e raiz. As plantas de tomate aumentaram a acumulação de Zn em função da dose de Zn em ambos os solos e isto estimulou aumento da atividade das enzimas SOD e POD, principalmente em CH. Em NB a SOD teve sua atividade diminuída quando expostas T1,5. Os teores de H₂O₂ aumentaram em plantas cultivadas nos dois solos e MDA teve aumento apenas em CH. O aumento do acúmulo de Zn inibiu a absorção de P em ambos os solos e de Fe apenas em CH. O comprimento, área superficial e volume radicular, índice SPAD e taxa fotossintética líquida foram inibidos pelo excesso de Zn em ambos os solos, especialmente nos tratamentos T1,0 T1,5. A dose T0,5 não foi capaz de promover melhorias nos parâmetros avaliados. Plantas de tomate demonstraram sensibilidade ao incremento de teores disponíveis de Zn no solo, influenciada por características de solo. Este estudo demonstrou que a adubação da cultura do tomate com Zn requer avaliação criteriosa, especialmente nos cultivos em que o objetivo seja a biofortificação agrônômica, técnica que essa que requer a aplicação de teores mais elevados do elemento.

Palavras-chave: Acumulação de Zinco. Toxicidade. Nutrição de Plantas. Biofortificação. Estresse Oxidativo.

ABSTRACT

Tomato is a food that is present in all regions of the planet, being the seventh most consumed food in the world. Because it is widely disseminated, studies have sought to enrich this food with zinc (Zn) and improve its nutritional quality. However, studies regarding the exposure of the culture to high levels of this element are still necessary. In this sense, this study aimed to identify the doses of Zn applied in Humic Cambisol (CH) and Nitosol Bruno (NB) that promote critical toxic levels (NCT) of the element in tomato plants. Furthermore, we sought to quantify the effects of Zn application below and above the NCT on enzymatic parameters and hydrogen peroxide and MDA content. To this end, two experiments were carried out in a greenhouse. Soils were collected in a place with natural vegetation and had the pH corrected to 6.0 with dolomitic limestone. In study I, the treatments were doses of 0, 50, 100, 150, 200, 250, 300 and 450 mg kg⁻¹ of Zn that were applied to soils arranged in pots, where tomato plants were grown. In these, gas exchange parameters, SPAD index, Zn accumulation in plant organs, dry mass (DM) production and root parameters were determined. The available Zn content in the soils increased in response to the applied doses. The net photosynthetic rate, the SPAD index, the DM of shoots and roots, the volume and length of roots decreased as a result of the increase in the levels available. The Zn NCT for tomato plants grown in CH was reached at the applied dose of 48.7 mg kg⁻¹ and NB was reached at the dose of 122.8 mg kg⁻¹. In experiment II, tomato plants were grown in a greenhouse, and treatments were Zn doses such as: CH control (0.0), 20.0, 40.0 and 60.0 mg kg⁻¹ of Zn and NB Control (0.0), 40.0, 80.0 and 120.0 mg kg⁻¹ of Zn, named as control, T0.5, T1.0 and T1.5. The effects were quantified by measuring the activity of SOD and POD enzymes, concentration of H₂O₂ and MDA. The contents of Zn, Ca, Mg, Fe, Cu, Mn and P in the aerial part of the plants, the parameters of gas exchange, SPAD index, parameters of root growth and production of dry mass of aerial part and root were determined. Tomato plants increased Zn accumulation as a function of Zn dose in both soils and this stimulated an increase in SOD and POD enzyme activity, mainly in CH. In NB, SOD had its activity reduced when exposed to T1,5. The H₂O₂ contents increased in plants cultivated in both soils and MDA increased only in CH. The increase in Zn accumulation inhibited the uptake of P in both soils and of Fe only in CH. Length, surface area and root volume, SPAD index and net photosynthetic rate were inhibited by excess Zn in both soils, especially in treatments T1.0 T1.5. The dose T0.5 was not able to promote improvements in the parameters evaluated. Tomato plants showed sensitivity to the increase of available levels of Zn in the soil, influenced by soil characteristics. This study demonstrated that the fertilization of tomato crops with Zn requires careful evaluation, especially in crops in which the objective is agronomic biofortification, a technique that requires the application of higher levels of the element.

Keywords: Zinc Accumulation. Toxicity. Plant Nutrition. Biofortification. Oxidative Stress.

LISTA DE FIGURAS

Capítulo I:

- Figura 1 - Teores de Zn em raízes, caules e folhas de plantas de tomate cultivadas em dois solos distintos com doses crescentes do elemento.40
- Figura 2 - Teores de Zn disponível em função das doses aplicadas em um Cambissolo Húmico (A) e um Nitossolo Bruno (B) destinados ao cultivo de plantas de tomate.41
- Figura 3 - Índice SPAD (a), taxa fotossintética líquida (A) (b), condutância estomática (gsw) (c), concentração interna de CO₂ (Ci) (d) e transpiração (E) (e) em plantas de tomate cultivadas em dois solos distintos e expostas a doses crescentes de Zn.43
- Figura 4 - Comprimento (a), volume (b) e diâmetro (c) de raízes de plantas de tomate cultivadas em dois solos distintos e expostas a doses crescentes de Zn.46
- Figura 5 - Produção de massa seca radicular (a), massa seca de parte aérea (b) e massa seca total (c) de plantas de tomate cultivadas em dois solos tratados com doses crescente de Zinco.47
- Figura 6 - Nível crítico tóxico de Zn para plantas de tomate cultivadas em um Cambissolo Húmico e um Nitossolo Bruno expostas a doses crescente de Zn.48

Capítulo II

- Figura 1 - Teor de Zn em folhas de tomate (*Solanum lycopersicum* L.) cultivadas em um Nitossolo Bruno (NB) e um Cambissolo Húmico (CH) expostas a doses de Zn.69**Erro! Indicador não definido.**

- Figura 2 - Efeito de doses de Zn na atividade de SOD (A), POD (B) e produção de H₂O₂ (C) e MDA (D) em plantas de tomate (*Solanum lycopersicum* L.) cultivadas em solos distintos.70
- Figura 3 - Produção de massa seca de parte aérea (MSPA) (A) e massa seca de raiz (MSR) (B) de plantas de tomate (*Solanum lycopersicum* L.) cultivadas em dois solos distintos expostas a diferentes teores de Zn.73

LISTA DE TABELAS

Capítulo I:

Tabela 1 - Atributos químicos e físicos de um Nitossolo Bruno (NB) e um Cambissolo Húmico (CH) utilizados para condução do estudo (0-20 cm).37

Tabela 2 - Coeficientes de correlação simples de Pearson entre as características índice SPAD (SPAD), taxa fotossintética líquida (A), condutância estomática (gsw), concentração interna de CO₂ (Ci), transpiração (E), teor de zinco nas folhas (Zn folha) e zinco disponível no solo (Zn disp.) de plantas de tomate cultivadas em diferentes concentrações de Zn em dois solos.44

Capítulo II

Tabela - 1 Atributos químicos e físicos de um Nitossolo Bruno (NB) e um Cambissolo Húmico (CH) utilizados no estudo (0-20 cm). **Erro! Indicador não definido.**

Tabela - 2 Teores disponíveis de Zn e porcentagem disponível Zn de dois solos tratados com diferentes concentrações... **6Erro! Indicador não definido.**

Tabela 3 - Coeficientes de correlação simples de Pearson entre as características teor de zinco nas folhas (Zn folha), zinco disponível no solo (Zn disp.), massa seca de parte aérea (MSPA) e massa seca de raiz (MSR) de plantas de tomate cultivadas em diferentes concentrações de Zn em dois solos....68

Tabela - 4 Efeito do Zn no índice SPAD, taxa fotossintética líquida, condutância estomática, concentração interna de CO₂ e transpiração de plantas de tomate (*Solanum lycopersicum* L.) cultivadas em solos distintos.71

Tabela - 5 Teores Minerais de Cálcio, Magnésio, Ferro, Cobre, Manganês e Fósforo em folhas de tomate (*Solanum lycopersicum* L.) cultivadas em dois solos distintos expostas a doses de Zn.72

Tabela 6 - Arquitetura radicular de plantas de tomate (<i>Solanum lycopersicum</i> L.) expostas ao incremento de Zn cultivadas em um Nitossolo Bruno e um Cambissolo Húmico.	74
--	----

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO GERAL	16
1.1 OBJETIVOS.....	18
1.1.1 Objetivo geral.....	18
1.1.2 Objetivos específicos.....	19
1.2 HIPÓTESES	19
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	20
2.1 O ZINCO.....	20
2.1.1 O zinco no solo.....	20
2.1.2 O zinco nas plantas	23
2.1.3 O zinco na saúde humana.....	26
2.2 A CULTURA DO TOMATE	27
2.2.1 Adubação da cultura do tomate	29
2.3 CAMBISSOLOS E NITOSSOLOS	30
2.4 A BIOFORTIFICAÇÃO DE ALIMENTOS COM Zn.....	31
3. CAPÍTULO I – NÍVEL CRÍTICO TÓXICO DE ZINCO EM TOMATE CULTIVADO EM UM CAMBISSOLO HÚMICO E UM NITOSSOLO BRUNO	33
RESUMO.....	33
3.1 INTRODUÇÃO.....	35
3.2 MATERIAL E MÉTODOS	37
3.3 RESULTADOS.....	40
3.3.1 Concentração de Zn no solo e estruturas das plantas.	40
3.3.2 Trocas gasosas e índice SPAD	42
3.3.3 Parâmetros radiculares e produção de massa seca	45
3.3.4 Nível crítico tóxico de Zn	47
3.4 DISCUSSÃO.....	48
3.5 CONCLUSÃO	52

4. REFERÊNCIAS	54
5. CAPÍTULO II – QUAL O COMPORTAMENTO DE PLANTAS DE TOMATE QUANDO EXPOSTAS A CONDIÇÕES TRANSITÓRIAS ENTRE SUFICIÊNCIA E EXCESSO DE ZINCO?	59
5.1 INTRODUÇÃO.....	60
5.2 MATERIAL E MÉTODOS	61
5.2.1 Material vegetal e tratamentos	61
5.2.2 Parâmetros Fisiológicos	63
5.2.3 Atividade das enzimas SOD e POD, conteúdo de H₂O₂ e peroxidação lipídica	63
5.2.4 Características morfológicas.....	65
5.2.5 Teores Minerais	66
5.2.6 Análise estatística	66
5.3 RESULTADOS	66
5.4 DISCUSSÃO.....	74
5.5 CONCLUSÃO	78
6. REFERÊNCIAS	79
7. CONSIDERAÇÕES FINAIS	84
8. REFERÊNCIAS	86
9. ANEXOS.....	92

1. INTRODUÇÃO GERAL

O zinco (Zn) é um componente de mais de 300 enzimas, sendo um micronutriente essencial requerido normalmente em pequenas quantias pelas plantas (GUPTA et al., 2011). Ele é necessário em vários processos fisiológicos tais como a respiração, fotossíntese e biossíntese de hormônios vegetais (STURIKOVA et al., 2018). Entretanto, quando sua concentração na planta ultrapassa os níveis considerados ótimos, são observados sintomas de toxicidade, caracterizados por diminuição no crescimento, inibição do desenvolvimento do sistema radicular, clorose, desequilíbrio nutricional e inibição da fotossíntese (LIN e AARTS, 2012; MARQUES e NASCIMENTO, 2014).

No solo, os teores naturais de Zn normalmente são variáveis e dependentes do material de origem (HUGEN et al., 2013). Por exemplo, em rochas magmáticas os teores de zinco podem variar de 40 a 120 mg kg⁻¹, nas sedimentares de 80 a 120 mg kg⁻¹, em arenitos de 15 a 30 mg kg⁻¹ e em materiais calcários ou dolomíticos de 10 a 25 mg kg⁻¹ (KABATA-PENDIAS e PENDIAS, 2011). Estes teores podem ser encontrados basicamente em cinco formas no solo: solúvel em água, trocável, adsorvido, quelado e formando complexos de Zn (NOULAS et al., 2018).

Diferentes tipos de solos podem gerenciar condições distintas de disponibilidade de Zn para as plantas, pois características tais como teor de argila, matéria orgânica e pH influenciam na disponibilidade (NOULAS et al., 2018). Solos com maiores teores de argila, matéria orgânica e pH mais alcalino tendem a ter maior adsorção de Zn e proporcionar menor disponibilidade do mesmo. Em contrapartida, solos com menor teor de argila, de matéria orgânica e pH mais ácido tendem a gerarem maior disponibilidade Zn na fração disponível (KARIMI et al., 2019). Pensando nisso, muitas recomendações de adubação, tal qual a de fósforo se baseiam em características de solo para definir as doses a serem aplicadas. Contudo, micronutrientes, como o Zn, não possuem ainda este nível de conhecimento e em alguns casos a utilização da adubação com este micronutriente pode expor as plantas

a níveis tóxicos dependendo da dose e do tipo de solo no qual é aplicado (SUGANYA et al., 2020).

O tomate é uma das hortaliças de maior importância no Brasil, tanto no aspecto econômico, quanto no social, pois é responsável pela geração de renda para muitas famílias. Esta cultura tem exigências em adubação elevadas, porém sua capacidade de absorção é baixa, sendo que para o fósforo, por exemplo, a taxa de absorção é de apenas 10% (NOVAIS e SMYTH, 1999). A deficiência de Zn raramente é observada em lavouras comerciais. Em casos de deficiência, recomenda-se a aplicação via foliar de sulfato de zinco, 200 g para 100 L de água ou zinco quelatizado, sendo 300 ml para 100 L de água (EMBRAPA, 2016).

Nos últimos anos na busca por alternativas de enriquecimento dos alimentos surgiu o conceito de biofortificação, que foi criado na década de 1990 por Howarth Bouis (CAKMAN e KUTMAN, 2018). Esta técnica se baseia no enriquecimento dos alimentos com determinados nutrientes realizada a campo durante seu processo produtivo, podendo ser desenvolvida basicamente de duas maneiras: (I) pelo melhoramento genético das culturas, conhecida como biofortificação genética ou (II) pelo manejo da cultura, atuando basicamente no manejo da adubação, conhecido como biofortificação agrônômica (VERGÜTZ et al., 2016). Neste cenário, o Zn é um dos micronutrientes que tem apresentado relevância entre as pesquisas desenvolvidas com o foco de combater a deficiência na nutrição mineral em determinados grupos de pessoas é o zinco.

Para atingir os objetivos da biofortificação dos frutos de tomate, doses mais elevadas que aquelas necessárias apenas para a manutenção dos processos biológicos da planta serão necessárias. Neste sentido, em função do baixo volume de pesquisa com este elemento e esta cultura, em muitos casos podem ser adicionadas ao solo quantias elevadas de Zn, expondo as plantas a níveis críticos tóxicos. O conceito de nível crítico tóxico (NCT) está relacionado com o teor de determinado nutriente na qual ocorre uma redução na produção com base no nível máximo de produtividade (FAGERIA et al., 1997). Em geral, o NCT do elemento pode ser correlacionado com parâmetros relacionados à produção da cultura, tais como: fotossíntese, taxa de crescimento e produção de massa seca (MALAVOLTA et al., 1997). O nível de toxicidade é atingido quando estes parâmetros se apresentam reduzidos entre 80 a 95% da produção ótima. Ao atingir a toxicidade, a concentração do nutriente já é superior à suficiência, atingindo o nível crítico fisiológico,

ultrapassando toda a faixa de consumo de luxo, e acarretando efeitos negativos no rendimento das culturas (BHATT, HOSSAIN e SHARMA, 2020).

Plantas quando expostas a teores muito elevados de Zn desencadeiam diversos mecanismos de defesa para combater os efeitos fitotóxicos. Dentre estes mecanismos de defesa temos o enzimático, que envolvem a ativação e aumento da atividade de algumas enzimas, entre elas a superóxido dismutase (SOD) e a peroxidase (POD) (ALI et al., 2019). Estas enzimas buscam converter e neutralizar agentes oxidantes tais como o peróxido de hidrogênio (H_2O_2) em formas menos tóxicas ao metabolismo e assim diminuir seus efeitos deletérios (WEI et al., 2022). Porém, em alguns casos, a exposição ao elemento pode gerar uma explosão oxidativa nas plantas em níveis extremamente elevados e isto afeta o aparato enzimático, que não consegue se manter. Neste caso, a exposição é identificada pela diminuição da atividade das enzimas, fazendo com que o efeito da presença do elemento em excesso seja letal para as plantas em função dos danos oxidativos (KUNDU et al., 2018).

A possibilidade do aumento da demanda de utilização de adubação com Zn para a cultura do tomate com objetivo de biofortificação gera a demanda por conhecimento de como esta planta se comporta quando exposta á alta disponibilidade desse micronutriente. Além de conhecer o comportamento da planta, é importante conhecer a influência do tipo de solo sobre a capacidade de disponibilizar Zn para as plantas sem expor as mesmas a teores tóxicos. Assim, este estudo teve como objetivo principal identificar a dose de nível crítico tóxico de Zn para plantas de tomate cultivadas em um Cambissolo Húmico e um Nitossolo Bruno.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo geral

Determinar a dose aplicada ao solo para atingir o nível crítico tóxico de Zn para as plantas de tomate cultivadas em um Nitossolo Bruno e um Cambissolo Húmico.

1.1.2 Objetivos específicos

- Observar o comportamento de parâmetros de crescimento e desenvolvimento de plantas de tomate cultivadas em um Nitossolo Bruno e um Cambissolo Húmico sob alta disponibilidade de Zn.
- Identificar a influência do excesso de Zn em parâmetros de trocas gasosas tais como taxa fotossintética líquida, concentração interna de CO₂, condutância estomática e transpiração.
- Avaliar a influência da presença de Zn em níveis tóxicos em parâmetros de crescimento de raiz tais como comprimento, diâmetro, volume e área superficial.
- Avaliar o efeito do Zn em teores tidos como adequados e excessivo sobre a atividade das enzimas superóxido dismutase e peroxidase, assim como na geração de peróxido de hidrogênio e melanoaldeído.
- Identificar a ação do Zn como um agente antagonista na absorção de nutrientes essenciais às plantas.

1.2 HIPÓTESES

As diferentes características dos solos, por ex. teor de argila, teor de matéria orgânica e valor de pH, afetam as respostas das plantas cultivadas ao aumento da disponibilidade de Zn nos solos Nitossolo Bruno e o Cambissolo Húmico e isto irá conduzir a diferentes níveis crítico tóxico.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 O ZINCO

O zinco é um metal de cor branco-azulada, forma cristalina hexagonal compacta, número atômico 30 e sua massa atômica relativa é de 65,38 u. Na natureza ocorre predominantemente na forma de cátion divalente (SANDSTEAD e AU, 2007).

O zinco é um co-fator para mais de 200 enzimas biologicamente importantes do organismo humano, que controlam muitos processos celulares como síntese de DNA, crescimento, desenvolvimento cerebral, resposta comportamental e reprodução. Já os principais efeitos adversos da exposição oral excessiva ao zinco incluem náuseas, vômitos, dor abdominal e ocasionalmente pancreatite.

O zinco desempenha papel metabólico essencial em plantas, sendo componente ativo de grande variedade de enzimas, como as desidrogenases, proteinases, peptidases e fosfohidrogenases. Tem funções no metabolismo de carboidratos, proteínas, formação de RNA e ribossomos, permeabilidade das membranas e estabilização de componentes celulares, além do estímulo a resistência ao clima seco e quente, e a doenças bacterianas e fúngicas (KABATA-PENDIAS e MUKHERJEE, 2007).

A fitotoxicidade de Zn é relatada especialmente em solos ácidos. Além disso, ela depende da espécie, genótipo e estágio de crescimento das plantas. A concentração de Zn nas partes da planta segue o padrão: raízes > folhas > ramo > tronco. As raízes laterais pequenas retêm mais Zn do que outros componentes da vegetação (KABATA-PENDIAS e MUKHERJEE, 2007).

2.1.1 O zinco no solo

Os teores de Zn nos solos sem contaminação e sem intervenção antrópica (solos naturais) estão relacionados com o material de origem e a composição da rocha matriz, sendo também influenciado pelos processos de intemperismos, responsáveis pela formação do solo (HUGEN et al., 2013). Nas rochas magmáticas os teores de zinco podem variar de 40 a 120 mg kg⁻¹, nas sedimentares de 80 a 120 mg kg⁻¹, em

arenitos de 15 a 30 mg kg⁻¹ e em materiais calcários ou dolomíticos de 10 a 25 mg kg⁻¹ (KABATA-PENDIAS e PENDIAS, 2011).

No Brasil os teores médios encontrados por Fadigas et al. (2006) são de 24 mg kg⁻¹, após a avaliação de 256 amostras provenientes de diversos estados brasileiros. Em nível regional, para o estado de Santa Catarina, Hugen et al. (2013), observaram o valor médio de 39 mg kg⁻¹ de Zn após a análise de 111 amostras distribuídas pelo estado. O teor mais elevado no estado de SC em relação à média nacional pode se dar pela predominância de basalto como material de origem de algumas regiões, o qual é naturalmente mais rico em elementos-traço. Contudo, cabe ressaltar que essa extrapolação de valores deve ser cuidadosa, pois os teores naturais são muito variáveis de acordo com o material de origem, sendo esta observação validada pelo comportamento dos grupos de solos criados por Hugen et al. (2013), os quais variam de teores baixos em sedimentos arenosos (8,7 mg kg⁻¹) até teores relativamente elevados em olivinas mililitito (89,1 mg kg⁻¹ de Zn). Neste contexto, a afirmação de Biondi et al. (2011), de que são necessários estudos regionalizados para a determinação dos teores naturais de elementos-traço é muito válida. Para comparação, na União Europeia, estima-se que a maioria dos solos sejam aptos a produção agrícola, porém cerca de 6,24% necessitem de maiores avaliações a nível local para que seja garantida a segurança alimentar da produção (TÓTH et al., 2016).

O zinco no solo é encontrado basicamente em cinco formas, sendo elas (NOULAS et al., 2018): (i) solúvel em água; (ii) trocável; (iii) adsorvido; (iv) quelado e (v) formando complexos de Zn. Cada uma dessas formas difere entre si pela força da interação e desta forma influencia a disponibilidade e a capacidade de absorção pelas plantas ou lixiviação. Este equilíbrio entre as formas de Zn adsorvido e o Zn em solução é controlado principalmente pelo pH, concentração de Zn e outros metais, especialmente ferro e o manganês. O pH assume papel fundamental no gerenciamento da disponibilidade de Zn na solução do solo, pois o Zn se liga basicamente por meio de ligações específicas (complexos de superfície de esfera interna) aos minerais do solo, e este tipo de ligação é muito estável, porém, fortemente influenciado por alterações no pH. Portanto, solos com pH elevado tendem a apresentar maior deficiência de Zn por facilitar o processo de adsorção e em contraponto, solos com maior acidez tendem a ter maior disponibilidade de Zn e outros

micronutrientes tais como Ferro (Fe), Cobre (Cu), Boro (B) e Manganês (Mn) (ERNANI, 2008).

A forma mais comum do Zn é a iônica (Zn^{2+}) e por ser fortemente retido pelas argilas e pela matéria orgânica, torna-se praticamente imóvel no solo, porém, comparativamente, apresenta maior mobilidade que o Cu. Solos com teores de Zn abaixo de 5 a 20 mg kg⁻¹ são considerados deficientes, enquanto aqueles com teores totais entre 25 a 150 mg kg⁻¹ apresentam o metal em quantidades ideais a nutrição das plantas. Quando a concentração atinge patamares maiores que 400 mg kg⁻¹, passa a ser tóxico para a maioria das plantas (KABATA-PENDIAS, 2011). Contudo, estes valores podem ser muito variáveis dependendo ainda da textura do solo, teor de matéria orgânica e pH, oscilando ainda para diferentes culturas.

Falar em teores totais de Zn no solo não é uma boa forma de mensurar a capacidade real deste solo em fornecer Zn para a planta, pois uma grande parte do total presente no solo não está disponível para a absorção. Shing et al. (2005) relataram graves problemas de deficiência de Zn em cultivos na Índia, país este que tem forte presença de solos calcários. Os autores abordam o fato de os teores totais serem adequados para o cultivo de plantas, porém a disponibilidade é extremamente baixa, devido ao caráter alcalino destes solos, o que resulta em graves problemas de deficiência de Zn nos grãos dos cultivos destas regiões.

Além da baixa disponibilidade de Zn comumente observada nos solos, resultante de baixas concentrações naturais ou pH elevado, ainda podem existir outros tipos de interação que diminuem a disponibilidade de Zn na solução. A deficiência de Zn induzida por fosfatos tem relatos de longa data na literatura (BURLESON, DACUS e GERARD, 1961; LO e REISENAUER, 1968) e é associada, segundo Olsen (1972) a cinco fatores:

- 1) combinação do zinco com o H_2PO_4 , diminuindo a sua disponibilidade;
- 2) redução da disponibilidade do zinco por combinação com o cátion acompanhante do fosfato;
- 3) precipitação do fosfato de zinco na superfície das raízes;
- 4) redução na translocação do zinco das raízes para a parte aérea por causa do alto nível de fosfato nos tecidos condutores;
- 5) diminuição no teor de zinco da parte aérea por um efeito diluição, isto é, devido ao maior crescimento por efeito da adubação fosfatada.

Porém, ainda são controvérsias as hipóteses das reais causas das deficiências, sendo que alguns autores apontam que o antagonismo dos nutrientes se dá na solução do solo pela formação de precipitados de $Zn_3(PO_4)_2$, porém parece ser pouco consistente esta alternativa pelo fato da alta solubilidade deste composto (LINDSAY, 1972). Outros autores apontam que este efeito de interação Zn-P no solo não parece ser relevante, sendo que o efeito de interação, quando existente, provavelmente ocorra nas raízes (MALAVOLTA et al., 1997) e não na solução do solo, diminuindo assim a translocação e o acúmulo de zinco nos tecidos da parte aérea. Nas raízes, a principal causa seria a precipitação do Zn e a forte interação do Zn com as cargas negativas das raízes. Este efeito de interação ganha maior força em solos tropicais onde é comum a utilização de altas doses de fósforo em solos que naturalmente possuem baixos teores de zinco e fósforo (CARNEIRO et al., 2008).

O nitrogênio (N) é outro elemento que afeta o status de zinco nas plantas e no solo. O crescimento das plantas proporcionado pela presença do N e alterações no pH do ambiente radicular parecem ser fatores importantes no comportamento do Zn. O maior crescimento das plantas parece causar um efeito de diluição do Zn nos tecidos, e este efeito é potencializado em casos de alta oferta de N e baixa de Zn. Podem ainda ocorrer problemas de acidificação do meio, dependendo da fonte de N utilizada, como por exemplo, o sulfato de amônio que pode causar a acidificação do solo e aumentar a disponibilidade de Zn na solução do solo, em contraponto o nitrato de cálcio pode causar elevação do pH e diminuir a disponibilidade de Zn na solução do solo (ALLOWAY, 2008).

O zinco insolúvel e adsorvido compreende mais de 90% do conteúdo total presente no solo, sendo que este não está disponível para ser absorvido pelas plantas. O trocável normalmente varia de 0,1 a 2 $\mu g g^{-1}$ de Zn e o Zn na solução é apresentado em valores baixos, tipicamente entre 4×10^{-10} a 4×10^{-6} (BROADLEY et al., 2006). Adubação com Zn normalmente deixa um efeito residual entre 3 a 5 anos devido a sua forte interação com os colóides do solo (KABTA-PENDIAS, 2011).

2.1.2 O zinco nas plantas

Nas plantas, o zinco desempenha papel fundamental como co-fator constituinte ou regulador de um amplo número de enzimas e proteínas, sendo este importante em diversas vias bioquímicas. Algumas destas vias são (STURIKOVA et

al., 2018): (i) metabolismo de carboidratos, podendo ser na fotossíntese e na conversão de açúcares em amido, (ii) metabolismo de proteínas, (iii) metabolismo de auxina, (iv) formação do pólen, (v) manutenção da integridade de membranas e (vi) resistência a patógenos.

Quando o fornecimento de Zn para a planta se torna inadequado uma ou mais de suas funções biológicas é incapaz de operar normalmente, podendo afetar o crescimento e o rendimento da planta. De maneira geral, os sintomas de deficiência de Zn nas plantas podem ser: nanismo, clorose internerval (amarelecimento das folhas entre as nervuras), bronzeamento de folhas cloróticas e folhas pequenas ou anormais. Contudo, os sintomas podem variar de espécie para espécie e aparecem em plantas que sofrem severas restrições do elemento (BROADLEY, 2006). Em algumas situações são relatados casos de deficiência “subclínica” ou “oculta”, que são aqueles casos em que existe a deficiência do elemento, porém os sintomas não são visíveis, e se expressam apenas em redução do rendimento da cultura, podendo gerar perdas entre 20 – 40%.

Tem sido assumido que o Zn é transportado nas plantas como Zn^{2+} ou ligado a ácidos orgânicos, podendo ser absorvido como um cátion monovalente ($ZnOH^+$) em solos com pH elevado. Ele acumula-se nas raízes, sendo translocado via xilema para a parte aérea, sendo que o movimento na raiz pode se dar tanto por apoplasto como por simplasto (NOULAS et al., 2018). Já na parte aérea ele é transportado de forma restrita das folhas velhas para as folhas novas e órgãos em desenvolvimento. Segundo Kabata-Pendias (2011) há discordâncias em relação à captação do Zn, se é um processo ativo ou passivo. O autor aponta que o processo seja majoritariamente controlado por processos metabólicos, podendo, no entanto, sofrer ação de processos não metabólicos na captação.

O zinco é um micronutriente requerido pelas plantas em pequenas, mas críticas concentrações, sendo, portanto, fundamental a manutenção de teores adequados para o desenvolvimento das plantas. Os teores adequados de Zn na matéria seca das plantas podem ser bastante variáveis de cultura para cultura, sendo relatado que para o desenvolvimento adequado, concentrações entre 15 a 20 mg kg⁻¹ de Zn na matéria seca seriam satisfatórias (MARSCHNER, 1995).

Para o tomate são observados valores entre 17 a 26 mg kg⁻¹ em frutos, enquanto em alface já são observados valores bem maiores, na faixa de 44 a 73 mg

kg⁻¹ (KABATA-PENDIAS, 2011). Uma classificação de estado nutricional de plantas foi proposta por (SINGH et al., 2005), sendo ela definida como:

- Menos de 10 mg kg⁻¹ de zinco: deficiência
- Entre 10 e 20 mg kg⁻¹ de zinco: provável deficiência
- Acima de 20 mg kg⁻¹ de zinco: suficiência

Porém, os teores encontrados em plantas que estão expostas a condições adequadas de nutrição por Zn são maiores, podendo variar de 30 a 100 mg kg⁻¹ de Zn na matéria seca (MARSCHNER, 1995). Contudo, dependendo da espécie de planta, entre 58 e 91% do Zn na planta pode estar em formas solúveis em água, sendo esta fração considerada aquela com maior atividade fisiológica. Assim, o teor total de Zn nas plantas não seria um bom indicador do status do micronutriente na planta (BROWN, CAKMAK E ZHANG, 1993), haja vista que boa parte deste nutriente pode estar imobilizado e sem função fisiológica. Em alface, por exemplo, foi observado que o zinco solúvel estaria possivelmente associado aos aminoácidos, açúcares e compostos que contenham enxofre, e a soma destas frações corresponderia a 58 % do total nas folhas e 62-70 % nas sementes. No tomate estes valores nas folhas representaram apenas 5,8% do total de zinco observado nos tecidos (BROWN, CAKMAK E ZHANG, 1993).

Níveis superiores a 300 mg kg⁻¹ de Zn na matéria seca em muitos casos causam efeito inverso a nutrição, sendo, portanto, tóxico para as plantas. Plantas consideradas sensíveis sofrem restrições graves no crescimento e rendimento quando expostas a concentrações entre 150 a 200 mg kg⁻¹ de Zn na matéria seca (KABATA-PENDIAS, 2011)

A distribuição de Zn na planta normalmente segue um padrão, sendo distribuído preferencialmente seguindo a ordem raízes > folhas > ramos > tronco e as raízes finas são aquelas que apresentam as maiores concentrações de Zn. Alguns relatos apontam que o Zn está concentrado em cloroplastos, sendo provável que o metal também esteja acumulado em fluidos dos vacúolos e nas membranas celulares. Aquelas frações que estão ligadas a compostos orgânicos leves em fluidos do xilema podem ter alta mobilidade na planta, porém a porção ligada aos complexos de cargas negativas é bem alta, correspondendo a mais da metade do total presente nas plantas (PEGANOVA e EDER, 2004). Portanto, de maneira geral, o zinco é considerado um nutriente pouco móvel nas plantas, principalmente em condições de baixa oferta do

nutriente, sendo que seus sintomas aparecem normalmente nos órgãos mais jovens (FAQUIN, 2005).

2.1.3 O zinco na saúde humana

A deficiência de micronutrientes vem ganhando importância nos últimos anos em razão de aproximadamente um terço da população mundial apresentar deficiências de vitaminas, especialmente A e C, e minerais, tais como Zn, Fe e I (OLIVEIRA et al., 2018).

Estima-se que o zinco é um mineral que esteja envolvido na atividade de mais de 2700 enzimas, estando estas enzimas envolvidas no metabolismo de carboidratos, proteínas e lipídios. Também se acredita que algumas destas enzimas participem da síntese e degradação de ácidos nucleicos (ANDREINI e BERTINI, 2012). O zinco também atua em funções catalíticas, estruturais e regulatórias, desempenhando importante papel na resposta imunológica e no estresse oxidativo (CHASAPIS et al., 2012).

Os principais fatores responsáveis pela deficiência de zinco em países subdesenvolvidos são a ingestão inadequada deste micronutriente, desnutrição energética proteica, doenças gastrointestinais, dieta predominantemente a base de plantas e a necessidade aumentada de zinco nas fases da infância, gravidez e adolescência. Enquanto nos países desenvolvidos a deficiência é pouco comum, mas pode ocorrer em consequência do consumo inadequado de zinco ou doenças gastrointestinais que cursem com má absorção ou perdas excessivas deste micronutriente (SCRIMSHAW, 2003; HESS et al., 2009).

Os sintomas de deficiência de zinco incluem: retardo no crescimento, maturação sexual retardada, hipogonadismo e hipospermia, alopecia, cicatrização de ferimentos demorada, lesões cutâneas, apetite prejudicado, deficiências imunológicas, distúrbios de comportamento, lesões oculares, incluindo fotofobia e paladar prejudicado (GALLAGHER, 2010).

Segundo Oliveira et al. (2018) a biofortificação agrônômica pode ser uma estratégia eficiente para promover o enriquecimento de culturas alimentares em países com alta incidência de deficiência de zinco. Contudo, a biodisponibilidade que corresponde à fração de um nutriente que foi digerido e absorvido e está disponível

para as funções metabólicas do organismo é fundamental para eficácia desta estratégia. A mesma pode ser influenciada por diversos fatores, incluindo a concentração e a forma química, e a presença de inibidores ou promotores de absorção (SILVA, 2016). As principais fontes alimentares de zinco incluem: carnes, peixes, aves, fígado, ostras e outros mexilhões, cereais de grãos integrais, feijões e derivados de soja (GALLAGHER, 2010).

Vários fatores dietéticos afetam a absorção de zinco, tais como a presença de fitatos, cálcio e a elevada ingestão de ferro (GALLAGHER, 2010). Enquanto a absorção pode ser melhorada pela ligação do mineral com compostos que formam complexos tornando-os mais solúveis (TORRES, 2018), e pela ingestão de proteínas e vitamina A. A possível hipótese pelo qual o β -caroteno promoveria o aumento da absorção de zinco, deve-se ao possível fato de que o carotenoide forma um complexo intestinal com o zinco, mantendo-o mais solúvel (GAUTAM et al., 2010).

As Dietary Reference Intakes (DRI) (PADOVANI et al., 2006) constituem-se na mais recente revisão dos valores de recomendação de nutrientes, estratificados por faixa etária e sexo. Segundo a DRI, para lactentes de 0 a 6 meses recomenda-se a ingestão de 2 mg dia⁻¹, entre 7 e 12 meses é de 3 mg dia⁻¹, para meninos e meninas de 1 a 3 anos de idade recomenda-se a ingestão de 3 mg dia⁻¹. Para idades entre 4 a 8 anos a recomendação é de 5 mg dia⁻¹ e para idades entre 9 a 13 anos é de 8 mg dia⁻¹. Homens com idade acima de 14 anos a recomendação é de 11 mg dia⁻¹, enquanto para mulheres de 14 a 18 anos é de 9 mg dia⁻¹, reduzindo para 8 mg dia⁻¹ após 19 anos de idade (PADOVANI et al., 2006). A ingestão oral de quantidades tóxicas de zinco é rara, mas a Tolerable Upper Intake Level (UL) que corresponde ao valor mais alto de ingestão diária é de 40 mg dia⁻¹ para indivíduos adultos (GALLAGHER, 2010).

2.2 A CULTURA DO TOMATE

O tomate (*Lycopersicon esculentum*) é uma espécie distribuída pela maioria dos continentes e cultivada em muitos países. Acredita-se que o tomateiro seja originário das regiões andinas do Peru, Bolívia e Equador (EMBRAPA, 1993) locais estes com temperaturas amenas e baixo volume de precipitação. Com a chegada dos Espanhóis na América, o tomate já foi encontrado no México e em algumas regiões

da América Central e do Sul, sendo então levado para a Europa, e tendo seu consumo difundido no Século XIX (EMBRAPA, 1993).

A cultura do tomate no Brasil é a mais importante dentre as hortaliças, tanto no âmbito econômico, quanto no social, pelo seu grande volume de produção e geração de empregos. De acordo com a Associação Brasileira do Comércio de Sementes e Mudas de Hortaliças (ABCSEM, 2016), a produção de tomate fresco movimentada atualmente no País quase R\$ 10 bilhões no varejo e gera uma massa salarial de mais de R\$ 400 milhões no campo.

A nível mundial, China, Índia e Estados Unidos, são os maiores produtores, respectivamente. O Brasil é o nono maior produtor mundial, com uma área plantada próxima dos 64,3 mil hectares. A produção atingiu nos últimos anos valores em torno de 4,3 milhões de toneladas, o que significa uma média de 68,7 t ha⁻¹ (FAO, 2021), ou seja, o dobro da média da produtividade mundial. Embora cultivado em todos os estados em maior ou menor escala, os estados com maiores áreas plantadas são Mato Grosso, Paraná, Rio Grande do Sul, São Paulo e Minas Gerais (SIDRA, 2018). Santa Catarina ocupa a sétima posição no ranking de produção da cultura, sendo a principal safra de produção, tanto para SC, como para o restante do país, a safra de verão. Na safra 2017/2018 a área plantada no estado foi de aproximadamente 2440 hectares, com uma produção de 163.330 toneladas, resultando em uma produtividade média de 66,9 t ha⁻¹ (EPAGRI, 2019).

Do volume total produzido, 70% são destinados ao mercado para consumo in natura e os restantes são matéria prima para industrialização, com os quais são elaborados diversos produtos, tais como extratos, pastas, molhos, sucos e outros derivados. É necessário ressaltar que as cultivares de tomate para mercado são diferentes daquelas para industrialização, tanto no que se refere à planta quanto ao fruto e ao sistema de cultivo.

Plantas de tomate se desenvolvem, florescem e frutificam nas mais variáveis condições climáticas, sendo que no Brasil é possível que sejam cultivadas duas safras por ano em algumas regiões. Com base no seu centro de origem, temperaturas entre 20 a 25 °C favorecem a germinação e entre 18 a 25 °C ajudam no desenvolvimento vegetativo enquanto temperaturas superiores a 32 °C tendem a proporcionar queda das folhas e inibir o desenvolvimento dos frutos. Chuvas e alta umidade relativa do ar também não são adequadas para o desenvolvimento da cultura pelo fato de

favorecerem a incidência de pragas e doenças (EMBRAPA, 1993). O clima fresco e seco e a alta luminosidade favorecem o desenvolvimento da cultura do tomate.

A temperatura noturna deve ser sempre menor que a diurna, pelo menos seis graus. Temperaturas acima de 35°C diurnas e noturnas prejudicam a frutificação, com queda acentuada de flores e frutos novos. Temperaturas muito baixas também prejudicam a planta, reduzindo seu crescimento. O excesso de chuva é outro fator do clima que tem efeito negativo na cultura, pois favorece a proliferação de fungos e bactérias que reduzem a parte aérea e, por consequência, diminuem a produção. De modo geral, em regiões com altitudes superiores a 800 metros, o plantio deve ser realizado de agosto a fevereiro. Já em localidades de altitudes baixas e quentes, ou seja, em altitudes inferiores a 400 metros, a época favorável ao cultivo do tomate é de fevereiro a julho. O uso de estufas possibilita o cultivo do tomate fora de época, viabilizando o plantio durante todo o ano em regiões altas. O plástico usado na cobertura permite modificar o ambiente, de forma a torná-lo mais favorável para as plantas, protegendo contra as chuvas excessivas e o grande número de organismos que causam problemas fitossanitários. Por causa dessas vantagens, as estufas têm sido cada vez mais usadas, mas o manejo orgânico da cultura dentro da estufa requer experiência do produtor no cultivo fora da estufa.

2.2.1 Adubação da cultura do tomate

O tomateiro é uma espécie exigente em adubação, sendo que a absorção de nutriente pelas plantas é relativamente baixa até o aparecimento das primeiras folhas. Com o surgimento das folhas ocorre um aumento da absorção até atingir o máximo que se dá na fase de pegamento e crescimento dos frutos (EMBRAPA, 2006). Sabe-se que apesar da alta demanda nutricional da planta a extração de nutrientes é baixa, e este fato ocorre pela baixa eficiência da planta em absorver os nutrientes (NOVAIS e SMYTH, 1999). Em média, em cada tonelada de frutos colhidos, são encontrados: 3 kg de nitrogênio; 0,5 kg de fósforo; 5 kg de potássio; 0,8 kg de cálcio; 0,2 kg de magnésio e 0,7 kg de enxofre. Em relação aos micronutrientes, as quantidades são: 5 g de boro; 25 g de zinco; 10 g de cobre; 25 g de manganês e 25 g de ferro (EMBRAPA, 2006).

Para os macronutrientes as recomendações segundo EPAGRI (2016) seguem as seguintes proporções: nitrogênio: 10% do total na base e o restante em cobertura conforme curva de adubação adaptada de Alvarenga (2004), em que semanalmente são aplicadas doses. Para o fósforo a recomendação é de que se os teores forem muito baixo ou baixo, a aplicação da dose deve ser parcelada em duas etapas, sendo metade a lançar no plantio da cultura de cobertura antecessora (aveia, p.ex.) e o restante no plantio em sulco. Para o potássio recomenda-se a aplicação de 5% na base e o restante em cobertura seguindo a mesma tabela do N. Ainda na base recomenda-se aplicar 3 - 5 kg ha⁻¹ de boro (EPAGRI, 2016).

A adição de micronutrientes, tal como o Zn, não é fato comum nas lavouras de tomate, tendo em vista que para parâmetros de produção, sem o fim de biofortificação na grande maioria dos casos, os teores encontrados nos solos já satisfazem a demanda da planta. Porém, a deficiência de Zn pode ser observada em alguns casos onde são realizadas adubações pesadas com fósforo ou solos com altos teores de matéria orgânica, além de outras situações já mencionadas anteriormente. Como prática de correção desta deficiência é recomendada a aplicação via foliar de sulfato de zinco, 200 g para 100 L de água ou zinco quelatizado, sendo 300 ml para 100 L de água (EMBRAPA, 2016).

2.3 CAMBISSOLOS E NITOSSOLOS

O Brasil possui uma ampla diversidade de solos em todo seu território, oriunda de diversos fatores pedoambientais e de formação dos solos. Ao todo são descritas treze classes de solo contidas no sistema brasileiro de classificação de solos (SiBCS, 2018). Estas condições variáveis do processo de formação de solo são expressas através desta grande variabilidade de solos com características químicas, físicas, biológicas e morfológicas distintas.

Dentro das diversas classes de solos temos os Cambissolos e os Nitossolos, que juntos representam cerca de 4 % dos solos do território brasileiro (Santos et al., 2011). Os Cambissolos são caracterizados por serem solos pouco espessos e que apresentam horizonte B ainda em formação (Anexo V). Por serem solos pouco profundos podem restringir o desenvolvimento de raízes de espécies arbóreas. A maioria dos Cambissolos apresentam baixa fertilidade natural, o que pode demandar

o uso de altas quantias de fertilizantes. Contudo, em alguns casos são observados Cambissolos com alta fertilidade natural (Santos et al., 2011). Os Cambissolos Húmicos, por sua vez, são caracterizados pela presença do horizonte superficial húmico (horizonte A húmico), que tem como principal característica a cor escura, mais rica em matéria orgânica, e normalmente associados aos climas frios ou clima subtropical do sul do Brasil. Possuem naturalmente baixos teores de Ca, Mg, K e pH mais ácido, com altos níveis de alumínio trocável, características resultantes do processo de formação (ALMEIDA, 2009).

Os Nitossolos são solos constituídos de material mineral, com 350 g kg⁻¹ ou mais de argila, inclusive no horizonte A, que apresentam horizonte B nítico abaixo do horizonte A. O horizonte B nítico apresenta argila de atividade baixa ou caráter alítico na maior parte do horizonte B dentro de 150 cm da superfície do solo. Eles podem apresentar fertilidade variada em função do processo de formação, acidez ligeiramente elevada e teores variáveis de alumínio (SiBCS, 2018). Em regiões mais planas e com presença de Nitossolos de alta fertilidade, estes podem apresentar alto potencial para uso agrícola. São solos homogêneos, com pequena diferenciação de cor em profundidade e com estrutura que favorece retenção de água em períodos de sazonalidade climática (Santos et al., 2011). Os Nitossolos Brunos (Anexo V), uma classificação a segundo nível categórico, são descritos pelo Sistema Brasileiro de Classificação de solos como (SiBCS, 2018):

...solo com caráter retrátil e horizonte A húmico ou conteúdo de carbono orgânico superior a 10 g kg⁻¹ até 40 cm de profundidade, apresentando, na parte superior do horizonte B (inclusive BA), coloração brunada predominantemente no matiz 7,5YR ou mais amarelo, em concomitância com valor ≤ 4 e croma ≤ 6 quando úmidos. Admite-se solos com matiz 5YR no horizonte B (inclusive BA), desde que o valor seja ≤ 4 e croma < 6 quando úmidos.

2.4 A BIOFORTIFICAÇÃO DE ALIMENTOS COM ZN

A biofortificação de alimento com Zn é algo recente no contexto da agricultura mundial, sendo que ainda são poucas as culturas estudadas e muitas são as dúvidas sobre esta técnica e seus reais efeitos. Porém, a preocupação com este elemento na nutrição de plantas e na saúde humana já ganha destaque há algum tempo. Desde a descoberta do Zn como um micronutriente essencial às plantas (SOMMER e LIPMAN, 1926) a fertilização com este nutriente através de adubação no solo ou

aplicações foliares se tornou algo mais comum, principalmente naqueles solos onde a deficiência de Zn limita a produção. O objetivo inicial das correções de Zn eram basicamente prevenir e corrigir as deficiências, sendo que pouca ou nenhuma atenção era dada para a questão da nutrição humana (CAKMAK e KUTMAN, 2018). Na década de 90 Cakmak et al. (1999) começaram a levantar a problemática da deficiência de Zn, requerendo atenção para a nutrição de plantas e humanos. Finalmente, com o início do programa internacional HarvestPlus e seu subprojeto HarvestZinc houve um aumento no interesse para aumentar as concentrações de Zn nas partes comestíveis das plantas utilizadas na alimentação humana a nível global.

As primeiras culturas a receberem destaque neste processo de enriquecimento nutricional com Zn foram àquelas consideradas base para alimentação das populações mais carentes. Os trabalhos foram focados em trigo, arroz, milho, mandioca e batata, sendo que o trigo foi aquele que apresentou melhor resposta a biofortificação agrônômica com Zn, principalmente quando o manejo da adubação se deu via foliar (ZHOU et al., 2012; PHATTARAKUL et al. 2012).

Alguns estudos moleculares e genéticos têm buscado investigar os processos que envolvem a captação, transporte e os fenômenos de acúmulo do Zn em grãos de cereais. Acredita-se que a descoberta de informações neste sentido irá permitir consideráveis avanços nas estratégias de transgenia e melhoramento. Contudo, alguns estudos já vêm demonstrando resultados contundentes do potencial da transgenia em produzir plantas com maior capacidade de absorção, transporte e consequente acúmulo de Zn (BORG et al., 2012; GOMEZ-GALERA et al., 2012; MASUDA et al., 2013; BORRILL et al., 2014; TRIJATMIKO et al., 2016). Os testes realizados com estas plantas normalmente envolvem condições com alto nível de controle dos parâmetros nutricionais e climáticos, e estes resultados nem sempre são repetidos a nível de campo, com disponibilidade limitada de nutrientes e presença de fatores estressantes, tais como: déficit hídrico, estresse por calor e pressão de doenças.

3. CAPÍTULO I – NÍVEL CRÍTICO TÓXICO DE ZINCO EM TOMATE CULTIVADO EM UM CAMBISSOLO HÚMICO E UM NITOSSOLO BRUNO

RESUMO

Uma ampla gama de estudos busca encontrar teores adequados de zinco (Zn) capazes de serem eficientes na nutrição de plantas, mas, por se tratar de um micronutriente, a faixa entre a essencialidade e a toxicidade pode ser muito estreita. Assim, neste estudo buscamos encontrar o nível crítico tóxico (NCT) de Zn para plantas de tomate. Para tal, doses de Zn (0, 50, 100, 150, 200, 250, 300 e 450 mg kg⁻¹) foram aplicadas em dois solos: Cambissolo Húmico (CH) e Nitossolo Bruno (NB). Os solos foram condicionados em vasos e plantas de tomate foram cultivadas. Nas plantas de tomate foram determinados os parâmetros de trocas gasosas, índice SPAD, acúmulo de Zn nos órgãos das plantas, capacidade de produção de massa seca e parâmetros de raízes. Os teores de Zn disponíveis no solo aumentaram de forma linear com o aumento das doses de Zn. O índice SPAD e a taxa fotossintética líquida diminuíram com o incremento de Zn na solução do solo para ambos os solos. A exposição de plantas de tomate ao intervalo de dose testado causou diminuição da massa seca de parte aérea e raiz, comprimento e volume de raiz em ambos os solos. O NCT de Zn para plantas de tomate cultivadas em Cambissolo Húmico foi atingido na dose aplicada de 48,7 mg kg⁻¹ e para Nitossolo Bruno foi atingido na dose de 122,8 mg kg⁻¹. O tomate demonstrou sensibilidade à presença de Zn em ambos os solos cultivados, ficando evidente a necessidade de ponderar o NCT de Zn para estas plantas em cultivos, principalmente em cultivos com foco em biofortificação agrônômica.

Palavras-chave: Acumulação de zinco. SPAD. Toxicidade. Nutrição de plantas. Biofortificação.

ABSTRACT

A wide range of studies seeks to find adequate levels of zinc (Zn) capable of being efficient in plant nutrition, but, as it is a micronutrient, the link between essentiality and toxicity can be very narrow. Thus, in this study, we sought to find the critical toxic level (CTL) of Zn for tomato plants. For this, Zn doses (0, 50, 100, 150, 200, 250, 300, and 450 mg kg⁻¹) were applied to two soils, Inceptisol and Oxisol. Soils were conditioned in pots where tomato plants were grown. The tomato plants were analysed through gas exchange parameters, SPAD index, Zn accumulation in plant organs, dry mass production capacity, and root parameters were determined. The available Zn contents in the soil increased linearly with increasing Zn doses. The SPAD index and net photosynthetic rate decreased with increasing Zn in the soil solution for both soils. The exposure of tomato plants to the range of the doses tested caused a decrease in shoot and root dry mass, root length, and volume in both soils. The Zn NCT for tomato plants was reached at the dose of 48.7 mg kg⁻¹ and 122.8 mg kg⁻¹ of Zn in Inceptisol and in Oxisol, respectively. Tomatoes showed sensitivity to the presence of Zn in both tested

soils, making evident the need to consider the Zn CLT for this crop, especially when focusing on agronomic biofortification.

Keywords: Zinc accumulation. SPAD. Toxicity. Plant nutrition. Biofortification.

3.1 INTRODUÇÃO

O zinco (Zn) é essencial às plantas para muitos processos bioquímicos e fisiológicos como biossíntese de clorofila, fotossíntese, respiração, regulação hormonal e tolerância ao estresse ambiental (ZENG et al., 2021). Outros processos específicos também necessitam da atuação do Zn, tais como o reparo do complexo do fotossistema II, a regulação da concentração de CO₂ no mesófilo e a produção de auxina (GUPTA et al., 2016). O elemento influencia o crescimento e desenvolvimento de plantas, afeta o rendimento das culturas e a qualidade nutricional dos alimentos (CLEMENS, 2022; STANTON et al., 2022).

Em folhas de plantas, teores entre 30 a 100 mg kg⁻¹ de Zn na massa seca são considerados ótimos, e uma faixa superior, de 100 a 700 mg kg⁻¹, podem demonstrar sintomas de toxicidade nas plantas (WHITE e BROADLEY, 2011). Teores elevados de Zn podem prejudicar o funcionamento celular devido ao deslocamento de outros elementos com carga e raio semelhante, interrompendo vários processos no metabolismo das plantas. Como resultado deste processo, em função do excesso de Zn, as plantas tendem a reduzir o crescimento e ter clorose, resultado da deficiência de Fe²⁺ e Mg²⁺ induzidas por Zn (STURIKOVA, et al., 2018). Ainda, o excesso de Zn pode diminuir o teor de água nas folhas, as taxas de transpiração, a eficiência fotossintética assim como a taxa fotossintética líquida e a condutância estomática (STANTON et al., 2022).

Ao atingir a toxicidade, a concentração do nutriente na planta já é superior à suficiência, atingindo o nível crítico fisiológico, ultrapassando toda a faixa de consumo de luxo, e acarretando em efeitos negativos no rendimento das culturas (KURIHARA et al., 2005). Assim, o nível crítico tóxico é atingido quando parâmetros tais como fotossíntese, taxa de crescimento e principalmente produção de massa seca se apresentam reduzidos entre 5 a 20 % da produção ótima (LIMA et al., 2007). De maneira geral, o nível crítico tóxico de Zn é muito variável entre espécies, podendo ainda ser variável dentro das mesmas espécies a nível de cultivar, e também pode ser variável de acordo com o manejo, tipo de solo e fonte de adubação (GARCÍA-GÓMEZ et al., 2017, 2018). Plantas de tomate quando tratadas com sulfato de zinco (ZnSO₄ 7H₂O) atingiram o nível crítico tóxico (NCT) na dose de 150 mg kg⁻¹ (VIJAYARENGAN

e MAHALAKSHMI, 2013), já quando expostas a nano partículas de Zn, outra fonte utilizada como adubação, os sintomas de toxicidade apareceram apenas em concentrações mais elevadas de 400 – 800 mg kg⁻¹ de ZnO (WANG et al., 2018).

No solo a disponibilidade de Zn para as plantas varia de acordo com sua concentração, contribuição da fração argila, do teor de matéria orgânica e do pH do solo (NOULAS et al., 2018). Em solos com altos teores de argila e de matéria orgânica ele tende a ser pouco disponível devido à forte ligação com estas frações (KABATA-PENDIAS, 2011; HACISALIHOGU, 2020). O cultivo de plantas em solos deficientes em Zn resulta em alimentos empobrecidos neste nutriente, e em muitos casos na deficiência nutricional das populações que consomem tais produtos (CAKMAK e KUTMAN, 2018). Para amenizar este problema a biofortificação agrônômica se propõe através do enriquecimento das partes comestíveis, suprir quantias maiores destes minerais para as populações carentes dos mesmos (GALIC et al., 2021). Contudo, para atingir os objetivos da biofortificação, em muitos casos, doses elevadas de nutrientes podem ser aplicadas, e estes teores podem ser superiores ao necessário para a manutenção dos processos biológicos das plantas. Por isso é importante identificar o nível crítico tóxico do elemento Zn para as plantas, pois a biofortificação objetiva incrementar teores de elementos nos cultivos, mas sem afetar a produtividade (JHA e WARKENTIN, 2020).

O tomate é um dos alimentos mais produzidos no mundo e consumidos por humanos (FAO, 2021) e a nutrição da planta com Zn, assim como a biofortificação de seus frutos com Zn é uma estratégia para melhorar a qualidade deste alimento e possivelmente aumentar a produtividade. No entanto, para estabelecer um programa de biofortificação agrônômica com Zn e a nutrição adequada das plantas com o mesmo, é necessário identificar qual o nível crítico tóxico de Zn para estas plantas de maneira mais específica, entendendo que este valor pode ser variável de acordo com o tipo de solo. Assim, o objetivo principal deste estudo foi determinar o nível crítico tóxico de Zn para plantas de tomate, identificando qual a dose limite de Zn aplicada a um Cambissolo Húmico e um Nitossolo Bruno que proporciona redução na sua produção de massa seca total e atributos correlatos.

3.2 MATERIAL E MÉTODOS

O trabalho foi desenvolvido em casa de vegetação no Departamento de Solos e Recursos Naturais, localizado no Centro de Ciências Agroveterinárias da Universidade do Estado de Santa Catarina (UDESC-CAV).

O delineamento experimental adotado foi um fatorial 8 x 2, sendo oito doses de Zn e dois solos, um Nitossolo Bruno (NB) e um Cambissolo Húmico (CH), com quatro repetições, totalizando 64 unidades experimentais. O NB foi coletado no município de Caçador e o CH no município de Calmon, ambos no estado de Santa Catarina. O local de coleta foi em mata nativa, na camada de 0 a 20 cm de profundidade. Após secos ao ar, os solos foram peneirados em peneira com 4 mm de abertura de malha e determinadas as características químicas e físicas em laboratório de rotina de acordo com Tedesco et al. (1995) (Tabela 1). Para extração de fósforo (P), potássio (K), cobre (Cu) e zinco (Zn) foi utilizado o extrator Mehlich 1 e cálcio (Ca) e magnésio (Mg) extraídos com KCl 1M, todos determinados em espectrometria de absorção atômica (Perkin Elmer AAnalyst), exceto K que foi determinado por fotometria de chama (Digimed DM 62). Os teores de argila foram determinados pelo método do densímetro com dispersão em NaOH e agitação. Já o carbono orgânico (CO) foi determinado por via úmida através do método Walkley Black (NELSON e SOMMERS, 1982).

Tabela 1 - Atributos químicos e físicos de um Nitossolo Bruno (NB) e um Cambissolo Húmico (CH) utilizados para condução do estudo (0-20 cm).

Solo	Argila	CO ⁽³⁾	V ⁽⁴⁾	Ca ²⁺	Mg ²⁺	CTC _{pH7}	K ⁺	P	Cu ²⁺	Zn ²⁺
	----- % -----	----- % -----	----- % -----	----- cmol _c kg ⁻¹ -----	----- cmol _c kg ⁻¹ -----	----- cmol _c kg ⁻¹ -----	----- mg dm ⁻³ -----	----- mg dm ⁻³ -----	----- mg dm ⁻³ -----	----- mg dm ⁻³ -----
NB⁽¹⁾	48,0	2,96	5,6	0,72	0,59	32,5	200,0	9,5	4,3	2,1
CH⁽²⁾	17,0	1,97	7,2	1,06	0,65	26,3	71,0	11,7	9,7	1,8

⁽¹⁾NB: Nitossolo Bruno; ⁽²⁾CH: Cambissolo Húmico; ⁽³⁾CO: Carbono orgânico semi-total; ⁽⁴⁾V: Saturação por bases.

Os solos receberam calcário com 31 % de CaO e 18 % de MgO para atingir pH 6,0 pelo método SMP (CQFS-RS/SC, 2016), foram umedecidos para cerca de 85 % da capacidade de campo e permaneceram incubados pelo período de 30 dias. Após, 7 kg de solo foram acondicionados em vasos plásticos com volume de 10 L e aplicou-se 0,63 g de fósforo na forma de superfosfato triplo e 0,63 g de potássio na forma de cloreto de potássio de acordo com recomendações de EPAGRI (2016).

Semanalmente, aplicou-se nitrato de potássio e nitrato de cálcio como fonte de N e K na dose 1,27 g e 1,35 g, respectivamente, totalizando 13,97 g de N e 14,85 g de K e 0,2 g de boro na forma de ácido bórico, totalizando 2,2 g por vaso.

Uma muda do híbrido Cerato com 15 dias foi transplantada por vaso. A umidade do solo foi mantida em 85% da sua capacidade de campo pela pesagem dos vasos. Os tratos culturais e tratamentos fitossanitários foram realizados de acordo com as demandas da cultura.

Ao 25° dia após o plantio, antes do início da floração das plantas, os tratamentos com as doses de Zn foram aplicados. As doses de Zn na forma de sulfato de zinco ($ZnSO_4 \cdot 7H_2O$, 22,7 % de Zn e 11,1 % de S, PA - ACS) foram T0; T50; T100; T150; T200; T250; T300 e T450 mg kg⁻¹ de Zn. Os tratamentos foram aplicados em forma sólida na superfície do solo.

Aos 7 dias após a aplicação dos tratamentos avaliou-se o teor relativo de clorofila (índice SPAD), parâmetros relacionados às trocas gasosas das plantas e teores de zinco no solo. O índice SPAD foi determinado com clorofilômetro portátil (SPAD 502; Konica Minolta®, Tóquio, Japão). Foram selecionadas folhas totalmente expandidas, sem injúrias ou sintomas de doenças visíveis e as medidas realizadas no terço médio das plantas, sempre em duplicata, em todas as plantas de cada repetição, no período entre as 09 e 10 horas da manhã. As medidas de parâmetros relacionados às trocas gasosas das plantas também foram realizadas neste período, utilizando folhas com as características já descritas. Foram realizadas as leituras de taxa fotossintética líquida das plantas (A), taxa de transpiração (E), condutância estomática (g_s) e concentração de CO₂ intercelular (C_i). Estes parâmetros foram quantificados por meio de um analisador de gases por infravermelho portátil (IRGA) equipado com uma câmara foliar com fonte de LED (LI-6400XT Portable Photosynthesis and Fluorescence System; LICOR, Lincoln, EUA).

Amostras de solo foram coletadas para quantificação dos teores disponíveis de Zn. Para isso, o Zn foi extraído com HCl 0,1 M (TEDESCO et al., 1995) e quantificado os teores no extrato por espectrometria de absorção atômica (Perkin Elmer AAnalyst).

A colheita das plantas foi realizada 50 dias após a aplicação dos tratamentos. As plantas foram lavadas com água deionizada e separadas em folhas, caule e raízes. Determinou-se o volume, diâmetro médio e comprimento total das raízes pela digitalização em scanner profissional e as imagens processadas pelo programa computacional WinRhizo Pro (2009) (Regent Instruments Canada Inc.). Folhas, caule

e raízes foram secas em estufas de circulação de ar forçado a 65 °C até peso constante, pesadas em balança analítica e moídas em moinho Wiley.

Para a quantificação dos teores de Zn nas raízes, caules e folhas as amostras foram digeridas pelo método 3050B (USEPA, 1996) com aquecimento em bloco digestor a 95°C (± 5 °C). Todas as determinações laboratoriais foram conduzidas em duplicata. Os teores de Zn foram determinados por espectrometria de emissão óptica com plasma indutivamente acoplado (ICP-OES) (Optima® 8300, Perkin Elmer, Norwalk, EUA). Foram utilizadas oito provas em branco em todas as avaliações para a determinação do limite de detecção do instrumento. A taxa de recuperação do método de digestão foi validada pela utilização de amostras referência CRM-Agro E1001a, certificado pela Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA), com valores de leitura e recuperação apresentados no anexo I.

Para a determinação do NCT de Zn para as plantas de tomate foram utilizados os dados de produção de massa seca total. Para tal, os dados de produção de massa seca total (g planta^{-1}) foram transformados em valores relativos (0 – 100%) em função das doses aplicadas ao solo. O NCT foi calculado baseado em uma redução de 10% da produção relativa, após esta atingir o nível máximo. Para encontrar o NCT, portanto, foi realizado o cálculo com base na equação da regressão ajustada e com $y = 90\%$.

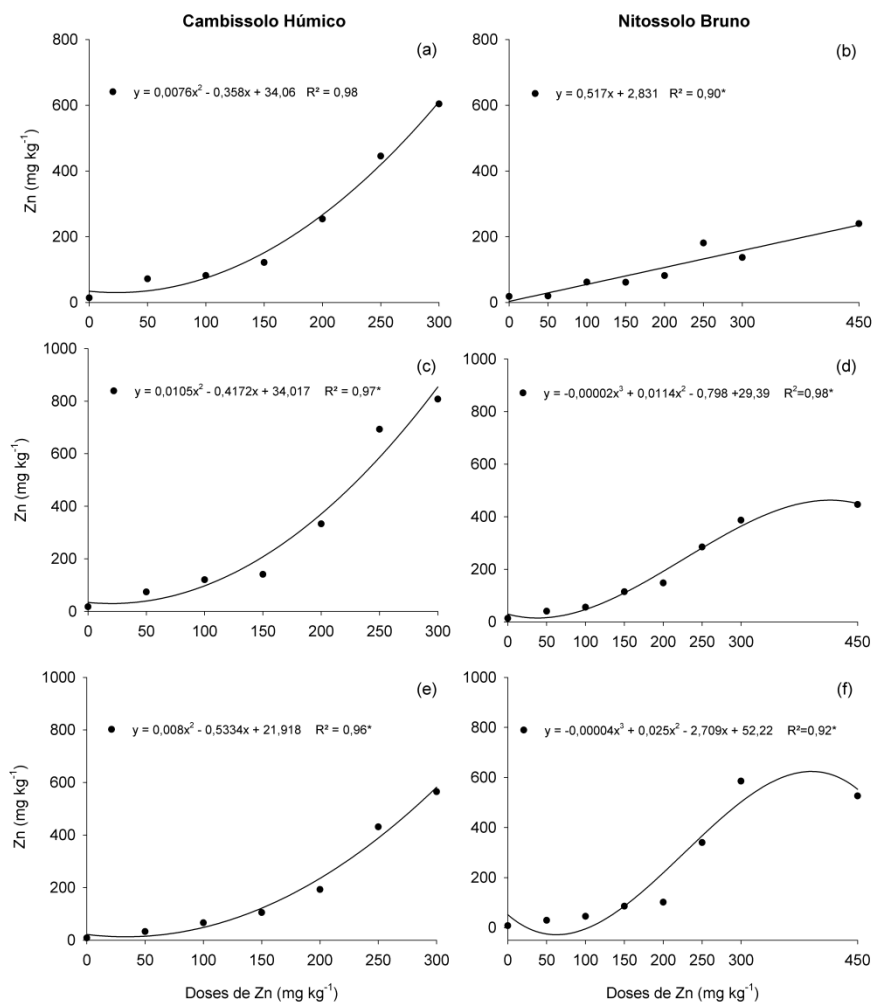
Para avaliação dos resultados experimentais as pressuposições estatísticas de normalidade e homogeneidade foram testadas e posteriormente foi realizada a análise de variância (ANOVA) e a análise de regressão dos parâmetros avaliados quando significativos com a utilização do software SISVAR (FERREIRA, 2011). Foram feitas análises de correlação simples de Pearson para os dados de SPAD, A , gs , Ci , E , teor de Zn nas folhas e Zn disponível no solo com auxílio do programa estatístico Jamovi (2021).

3.3 RESULTADOS

3.3.1 Concentração de Zn no solo e estruturas das plantas.

Plantas cultivadas em CH quando expostas a dose de 450 mg kg^{-1} de Zn, um teor disponível de $298,6 \text{ mg kg}^{-1}$ de Zn, não foram capazes de manter seus padrões de crescimentos e morreram antes da finalização do estudo. A alta disponibilidade de Zn no CH definiu o padrão de acúmulo de nutriente, de forma quadrática, em todos os órgãos da planta estudados (Figura 1 a, c, e).

Figura 1 - Teores de Zn em raízes (1a e 1b), caules (1c e 1d) e folhas (1e e 1f) de plantas de tomate cultivadas em Cambissolo Húmico (1a, c, e) e Nitossolo Bruno (1b, d, f) com doses crescentes de Zn.

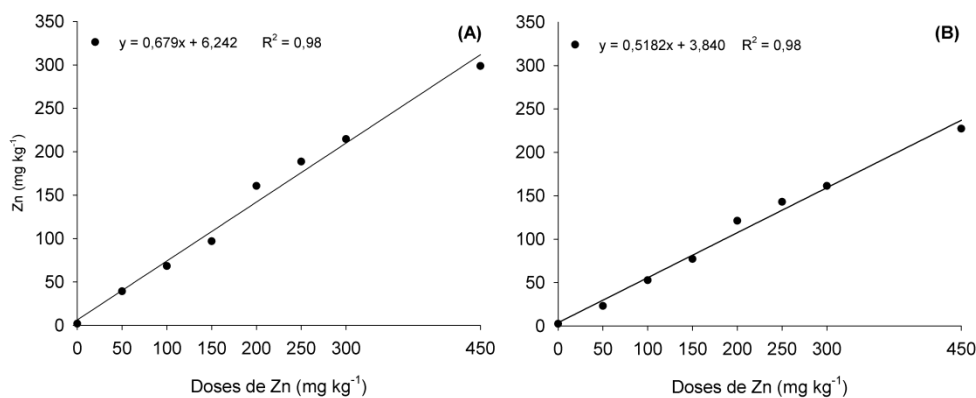


Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

Em contrapartida, as plantas cultivadas em NB, expostas a menores teores disponíveis de Zn (Figura 2; Anexo II), mantiveram um padrão de acúmulo do nutriente de forma linear. Contudo, ressalta-se que as plantas expostas a dose de 450 mg kg⁻¹ cultivadas em NB tiveram seu desenvolvimento prejudicado, e isto incluiu diminuição do seu metabolismo e conseqüente estagnação no acúmulo de Zn, como pode ser observado especialmente para os teores de Zn acumulados nas folhas (Figura 1f).

Os teores de Zn disponíveis aumentaram com as doses aplicadas (Figura 2). O CH apresentou em média teores de Zn disponível 26,2 % maiores em relação ao NB (Anexo II). Estes teores disponíveis tiveram forte correlação com os teores de Zn observados nas folhas das plantas de tomate (Tabela 2). As plantas cultivadas em CH tiveram uma correlação positiva entre Zn disponível e teor nas folhas de 0,86 e para NB de 0,85.

Figura 2 - Teores de Zn disponível (HCl 0,1 M) em função das doses aplicadas em um Cambissolo Húmico (A) e um Nitossolo Bruno (B) destinados ao cultivo de plantas de tomate.



Fonte: Elaborado pelo autor (2022)

As plantas cultivadas em solo que recebeu tratamento com Zn apresentaram quantidades significativamente maiores de Zn nas raízes, caules e folhas em comparação as plantas controle, em ambos os solos. As quantidades de Zn nas raízes, caules e folhas responderam aos tratamentos e foram as seguintes: plantas cultivadas em CH, T0: 13,5 mg kg⁻¹, 17,6 mg kg⁻¹ e 8,6 mg kg⁻¹ de Zn, respectivamente; T300: 604,2 mg kg⁻¹, 807,5 mg kg⁻¹ e 565,2 mg kg⁻¹ de Zn, respectivamente.

Plantas cultivadas em NB acumularam menos Zn em relação às cultivadas em CH, com os seguintes valores para raízes, caule e folhas, respectivamente: T0: 17,9 mg kg⁻¹, 13,3 mg kg⁻¹ e 8,2 mg kg⁻¹; T300: 136,7 mg kg⁻¹, 386,8 mg kg⁻¹ e 610,1 mg kg⁻¹; T450: 239,5 mg kg⁻¹, 446,3 mg kg⁻¹ e 526,4 mg kg⁻¹. Com base nos valores de T300, plantas cultivadas no CH acumularam 4,4 vezes mais Zn nas raízes, 2,1 vezes no caule e 0,9 vezes nas folhas em relação as cultivadas em NB.

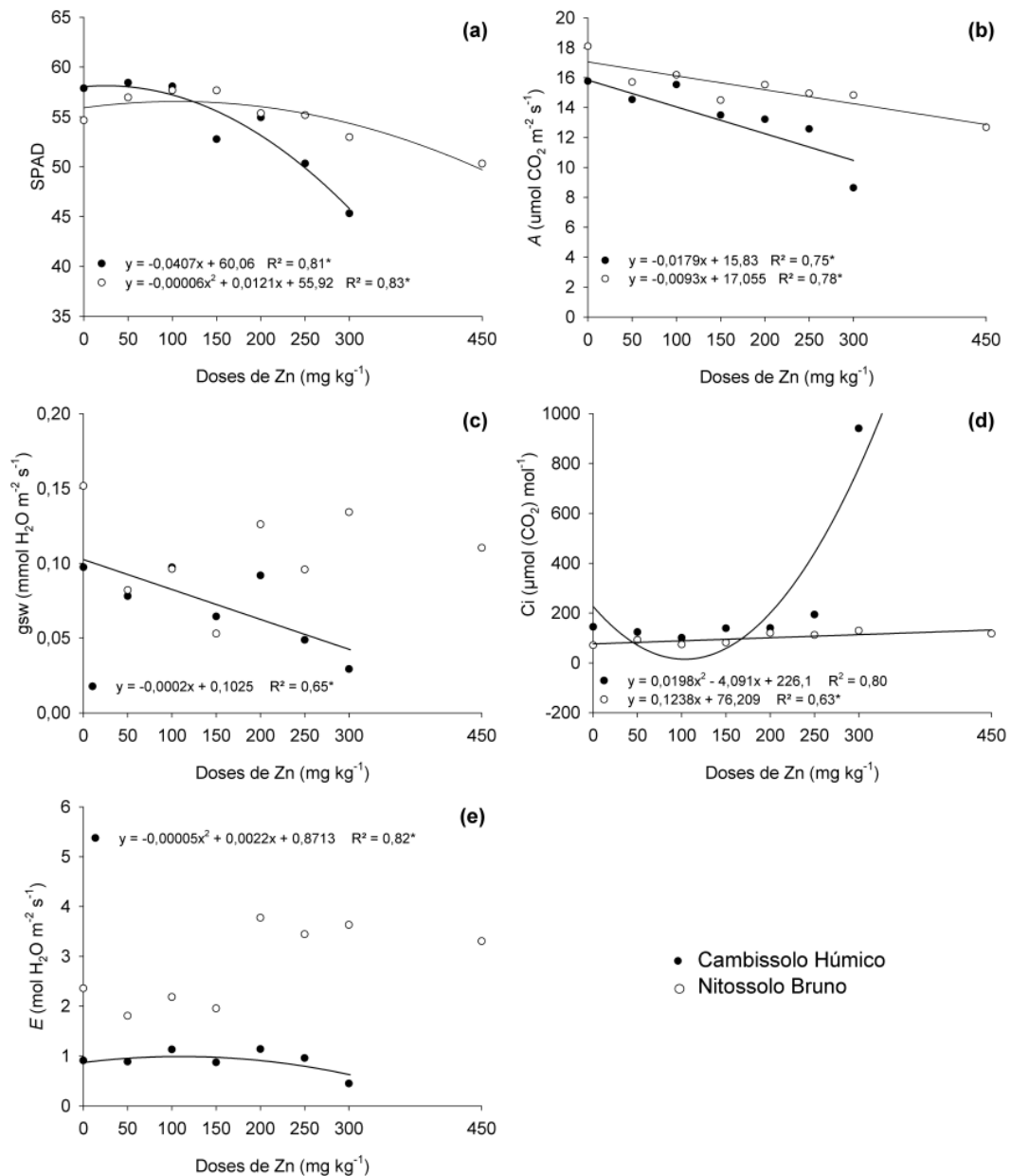
3.3.2 Trocas gasosas e índice SPAD

Os tratamentos apresentaram forte efeito negativo sobre os parâmetros cinéticos de trocas gasosas e índice SPAD, especialmente nas plantas cultivadas no CH (Figura 3). O índice SPAD, que é uma medida indireta do teor de clorofila, teve efeito negativo na presença de doses elevadas de Zn, com redução de 22,4 % entre T50 e T300, quando cultivada em CH. Para as plantas cultivadas em NB foi observado um efeito com maiores leituras de índice SPAD até T100, com aumento de 5,2 % em relação ao controle, e um decréscimo de 12,7 % a partir de T100 até o T450 (Figura 3a).

A taxa fotossintética líquida (A) foi afetada negativamente de forma linear em função do aumento das concentrações de Zn para o cultivo em ambos os solos (Figura 3b). Plantas tratadas com excesso de Zn como as cultivadas em T300 tiveram uma redução de taxa fotossintética líquida de 45,2 % em relação ao controle quando cultivadas em CH e de 18,1 % e 29,9 % quando cultivadas em NB para as doses T300 e T450, respectivamente. Este efeito de diminuição de A está positivamente correlacionado com a diminuição dos valores de leitura do índice SPAD (0,64), de g_{sw} (0,62) e de E (0,52) e negativamente com C_i (-0,72) (Tabela 2) para plantas cultivadas em CH. Já para as plantas cultivadas em NB, apesar de apresentar efeito significativo, estes foram menos acentuados e apenas a variável g_{sw} se correlacionou com A (0,51), enquanto índice SPAD, C_i e E não apresentaram correlações significativas.

A condutância estomática (g_s), concentração interna de CO₂ (C_i) e transpiração (E) foram influenciadas de maneira variável naquelas plantas cultivadas em CH, enquanto as plantas cultivadas em um NB sofreram efeito da presença do Zn apenas para a variável C_i (Figura 3 c, d, e).

Figura 3 - Índice SPAD (a), taxa fotossintética líquida (A) (b), condutância estomática (g_s) (c), concentração interna de CO_2 (C_i) (d) e transpiração (E) (e) em plantas de tomate cultivadas em um Cambissolo Húmico e um Nitossolo Bruno expostas a doses crescentes de Zn.



Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

Observa-se que houve uma redução acentuada em g_s para plantas cultivadas em CH entre o controle e T300 na ordem de 69,9 %. Em contraponto, os valores de

Ci apresentaram leituras constantes no intervalo de dose de T0 até T200 e um aumento das leituras de *Ci* a partir de T250 com aumento em relação ao controle de 1,34 vezes para T250 e 6,56 vezes para T300, em CH. As plantas cultivadas em NB também tiveram incremento das leituras de *Ci*, sendo que em T250 houve um aumento de 1,57 vezes e T300 de 1,82 vezes nas leituras em relação a T0, efeito 4,7 vezes menos acentuado entre CH e NB para T300.

Tabela 2 - Coeficientes de correlação simples de Pearson entre as características índice SPAD (SPAD), taxa fotossintética líquida (A), condutância estomática (gsw), concentração interna de CO₂ (*Ci*), transpiração (E), teor de zinco nas folhas (Zn folha) e zinco disponível no solo (Zn disp.) de plantas de tomate cultivadas em diferentes concentrações de Zn em dois solos.

Cambissolo Húmico							
	SPAD	A	Gsw	<i>Ci</i>	E	Zn Folha	Zn disp.
SPAD	1						
A	0,64**	1					
Gsw	0,51*	0,62**	1				
<i>Ci</i>	-0,56*	-0,72**	-0,40*	1			
E	0,40*	0,52*	0,53*	-0,34 ^{ns}	1		
Zn Folha	-0,67**	-0,74**	-0,51*	0,71**	-0,27 ^{ns}	1	
Zn Disp.	-0,54*	-0,70**	-0,43*	0,61*	-0,12 ^{ns}	0,86**	1
Nitossolo Bruno							
	SPAD	A	gsw	<i>Ci</i>	E	Zn Folha	Zn disp.
SPAD	1						
A	-0,08 ^{ns}	1					
gsw	-0,26 ^{ns}	0,51**	1				
<i>Ci</i>	-0,16 ^{ns}	-0,34 ^{ns}	0,08 ^{ns}	1			
E	-0,28 ^{ns}	0,04 ^{ns}	0,58**	0,56**	1		
Zn Folha	-0,37*	-0,40*	0,01 ^{ns}	0,60**	0,32 ^{ns}	1	
Zn Disp.	-0,38*	-0,46**	0,04 ^{ns}	0,61**	0,45*	0,85**	1

*Significativo em 5% e **significativo em 1% de probabilidade de erro pelo teste t. ^{ns}Não significativo.
Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

A transpiração de plantas cultivadas em CH apresentou um efeito bastante similar entre o intervalo de T0 e T200, com valores variando entre 0,81 e 1,14 mol H₂O m⁻² s⁻¹ (Figura 3e). Contudo, a partir desta dose, há um decréscimo acentuado das leituras com redução de 54,7 % entre T0 e T300. Para o NB não foram observadas diferenças significativas entre os tratamentos para este parâmetro.

O teor de Zn nas folhas gerenciou em ambos os solos efeitos nos parâmetros de trocas gasosas, especialmente em CH. Correlações significativas foram encontradas entre teor de Zn nas folhas e SPAD (-0,67), *A* (-0,74), *gsw* (-0,51) e *Ci* (0,71) em CH. Em NB as correlações significativas com o teor de Zn nas folhas foram observadas para as variáveis SPAD (-0,37), *A* (-0,40) e *Ci* (0,60) (Tabela 2).

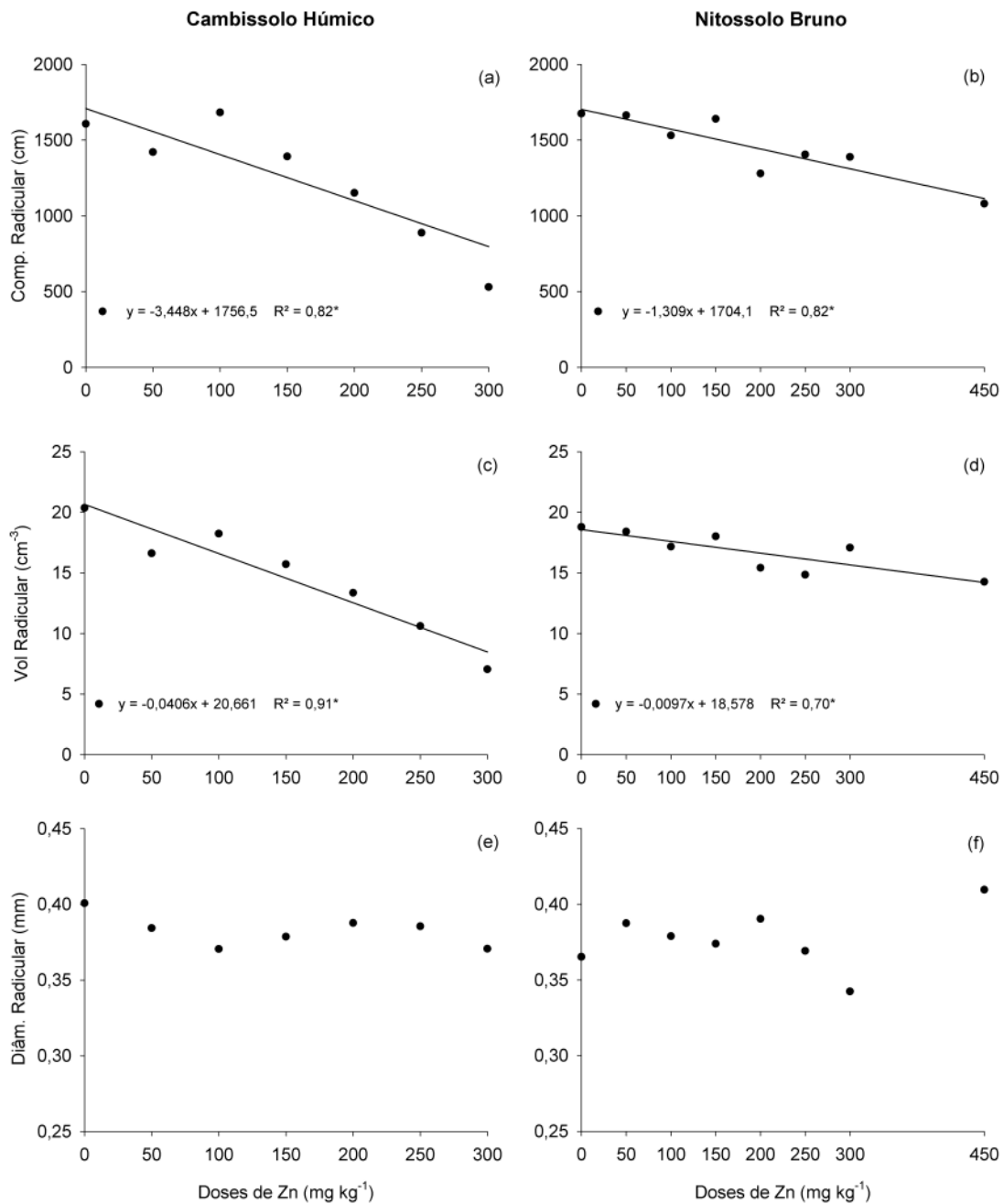
3.3.3 Parâmetros radiculares e produção de massa seca

O comprimento e volume de raízes foram afetados negativamente pelo aumento das doses de Zn aplicadas ao solo, enquanto o diâmetro não sofreu efeito das doses de Zn (Figura 4). O comprimento de raiz das plantas cultivadas no CH foi de 1607,7 cm no T0 e de 530,8 cm no T300, uma redução de 66,9 % no comprimento das raízes. Já no NB, apesar de apresentar efeito negativo da presença do Zn para esta variável o efeito foi menos pronunciado, com um decréscimo de 17,1 % para T300 e 35,4 % para T450, respectivamente, em relação a T0.

Houve decréscimo do volume radicular naquelas plantas cultivadas em CH, da ordem de 65,4 %, entre o controle e T300 (Figura 4c) e para NB esta redução foi de 24,1 % entre T450 e T0 (Figura 4d).

Independentemente do tipo de solo em que as plantas de tomate foram cultivadas, houve redução da produção de massa seca de raiz, de parte aérea e massa seca total em função do incremento de Zn ao solo (Figura 5a, b, c). De maneira geral, a produção de massa seca das raízes (Figura 5a) e da parte aérea (Figura 5b) apresentaram um padrão comportamental bastante semelhante e este comportamento gerenciou o efeito observado para produção total de massa seca das plantas (Figura 5c). Assim como para as outras variáveis observadas até aqui, os efeitos para este conjunto de variáveis foram mais pronunciados em plantas cultivadas em CH em comparação com aquelas cultivadas em NB.

Figura 4 - Comprimento (a), volume (b) e diâmetro (c) de raízes de plantas de tomate cultivadas em dois solos distintos e expostas a doses crescentes de Zn.

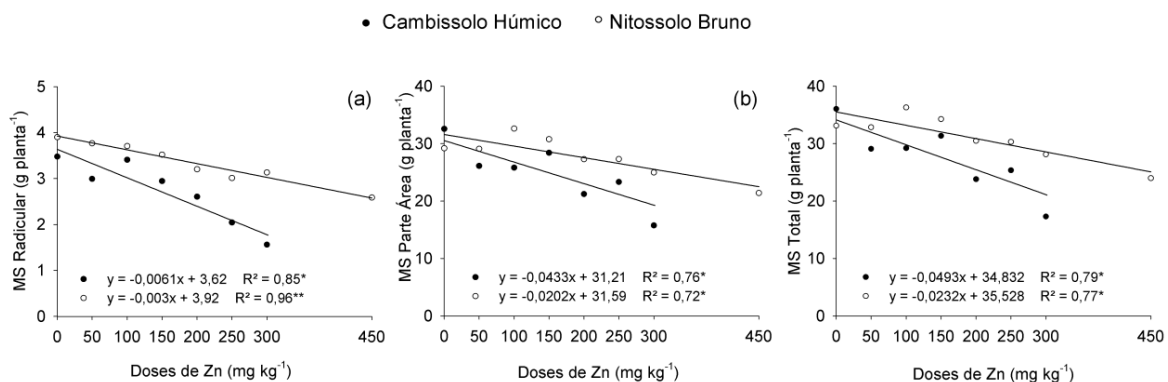


Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

A massa seca de raiz (Figura 5a) foi reduzida em cerca de 2,2 vezes para T300 em relação T0 em CH. As plantas cultivadas em NB a redução foi de 1,25 vezes para T300 e de 1,52 vezes para T450 em relação T0. A massa seca de parte aérea por sua vez teve uma redução de 28,4% para T250 e 51,5% para T300 em relação a T0 quando cultivadas em CH. As plantas cultivadas em NB tiveram uma redução de 6,4%

para T250, 14,4% para T300 e de 26,7% para T450 em relação a T0 (Figura 5 b) de sua MSPA. Sendo estas duas variáveis as responsáveis por condicionarem os valores de massa seca total, está por sua vez apresentou valores de redução bastante semelhantes aos apresentados anteriormente, na ordem de 47,9 % para T300 em relação ao controle quando cultivada em CH e de 15,1 % para os mesmos tratamentos quando cultivada em NB (Figura 5 c).

Figura 5 - Produção de massa seca radicular (a), massa seca de parte aérea (b) e massa seca total (c) de plantas de tomate cultivadas em dois solos tratados com doses crescente de Zinco.



Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

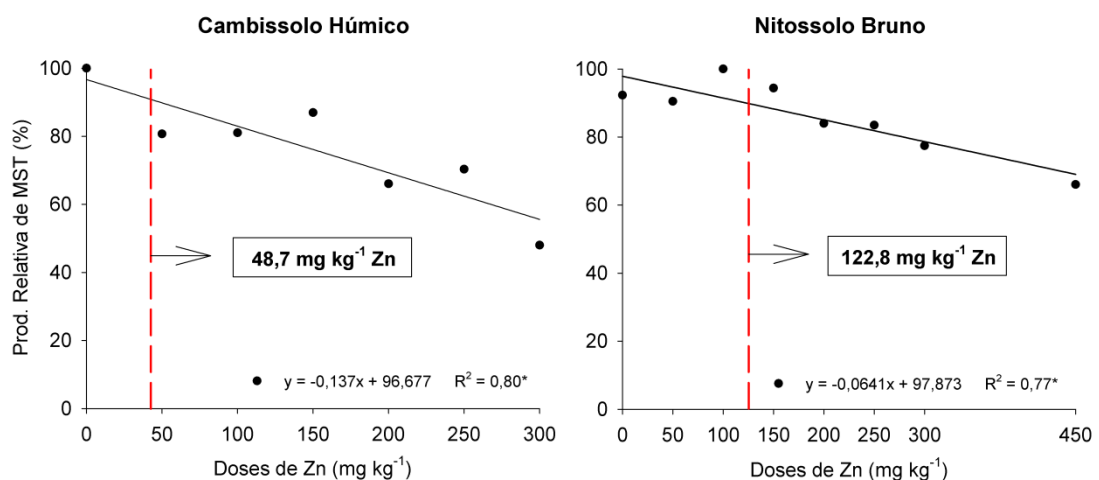
3.3.4 Nível crítico tóxico de Zn

Com base nos efeitos do Zn na produção de massa seca total das plantas de tomate foram estabelecidos valores de NCT em relação à produção relativa de MST e as doses de Zn aplicadas ao solo. Nas plantas cultivadas em CH, que apresentou maiores teores de Zn na solução do solo, o NCT foi atingido com a dose aplicada de 48,7 mg kg⁻¹ de Zn. Para as plantas cultivadas em NB, com menores teores de Zn disponível, o NCT foi atingido em uma dose aplicada mais elevada, no valor de 122,8 mg kg⁻¹ de Zn.

As doses de NCT de Zn para o CH de 48,7 mg kg⁻¹ corresponde a um valor disponível na solução do solo de 39,2 mg kg⁻¹, enquanto para o NB com a dose de 122,8 mg kg⁻¹ de NCT, o valor disponível na solução do solo é de 67,5 mg kg⁻¹.

Observa-se que de maneira geral, a dose necessária aplicada ao solo para atingir o NCT é cerca de 2,5 vezes mais alta no NB do que no CH, mas que os teores disponíveis na solução do solo não mantem esta relação e o valor disponível na solução do solo para NB atingir o NCT nas plantas é cerca de 1,7 vezes maior em relação ao CH.

Figura 6 - Nível crítico tóxico de Zn para plantas de tomate cultivadas em um Cambissolo Húmico e um Nitossolo Bruno expostas a doses crescente de Zn.



Linha tracejada representa o teor de Zn no nível crítico tóxico em ambos os solos. Fonte: Elaborado pelo autor (2022)

3.4 DISCUSSÃO

Características de solo tais como teor de argila e de matéria orgânica tem forte influência sobre a disponibilidade de Zn na solução do solo e consequentemente na sua disponibilidade para as plantas (NOULAS et al., 2018; SHI et al., 2018). Solos com baixos teores de argila e matéria orgânica tendem a ter menor capacidade de adsorção de Zn em comparação com solos com teores mais elevados destes componentes, e isto contribui para maiores ou menores teores de Zn na solução do solo (MAHAR et al., 2016; ASHRAF et al., 2019), e na disponibilidade para as plantas (KARACA et al., 2018, ANDREJIC et al., 2018). Em partes, características de solo

condicionaram os efeitos observados neste estudo, sendo o CH o solo com menores teores de argila e matéria orgânica e o NB o solo com teores mais elevados destes componentes (Tabela 1) e isto geriu os processos de disponibilidade de nutrientes no solo (Figura 2) e para as plantas (Figura 1). Cabe ressaltar ainda que a disponibilidade elevada de Zn no CH gerou um nível de estresse extremo nas plantas cultivadas sob dose de 450 mg kg⁻¹ de Zn ao ponto de as mesmas morrerem (Anexo III). No NB, apesar de uma menor disponibilidade de Zn nas doses mais elevadas (T300 e T450), é possível observar que plantas cultivadas nestas doses, apesar de não morrerem, apresentaram desenvolvimento prejudicado, muito em função do alto acúmulo de Zn nos seus tecidos.

A alta disponibilidade Zn nos solos que receberam os tratamentos resultou em concentrações elevadas do elemento nos diferentes tecidos das plantas (Figura 1). Por ser o Zn um nutriente pouco móvel no solo e depender do processo de difusão e fluxo de massa para a absorção, altos teores disponíveis resultam em altos teores acumulados (GUPTA et al., 2016; SUGANYA et al., 2020). De maneira geral, plantas expostas a condições de excesso de elementos (normalmente tóxicos) tendem a ativar mecanismos de defesa para limitar a movimentação do elemento das raízes para as folhas, principalmente em altas doses (ANDREJIC et al., 2018). No presente estudo, de modo geral, as plantas cultivadas em CH acumularam maiores teores de Zn em todos os órgãos e todas as doses em comparação as cultivadas em NB. Contudo, dentro de cada solo foi possível perceber acúmulo exponencial de Zn nas folhas de plantas cultivadas em CH e um comportamento cúbico em NB (Figura 1 e, f), demonstrando pouca ou nenhuma restrição da planta quanto à movimentação do elemento da raiz para a parte aérea.

O Zn é essencial no metabolismo vegetal, pois desempenha um papel fundamental no desenvolvimento e função do cloroplasto. Além disso, algumas das suas funções incluem, o processo de reparo do fotossistema II (HANSCH e MENDEL, 2009), além de participar do processo de ativação de enzimas como a RNA polimerases e superóxido dismutase, na síntese de proteínas e metabolismo de carboidratos, lipídios e ácidos nucleicos (BUTURI et al., 2021). Então, a nível molecular, a inibição do sistema fotossintético de plantas expostas ao excesso de Zn parece estar relacionada a mudanças na estrutura e quantidade de clorofila (TSONEV e LIDON, 2012). Concentrações tóxicas de Zn causam substituição de Mg²⁺ por Zn²⁺

na estrutura da molécula de clorofila (KUPPER et al., 2002), também diminuem os níveis de clorofila *a* e *b*, além de causar uma possível obstrução do transporte de Fe^{2+} para os cloroplastos, causando redução do teor de clorofila nas folhas (GARG e SINGH, 2018). Portanto, a diminuição dos valores observados para *A* neste estudo, está em parte relacionada com a diminuição nos valores de leitura de índice SPAD, evidenciado pela correlação existente entre ambos, principalmente para plantas cultivadas em CH (0,64) (Tabela 3). Em contrapartida, baixas doses de Zn quando disponibilizadas as plantas podem causar efeitos positivos na atividade fotossintética (ROSSI et al., 2019) e índice SPAD (PALÁCIO-MÁRQUEZ et al., 2021), principalmente nos primeiros dias após a aplicação.

A presença de Zn em excesso afetou negativamente os parâmetros de trocas gasosas medidos em plantas cultivadas em CH, causando diminuição de *g_{sw}*, *C_i* e *E*, enquanto as plantas cultivadas em NB não apresentaram sensibilidade à presença do Zn para estas variáveis, exceto para *E* (Figura 3). A diminuição de *g_{sw}* indica inibição da capacidade estomática, sendo este talvez um dos grandes limitantes para o avanço da capacidade fotossintética das plantas, indo ao encontro do observado por Sagardoy et al. (2010). Estes autores observaram que as limitações na condutância estomática seriam os parâmetros responsáveis pela diminuição da fotossíntese em plantas de beterraba expostas ao excesso de Zn, sendo observado uma redução de 70% entre o controle e o tratamento 300 μ M Zn, semelhante ao observado neste estudo. Este efeito negativo de *g_{sw}* em alta exposição ao Zn pode ser atribuído a redução na captação de K^+ (VAILLANT et al. 2005) e também na diminuição da atividade da Rubisco, em função da substituição do Mg^{2+} por Zn^{2+} na estrutura da enzima (OUNI et al., 2016) além de alterações na frequência e no tamanho de estômatos que são reduzidos em exposição excessiva ao Zn (SAGARDOY et al., 2010).

A redução de *g_{sw}* e de *A* causou implicações sobre *E*, resultando em diminuição da capacidade de transpiração das plantas em função de condições de fechamento estomático, diminuição do número de estômatos e de sua capacidade funcional como também observado por Sagardoy et al. (2010). Diversos estudos relatam diminuição da capacidade de transpiração das plantas quando expostas ao excesso de Zn (FERNANDEZ-MARTINEZ et al., 2014; ANDREJIC et al., 2018).

O zinco, quando disponível em altos teores para as plantas, é responsável pela inibição dos processos de divisão celular, alongamento celular e efeito combinado de ambos, resultando em uma exploração limitada do solo, prejudicando a translocação de água e nutrientes e induzindo a deficiências minerais (KAUR e GARG, 2021). Vijayarengan e Mahalakshmi (2013) trabalhando com toxicidade de Zn em plantas de tomate observaram também efeito de redução do comprimento radicular de plantas de tomate expostas a doses semelhantes às utilizadas no presente estudo. Os autores ainda observaram que a exposição prolongada (105 dias) foi responsável por efeito mais severos no crescimento das raízes, com redução aproximada de 55,4 % do comprimento entre a testemunha e a dose de 250 mg kg⁻¹ de Zn, valor bastante semelhante ao observado para CH no presente estudo.

A produção de massa seca das plantas de tomate foi severamente afetada pela presença excessiva de Zn na solução do solo e pelo conseqüente acúmulo do elemento nos tecidos das plantas. Este efeito é amplamente relatado para diversas culturas expostas a excesso de Zn (WANG et al., 2018; ALMEIDA et al., 2020; AGHAJANZADEH et al., 2020) e é resultado de uma interação de fatores que gerenciam este processo. O excesso de Zn parece afetar as folhas no âmbito da área foliar e número de folhas, o que pode ser resultado da diminuição da divisão celular, do alongamento celular ou de ambos (GLINSKA et al., 2016). Além disso, Zhang et al. (2017) relatam que o excesso de Zn prejudica a organização das mitocôndrias e leva a diminuição dos níveis de nicotinamida, acelerando a degradação de NAD⁺ e conseqüentemente diminuindo o metabolismo energético, com resultado de menor produção de massa seca em plantas. Esta inibição na produção de MS parece ser uma combinação inespecífica de alterações em características físico-bioquímicas que resultam em efeitos diretos, toxicidade por acúmulo nos tecidos, e indireto que seriam limitações na aquisição de água e minerais (KAUR e GARG, 2021).

Os limites de toxicidade para Zn em plantas dependem amplamente da espécie cultivada, estágio de crescimento, condição de cultivo, cultivar e nível de exposição ao elemento (YANG et al., 2012; GARG e SINGH, 2018). Os sintomas de toxicidade podem aparecer em plantas de tomate em diferentes doses com teores entre 100-250 mg kg⁻¹ de Zn em plantas cultivadas em solo (VIJAYARENGAN e MAHALAKSHMI, 2013) e variando de 50 - 500 µM em cultivos hidropônicos (SBARTAI et al., 2011; PAVITHRA et al., 2016). Em condição de cultivo no solo, estas concentrações podem

ser variáveis, dependendo principalmente das características do solo, tal como sua textura. Solos de textura mais argilosa tendem a proporcionar maiores teores acumulados nas plantas e menores concentrações disponíveis na solução do solo em comparação com solos de textura mais arenosa (BARAN, 2012). Esta diferença de resposta para diferentes solos foi um efeito observado no presente estudo, onde plantas de tomate cultivadas em CH foram expostas a teores disponíveis altos mesmo em doses mais baixas. Isto resultou em um NCT mais baixo para estas plantas, muito provavelmente, em função da exposição mais acentuada ao nutriente. Já no NB, os teores disponíveis foram menores, resultando em menor absorção e translocação do elemento para a parte aérea e por consequência atingindo o NCT em uma dose mais elevada de Zn (Figura 6).

Alguns estudos têm demonstrado que os teores ideais de Zn em diversas plantas são muito variáveis: frutos de tomate: 17-26 mg kg⁻¹ (KABATA-PENDIAS, 2011), folhas de brócolis: 20-80 mg kg⁻¹, raízes de cenoura: 25-250 mg kg⁻¹ e raízes de beterraba: 10-80 mg kg⁻¹ (NOULAS et al., 2018). Em contraponto, Fageria, (2000) estudou as culturas do arroz, feijão, milho, soja e trigo e observou que o NCT de Zn para estas plantas foi respectivamente: 70 mg kg⁻¹, 57 mg kg⁻¹, 110 mg kg⁻¹, 59 mg kg⁻¹ e 40 mg kg⁻¹ Zn. Nestas doses de NCT para as culturas o teor disponível no solo foi de 61 mg kg⁻¹ para arroz, 25 mg kg⁻¹ para feijão, 94 mg kg⁻¹ para milho, 53 mg kg⁻¹ para soja e 27 mg kg⁻¹ para trigo, valores semelhantes aos encontrados no presente estudo para a cultura do tomate que foram de 39,2 mg kg⁻¹ no CH e de 67,5 mg kg⁻¹ de Zn no NB.

3.5 CONCLUSÃO

A dose de nível crítico tóxico de Zn para as plantas de tomate do cultivar Cerato cultivadas em Cambissolo Húmico é de 48,7 mg kg⁻¹ e para plantas cultivadas em Nitossolo Bruno é de 122,8 mg kg⁻¹.

O incremento de Zn no solo resultou em aumento dos teores de Zn em todos os órgãos das plantas e afetou negativamente os valores de índice SPAD, a taxa fotossintética, comprimento e volume de raiz.

A produção de massa seca de raízes e de parte aérea diminuiu em função do incremento de Zn com efeito mais pronunciado em plantas cultivadas em Cambissolo Húmico.

4. REFERÊNCIAS

AGHAJANZADEH, T. A., PRAJAPATI, D. H., BUROW, M. Differential partitioning of thiols and glucosinolates between shoot and root in Chinese cabbage upon excess zinc exposure. **Journal of Plant Physiology**, v. 244, p. 153088, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.jplph.2019.153088>

ALMEIDA, H. J., VERGARA CARMONA, V. M., FERREIRA INOCÊNCIO, M., FURTINI NETO, A. E., CECÍLIO FILHO, A. B., MAUAD, M. Soil type and zinc doses in agronomic biofortification of lettuce genotypes. **Agronomy**, v.10, n.1, p. 124, 2020. <https://doi.org/10.3390/agronomy10010124>

ANDREJIC, G., GAJIC, G., PRICA, M., DZELETOVIC, Z., RAKIC, T. Zinc accumulation, photosynthetic gas exchange, and chlorophyll a fluorescence in Zn-stressed *Miscanthus x giganteus* plants. **Photosynthetica**, v. 56, n. 4, p. 1249-1258, 2018. <http://10.1007/s11099-018-0827>

ASHRAF, S., ALI, Q., ZAHIR, Z. A., ASHRAF, S., ASGHAR, H. N. Phytoremediation: Environmentally sustainable way for reclamation of heavy metal polluted soils. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, v. 174, p. 714–727, 2019. <http://doi:10.1016/j.ecoenv.2019.02.068>

BARAN, A. Assessment of zinc content and mobility in maize. **Ecological Chemistry and Engineering A**, v.19, n. 7, p. 699–706, 2012. [http://doi.10.2428/ecea.2012.19\(07\)069](http://doi.10.2428/ecea.2012.19(07)069)

BUTURI, C. V., MAURO, R. P., FOGLIANO, V., LEONARDI, C., GIUFFRIDA, F. Mineral biofortification of vegetables as a tool to improve human diet. **Foods**, v. 10, n. 2, p. 223, 2021. <http://doi:10.3390/foods10020223>

CAKMAK, I., KUTMAN, U. B. Agronomic biofortification of cereals with zinc: a review. **European Journal of Soil Science**, v. 69, n. 1, p. 172–180, 2018. <https://doi.org/10.1111/ejss.12437>

CLEMENS, S. The cell biology of Zn. **Journal of experimental Botany**, v. 73, n. 6, p. 1688-1698, 2021. <https://doi.org/10.1093/jxb/erab481>

EPAGRI. (2016). **Sistema de produção integrada para o tomate tutorado em Santa Catarina** (p. 151). Florianópolis, SC: Epagri.

FAGERIA, N. K. Níveis adequados e tóxicos de zinco na produção de arroz, feijão, milho, soja e trigo em solo de cerrado. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 4, n. 3, p. 390-395, 2000.

FAO. **World Food and Agriculture - Statistical Yearbook 2021**. Rome. <https://doi.org/10.4060/cb4477en>

FERREIRA, D. F. **Sisvar: um sistema computacional de análise estatística. Ciência e Agrotecnologia**, v. 35, n. 6, p. 1039-1042, 2011. <https://doi.org/10.1590/S1413-70542011000600001>

FERNÁNDEZ-MARTÍNEZ, J., ZACCHINI, M., FERNÁNDEZ-MARÍN, B., GARCÍA-PLAZAOLA, J. I., FLECK, I. Gas-exchange, photo- and antioxidant protection, and metal accumulation in I-214 and Eridano Populus sp. clones subjected to elevated zinc concentrations. **Environmental and Experimental Botany**, v. 107, p. 144–153, 2014. <http://doi:10.1016/j.envexpbot.2014.06.004>

GALIĆ, L., VINKOVIĆ, T., RAVNJAK, B., LONČARIĆ, Z. Agronomic biofortification of significant cereal crops with selenium - A Review. **Agronomy**, v. 11, n. 5, p. 1015, 2021. <https://doi.org/10.3390/agronomy11051015>

GARCÍA-GÓMEZ, C., GARCÍA, S., OBRADOR, A. F., GONZÁLEZ, D., BABÍN, M., FERNÁNDEZ, M. D. Effects of aged ZnO NPs and soil type on Zn availability, accumulation and toxicity to pea and beet in a greenhouse experiment. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, v. 160, p. 222–230, 2018. <http://doi:10.1016/j.ecoenv.2018.05.01>

GARG, N., SINGH, S. Arbuscular mycorrhiza rhizophagus irregularis and silicon modulate growth, proline biosynthesis and yield in *Cajanus cajan* L. Millsp. (pigeonpea) Genotypes under Cadmium and Zinc Stress. **Journal of Plant Growth Regulation**, v. 37, n. 1, p. 46–63, 2018. <http://doi:10.1007/s00344-017-9708-4>

GLIŃSKA, S., GAPIŃSKA, M., MICHLEWSKA, S., SKIBA, E., KUBICKI, J. Analysis of *Triticum aestivum* seedling response to the excess of zinc. **Protoplasma**, v. 253, n. 2, p. 367–377, 2016. <http://doi:10.1007/s00709-015-0816-3>

GUPTA, N., RAM, H., KUMAR, B. Mechanism of Zinc absorption in plants: uptake, transport, translocation and accumulation. **Reviews in Environmental Science and BioTechnology**, v. 15, n. 1, p. 89–109, 2016. <http://doi:10.1007/s11157-016-9390-1>

HACISALIHOGU, G. Zinc (Zn): The last nutrient in the alphabet and shedding light on zn efficiency for the future of crop production under suboptimal Zn. **Plants**, v. 9, n. 11, p. 1471, 2020. <http://doi:10.3390/plants9111471>

HÄNSCH, R., MENDEL, R. R. Physiological functions of mineral micronutrients (Cu, Zn, Mn, Fe, Ni, Mo, B, Cl). **Current Opinion in Plant Biology**, v.12, n. 3, p. 259–266, 2009. doi:10.1016/j.pbi.2009.05.006

JHA, A. B., WARKENTIN, T. D. Biofortification of Pulse Crops: Status and Future Perspectives. **Plants**, v. 9, n. 1, p. 73, 2020. <http://doi:10.3390/plants9010073>

KABATA-PENDIAS, A. (2011). **Trace Elements in Soils and Plants** (4th ed.). Boca Raton: Taylor and Francis.

KARACA, O., CAMESELLE, C., REDDY, K. R. Mine tailing disposal sites: contamination problems, remedial options and phytocaps for sustainable remediation. **Reviews in Environmental Science and Bio/Technology**, v. 17, n. 1, p. 205–228, 2017. <http://doi:10.1007/s11157-017-9453-y>

KAUR, H., GARG, N. Zinc toxicity in plants: a review. **Plant**, v. 253, n. 6, 2021. <http://doi:10.1007/s00425-021-03642-z>

KÜPPER, H., ŠETLÍK, I., SPILLER, M., KÜPPER, F. C., PRÁŠIL, O. Heavy metal-induced inhibition of photosynthesis: targets of in vivo heavy metal chlorophyll formation. **Journal of Phycology**, v. 38, n. 3, p. 429–441, 2002. doi:10.1046/j.1529-8817.2002.01148.x

KURIHARA, C. H., SHIZUO, M., ALVAREZ, V. H. V. **Interpretação de resultados de análise foliar**. Dourados: Embrapa Agropecuária Oeste; Colombo; Embrapa Florestas, 2005. 42 p.

LIMA, J. C. P. S.; NASCIMENTO, C. W. A., LIMA, J. G. C., LIRA JUNIOR, M. A. Critical and toxic boron levels in corn plants and soils of Pernambuco, Brazil. *Rev. Bras. Ciênc. Solo*, v. 31, n. 1, p. 73 – 79, 2007. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832007000100008>

MAHAR, A., WANG, P., ALI, A., AWASTHI, M. K., LAHORI, A. H., WANG, Q., ... ZHANG, Z. Challenges and opportunities in the phytoremediation of heavy metals contaminated soils: a review. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, v. 126, p. 111–121, 2016. <http://doi:10.1016/j.ecoenv.2015.12.023>

NELSON, D.W., SOMMERS, L.E. Total carbon, organic carbon and organic matter. In: PAGE, A.L.; MILLER, R.H. E KEENEY, D.R., eds. **Methods of soil analysis: Chemical and microbiological properties. Part 2**. Madison, Soil Science Society of America, p. 539-579, 1982. <https://doi.org/10.2134/agronmonogr9.2.2ed.c29>

NOULAS, C., TZIOUVALEKAS, M., KARYOTIS, T. Zinc in soils, water and food crops. **Journal of Trace Elements in Medicine and Biology**, v. 49, p. 252–260, 2018. <http://doi:10.1016/j.jtemb.2018.02.009>

OUNI, Y., MATEOS-NARANJO, E., ABDELLY, C., LAKHDAR, A. Interactive effect of salinity and zinc stress on growth and photosynthetic responses of the perennial grass, *Polypogon monspeliensis*. **Ecological Engineering**, v. 95, p. 171–179, 2016. <http://doi:10.1016/j.ecoleng.2016.06.06>

PALACIO-MÁRQUEZ, A., RAMÍREZ-ESTRADA, C. A., GUTIÉRREZ-RUELAS, N. J., SÁNCHEZ, E., BARRIOS, D. L. O., CHÁVEZ-MENDOZA, C., SIDA-ARREOLA, J. P. Efficiency of foliar application of zinc oxide nanoparticles versus zinc nitrate complexed with chitosan on nitrogen assimilation, photosynthetic activity, and production of green

beans (*Phaseolus vulgaris* L.). **Scientia Horticulturae**, v. 288, p. 110297, 2021. <http://doi:10.1016/j.scienta.2021.110297>

PAVITHRA, G. J., MAHESH, S., PARVATHI, M. S., BASAVARAJESHWARI, R. M., NATARAJA, K. N., & SHANKAR, A. G. Comparative growth responses and transcript profiling of zinc transporters in two tomato varieties under different zinc treatments. **Indian Journal of Plant Physiology**, v. 21, n. 2, p. 208–212, 2016. <http://doi:10.1007/s40502-016-0210-y>

ROSSI, L., FEDENIA, L. N., SHARIFAN, H., MA, X., LOMBARDINI, L. Effects of foliar application of zinc sulfate and zinc nanoparticles in coffee (*Coffea arabica* L.) plants. **Plant Physiology and Biochemistry**, 2019. <http://doi:10.1016/j.plaphy.2018.12.005>

SAGARDOY, R., VÁZQUEZ, S., FLOREZ-SARASA, I., ALBACETE, A., RIBAS-CARBÓ, M., FLEXAS, J. ... MORALES, F. Stomatal and mesophyll conductances to CO₂ are the main limitations to photosynthesis in sugar beet (*Beta vulgaris*) plants grown with excess zinc. **New Phytologist**. v. 187, p. 145-158, 2010. <http://doi:10.1111/j.1469-8137.2010.03241.x>

SAGARDOY, R., MORALES, F., LÓPEZ-MILLÁN, A. F., ABADÍA, A., ABADÍA, J. Effects of zinc toxicity on sugar beet (*Beta vulgaris* L.) plants grown in hydroponics. **Plant Biology**, v. 11, n. 3, p. 339–350, 2010. <http://doi:10.1111/j.1438-8677.2008.00153.x>

SBARTAI, H., DJEBAR, M. R., ROUABHI, R., SBARTAI, I., BERREBBAH, H. Antioxidative responses in tomato plants *Lycopersicon esculentum* L. roots and leaves to zinc. **American-Eurasian Journal of Toxicological Sciences**, v. 3, n. 1, p. 41–46, 2011.

SHI, J., WU, Q., ZHENG, C., YANG, J. The interaction between particulate organic matter and Copper, Zinc in paddy soil. **Environmental Pollution**, v. 243, n. B, p. 1394-1402, 2018. <http://doi:10.1016/j.envpol.2018.09.085>

STANTON, C., SANDERS, D., KRAMER, U., PODAR, D. Zinc in plants: Integrating homeostasis and biofortification. **Molecular Plant**, v. 15, n. 1, p. 65-86, 2022. <http://doi.org/10.1016/j.molp.2021.12.008>

STURIKOVA, H., KRYSTOFOVA, O., HUSKA, D., ADAM, V. Zinc, zinc nanoparticles and plants. **Journal of Hazardous Materials**, 349, 101–110, 2018. doi:10.1016/j.jhazmat.2018.01.04.

SUGANYA, A., SARAVANAN, A., MANIVANNAN, N. Role of zinc nutrition for increasing zinc availability, uptake, yield, and quality of maize (*Zea Mays* L.) Grains: An Overview. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v. 51, n. 15, p. 2001–2021, 2020. <http://doi:10.1080/00103624.2020.1820030>

TEDESCO, M. J., GIANELLO, C., BISSANI, C. A., BOHNEN, H., VOLKWEISS, S. J. **Análises de solo, plantas e outros materiais**. Porto Alegre, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1995. 174p. (Boletim Técnico de solos, 5).

THE JAMOVI PROJECT (2021). **Jamovi. (Version 2.2)** [Computer Software]. Retrieved from <https://www.jamovi.org>

TSONEV, T., LIDON, F. J. C. Zinc in plants-An overview. **Emirates Journal of Food and Agriculture**, v. 24, n .4, p. 322–333, 2012.

USEPA- United States Environmental Protection Agency, 1996. **Acid digestion of sediments, sledges and soils**. 3050B Washington.

VAILLANT, N., MONNET, F., HITMI, A., SALLANON, H., COUDRET, A. Comparative study of responses in four *Datura* species to a zinc stress. **Chemosphere**, v. 59, n. 7, p. 1005–1013, 2005. doi:10.1016/j.chemosphere.2004.1

VIJAYARENGAN, P., MAHALAKSHMI, G. Zinc toxicity in tomato plants. **World Applied Sciences Journal**, v. 24, n. 5, p. 649-653, 2013. <http://10.5829/idosi.wasj.2013.24.05.2249>

WANG, X. P., LI, Q. Q., PEI, Z. M., WANG, S. C. Effects of zinc oxide nanoparticles on the growth, photosynthetic traits, and antioxidative enzymes in tomato plants. **Biologia Plantarum**, 2018. <http://doi:10.1007/s10535-018-0813-4>

WHITE, P. J., BROADLEY, M. R. Physiological limits to zinc biofortification of edible crops. **Frontiers in Plant Science**, v. 2. 2011. <http://doi:10.3389/fpls.2011.00080>

YANG, H. F., ZHANG, J., LI, J. L. Physiological response to zinc pollution of rape (*Brassica chinensis* L.) in paddy soil ecosystem. **Advanced Materials Research**, v. 356–360, p. 39–43, 2012. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.356-360.39>

ZENG, H., WU, H., YAN, F., YI, K., ZHU, Y. Molecular regulation of zinc deficiency responses in plants. **Journal of Plant Physiology**, v. 261, p. 153419, 2021. <http://doi:10.1016/j.jplph.2021.153419>

ZHANG, Y., WANG, Y., DING, Z., WANG, H., SONG, L., JIA, S., MA, D. Zinc stress affects ionome and metabolome in tea plants. **Plant Physiology and Biochemistry**, v. 111, p. 318–328, 2017. <http://doi:10.1016/j.plaphy.2016.12.014>

5. CAPÍTULO II – QUAL O COMPORTAMENTO DE PLANTAS DE TOMATE QUANDO EXPOSTAS A CONDIÇÕES TRANSITÓRIAS ENTRE SUFICIÊNCIA E EXCESSO DE ZINCO?

Resumo: Este estudo avaliou o impacto de doses de Zn sobre atributos bioquímicos e de crescimento em plantas de tomate (*Solanum lycopersicum* L). As plantas foram cultivadas em condição de casa de vegetação em dois solos agrícolas [Cambissolo Húmico (CH) e Nitossolo Bruno (NB)]. Foram avaliadas as seguintes doses de Zn: CH: controle, 20,0, 40,0 e 60,0 mg kg⁻¹; NB: controle, 40,0, 80,0 e 120,0 mg kg⁻¹. Foram avaliados os teores minerais em parte aérea das plantas (Zn, Ca, Mg, Fe, Cu, Mn e P), trocas gasosas, índice SPAD, atividade das enzimas superóxido dismutase (SOD) e peroxidase (POD), conteúdo de peróxido de hidrogênio, peroxidação lipídica, parâmetros de crescimento de raízes e produção de massa seca de parte aérea e raiz. As plantas acumularam Zn em seus tecidos de parte aérea dose dependente em ambos os solos. Este incremento de Zn nos tecidos estimulou aumento da atividade das enzimas SOD e POD em plantas cultivadas em CH, com incremento de peróxido de hidrogênio e de peroxidação lipídica e, conseqüente inibição da produção de massa seca, fotossíntese e crescimento de raízes. Os tratamentos de 20 mg kg⁻¹ (CH) e 40 mg kg⁻¹ (NB) não foram eficientes em promover o crescimento e desenvolvimento das plantas. Assim, este estudo indicou que a aplicação de Zn, com fins de nutrição, deve ser criteriosamente avaliada por seus efeitos serem variáveis, sem benefício em doses consideradas suficientes e possivelmente tóxico em doses elevadas em plantas de tomate.

5.1 INTRODUÇÃO

O zinco (Zn) é um micronutriente essencial para a nutrição de plantas e é componente fundamental de vários sistemas enzimáticos distintos. Ele é o único micronutriente relatado como essencial para todas as seis classes de enzimas (Sandeep et al., 2019), e tem contribuição em diversos processos das plantas, tais como: crescimento, síntese de proteínas, produção de energia, ativação enzimática, expressão gênica, fotossíntese, atividade de fitormônios, metabolismo de carboidratos, fertilidade e defesa contra doenças (Gai et al., 2017, Noulas et al., 2018, Faizan e Hayat, 2019). Ainda, em plantas de tomate, a nutrição adequada de Zn demonstrou melhorar significativamente a frutificação, número de frutos por planta, comprimento e diâmetro de frutos e sementes por fruto (Harris e Mathuma, 2015). Também foram observadas melhorias em características qualitativas, tais como aumento do teor de sólidos solúveis, clorofilas, vitamina C, flavonoides, carotenoides e fenólicos (Sardar et al., 2021).

Teores adequados de Zn são fundamentais para o bom funcionamento das plantas, contudo, por se tratar de um micronutriente, a transição entre nutrição e toxicidade pode ser muito tênue. Em condições de deficiência de Zn o metabolismo de proteínas, carboidratos, auxinas e o correto funcionamento dos processos reprodutivos são afetados negativamente (Sadeghzadeh, 2013). Ainda, a deficiência pode gerar estresse fisiológico em função das inúmeras atribuições do Zn no metabolismo das plantas, o que resulta em diminuição significativa do crescimento e produção (Rehman et al., 2017). Por sua vez, teores elevados de Zn também podem causar distúrbios fisiológicos, morfológicos e bioquímicos, que podem limitar o rendimento das plantas, pela inibição do crescimento e desenvolvimento das plantas (Garg e Shing, 2017). Os principais sintomas de toxicidade de Zn em plantas incluem clorose, redução do crescimento e da produção (Zhang et al., 2017). Podem também influenciar na absorção e translocação de íons essenciais, alterando o sistema homeostático e aumentando produção de espécies reativas de oxigênio (Kaur e Garg, 2021).

Embora o Zn não seja um metal redox ativo, ou seja, não está diretamente relacionado a reações de oxirredução, sua toxicidade pode ter como resultado dano

celular oxidativo e consequente ativação do sistema de defesa antioxidante. Muitos estudos têm demonstrado que o excesso de Zn induz o estresse oxidativo, promovendo a geração de espécies reativas de oxigênio (ERO's) ($^1\text{O}_2$, H_2O_2 , OH^* , O_2^{*-}) e a peroxidação lipídica (Gomes et al., 2013; Goodarzi et. al., 2020). Independente da via de produção, os ero's são altamente tóxicos em nível celular e sua concentração intracelulares deve ser controlada pelos sistemas de defesa antioxidantes (Kaur e Garg, 2021). Uma primeira linha de defesa é a ativação do sistema enzimático e não enzimático, composto por enzimas tais como peroxidase (POD) e superóxido dismutase (SOD) e compostos como o ascorbato, a glutathiona e o β -caroteno, que desempenham um importante papel na prevenção de danos as células das plantas (Kaya et al., 2018; Adrees et al., 2021).

A SOD, primeira enzima do mecanismo enzimático antioxidante contra as ERO's, atua na dismutação do O_2^* para H_2O_2 , o qual é então reduzido a água e oxigênio pela POD (Gill et al., 2015). Em situações de estresse por altos teores de metais, onde há grande produção de H_2O_2 , são formadas também grandes quantias de radicais hidroxila, que atacam os ácidos graxos poli-insaturados nas membranas, com formação de radicais peroxila (Tirani e Haghjou, 2019). Por sua vez, este produto gera peróxidos lipídicos, que causam danos generalizados e desintegração das membranas. Como produtos da decomposição dos peróxidos lipídicos há a formação de uma variedade de aldeídos, e entre estes se inclui o MDA, que é utilizado como marcador analítico da peroxidação lipídica (Packer e Cadenas, 2013).

Sabendo que o Zn pode apresentar um comportamento variável, transitando entre a essencialidade e a toxicidade, este estudo teve como objetivo avaliar o efeito de doses de Zn (adequadas e excessivas) sobre atributos bioquímicos e de crescimento em plantas de tomate (*Solanum lycopersicum* L), cultivadas em Cambissolo húmico (CH) e Nitossolo bruno (NB).

5.2 MATERIAL E MÉTODOS

5.2.1 Material vegetal e tratamentos

O experimento foi conduzido em uma estufa de pesquisa protegida por policarbonato, localizada na Universidade do Estado de Santa Catarina, Lages, SC,

Brasil. No presente estudo foram utilizados dois solos distintos identificados como Cambissolo Húmico (CH) e Nitossolo Bruno (NB) coletados a uma profundidade de até 0,2 m e algumas das suas propriedades físicas e químicas são apresentadas na tabela 1. Os tratamentos aplicados aos solos foram os seguintes: CH: Controle (0 mg kg⁻¹), 20, 40 e 60 mg kg⁻¹; NB: Controle (0 mg kg⁻¹), 40, 80 e 120 mg kg⁻¹ de Zn. Como padrão de identificação os tratamentos foram definidos como: controle, T0,5, T1,0 e T1,5. A dose 40 mg kg⁻¹ e a de 80 mg kg⁻¹ de Zn foram definidas com críticas para o tomateiro no estudo I. A fonte de Zn utilizada foi o sulfato de Zn (ZnSO₄) e as quantidades de enxofre (S) fornecidas em cada um dos tratamentos foram balanceadas com S elementar.

Tabela 1. Atributos químicos e físicos de um Nitossolo Bruno (NB) e um Cambissolo Húmico (CH) utilizados no estudo (0-20 cm).

Solo	Argila	COT ⁽³⁾	V ⁽⁴⁾	Ca ²⁺	Mg ²⁺	CTC _{pH7}	K ⁺	P ⁽⁵⁾	Cu ²⁺	Zn ²⁺
	----- % -----			----- cmol _c kg ⁻¹ -----				----- mg dm ⁻³ -----		
NB⁽¹⁾	47,5	2,75	5,8	0,92	0,64	35,78	195,7	12,1	2,8	2,9
CH⁽²⁾	18,2	1,83	6,5	1,12	0,62	28,25	82,0	14,8	5,5	2,1

(1)NB: Nitossolo Bruno; (2) CH: Cambissolo Húmico; (3)COT: Carbono Orgânico total; (4)V: Saturação por Bases;(5)P: Fósforo extraído por Mehlich 1.

As unidades experimentais consistiram em vasos plásticos com volume de 5 L e nestes foram acondicionados 3 kg de solo. Com base na análise de cada um dos solos foi realizada a correção do pH com base na recomendação para a cultura e aplicado igualmente em todos os vasos os teores recomendados de fosforo e potássio em pré-plantio (Epagri, 2016), utilizando como fonte superfosfato triplo e cloreto de potássio. Para as adubações pós-plantio, realizadas semanalmente, foram utilizados os reagentes nitrato de potássio e nitrato de cálcio como fontes de nitrogênio, potássio e cálcio. Nas unidades experimentais foram plantadas mudas de tomate da variedade Santa Clara com tamanho médio de 15±2 cm e a umidade do solo mantida em 85% de sua capacidade de campo com base no procedimento de pesagem e aplicação de água destilada. Oito dias após o plantio das mudas, quando elas já se encontravam estabelecidas nas unidades, os tratamentos foram aplicados em superfície, sendo o ZnSO₄ + S aplicados em forma sólida. Aos 15 dias após a aplicação dos tratamentos foram coletadas amostras de solo para quantificação dos teores disponíveis de Zn na solução do solo, sendo realizada a extração de Zn por HCl 0,1 M (Tedesco et al., 1995) e quantificados os teores no extrato por espectrometria de absorção atômica (Perkin Elmer AAnalyst).

5.2.2 Parâmetros Fisiológicos

As plantas foram cultivadas em ambiente parcialmente controlado com manutenção da temperatura na faixa de 15 a 25 °C e umidade do ar maior que 80 %. A luminosidade não foi controlada, sendo as plantas expostas a luz natural. A posição dos vasos de cultivo foi alterada semanalmente para reduzir quaisquer efeitos da variação localizada de temperatura e luminosidade. As medidas de índice SPAD e atributos relacionados a trocas gasosas foram realizadas 37 dias após a aplicação dos tratamentos. A avaliação do índice SPAD (intensidade da cor verde das folhas) foi feita através de um clorofilômetro portátil (SPAD 502; Konica Minolta®, Tóquio, Japão). Para tanto, foram selecionadas folhas totalmente expandidas, sem injúrias mecânicas ou sintomas de doenças visíveis. As mensurações foram realizadas em três folhas por planta, no período entre às 09 e 10 horas da manhã. Os atributos de trocas gasosas foram determinados com um sistema analisador de gases por infravermelho portátil (IRGA), equipado com uma câmara foliar com fonte de LED (LI-6400XT Portable Photosynthesis and Fluorescence System; LICOR, Lincoln, EUA). A área da câmara foliar do LI-6400XT foi de 6 cm². O IRGA foi ajustado manualmente e os níveis de referência de CO₂ e H₂O tornaram-se estáveis antes da realização das medições. Uma folha com tamanho adequado, sem injurias ou sinais de doenças, foi fixada na câmara foliar e após cerca de 2 minutos, quando a taxa de assimilação de CO₂ estabilizou, os seguintes atributos foram medidos: taxa fotossintética (*A*), condutância estomática (*g_{sw}*), concentração interna de CO₂ (*C_i*) e transpiração (*E*).

5.2.3 Atividade das enzimas SOD e POD, conteúdo de H₂O₂ e peroxidação lipídica

Após a avaliação dos atributos fisiológicos, amostras de folhas das plantas de tomate foram coletadas para análise das enzimas superóxido dismutase (SOD), peroxidase (POD) e do conteúdo de peróxido de hidrogênio (H₂O₂) e malondialdeído (MDA; peroxidação lipídica). Cinco folhas por planta, sem injurias mecânicas, sintomas de doenças ou que tenham sido utilizadas em análises anteriores, foram

selecionadas, destacadas das plantas e maceradas, utilizando gral e pistilo de cerâmica e nitrogênio líquido. Após maceração, as amostras foram colocadas em tubos e levadas até laboratório para armazenamento em ultrafreezer e posterior avaliação das atividades. Todo procedimento entre campo e laboratório foi realizado com refrigeração das amostras em caixa térmica de isopor com gelo. Em laboratório foi então determinada a atividade das enzimas SOD e POD e o conteúdo de H_2O_2 e MDA. Todos os processos durante as análises foram realizados na temperatura de 4 °C.

Para a extração da POD e SOD foi seguido o procedimento descrito por Hammerschmidt et al. (1982), com modificações. Em uma massa de 5 g da amostra macerada em nitrogênio líquido foi adicionado 5 mL de tampão de fosfato de potássio, 0,1 M (pH 7,0), contendo 1 mM de polivinilpirrolidona insolúvel e 1 mM de ácido etilenodiamino tetra-acético (EDTA) para cada 100 mL de tampão, homogeneizado em ultraturrax, por 1 minuto, sendo após adicionado 0,1% de triton. Para determinação da atividade das enzimas foi utilizado o método descrito por Giannopolitis e Reis (1977), com modificações. Foram utilizados três tubos, sendo que no primeiro foi determinado o branco, aonde uma alíquota de 50 μ L de extrato bruto da amostra de folha, foi adicionada à 2,95 ml do meio de reação, composto pelo tampão de fosfato de potássio 50 mM, pH 7,8, metionina 13 mM, NBT 75 μ M, EDTA 100 nM e riboflavina 2 Nm, e permaneceram em reação cobertos por papel alumínio durante 10 minutos. O segundo tubo definido como controle recebeu a solução de trabalho apenas, permaneceu pelo mesmo tempo de reação, porém sem receber luz. Já o terceiro tubo recebeu uma solução de trabalho e as amostras dos tratamentos, permaneceram por 10 min em reação sob luz. Para a leitura das amostras foi então utilizado um leitor de microplacas (PerkinElmer, EnSpire, EUA) no comprimento de onda de 560 nm. O extrato foi mantido em repouso por 15 min a 8°C e após centrifugado a 12.000 rpm por 10 min a 4°C em ultracentrifuga (Hitachi, CR22N, Japão), 0,30 ml do sobrenadante foi usado para ensaio enzimático. Imediatamente após a adição de 2,7 ml de uma mistura reacional contendo tampão fosfato de potássio: guaiacol: H_2O_2 (5 ml: 0,0125 ml: 0,0163ml), foi definida a atividade enzimática como o aumento da absorbância por minuto a 470 nm. Os resultados de atividades das enzimas SOD e POD foram expressos em $U^{-1} ml^{-1} mg$ de proteína⁻¹ e $DO^{-1} mg$ de proteína⁻¹, respectivamente.

A quantificação do H_2O_2 foi realizada de acordo com o método proposto por Gay, Collins e Gebicki (1999) e Hermes- Lima, Willmore Storey (1995), com

modificações. Um grama de amostra macerada em nitrogênio líquido foi homogeneizada em 10 mL de metanol a 0°C, com auxílio de ultraturrax Heidolph, modelo D-91126. Com as amostras já homogeneizadas as mesmas foram centrifugadas em ultracentrifuga (Hitachi, CR22N, Japão) em 10000 rpm e a 4 °C, por 10 minutos. Em seguida uma alíquota de 35µL do sobrenadante foi retirada e adicionada em um recipiente contendo 500 µL de sulfato de amônio ferroso e 200 µL de ácido sulfúrico, permanecendo em reação por 5 minutos no escuro. Após este tempo foi adicionado 100 µL de xylenol laranja (1 mM) e a mistura foi mantida no escuro por 20 minutos, quando então procedeu-se à leitura da absorbância das amostras a 560 nm em leitora de microplacas (PerkinElmer, EnSpire, EUA). Os resultados foram expressos em µmol g⁻¹.

A quantificação de MDA foi realizada conforme procedimento descrito por Heath e Packer (1968) com modificações. Assim, 0,3 g de amostra foram maceradas em 2 ml de ácido tricloroacético (TCA; 0,1%), e centrifugados a 10.000 rpm em ultracentrifuga (Hitachi, CR22N, Japão) por 15 minutos a 4 °C. Do sobrenadante foi retirada uma alíquota de 350 µL e adicionado em um tubo contendo 1,5 mL de solução com TCA (20%) e ácido tiobarbitúrico (0,5%). Estas amostras foram mantidas por 25 minutos em temperatura de 90-95 °C e, em seguida, colocadas em banho de gelo para cessar a reação. Após isso, as amostras foram centrifugadas a 3.000 rpm por 10 minutos e quantificadas nos comprimentos de onda de 400, 532 e 600 nm com auxílio de um leitor de microplacas (modelo EnSpire, PerkinElmer, USA). Os resultados de peroxidação de lipídeos foram expressos em nmol MDA g⁻¹ MF.

5.2.4 Características morfológicas

As avaliações de massa seca de parte aérea (MSPA) e características do sistema radicular, como comprimento, diâmetro, volume, área superficial e massa seca de raiz (MSR) foram realizadas 45 dias após o plantio as plantas foram colhidas. No momento da colheita, as plantas tiveram suas raízes cuidadosamente separadas do solo e as plantas divididas em parte aérea e raízes. Ambas as porções foram lavas com água destilada para limpeza de resíduos depositados nas folhas e restos de frações de solo que poderiam estar nas raízes. A parte aérea, contendo folhas e caules, foi levada para estufa e seca á 65 °C até peso constante para determinação da MSPA. Já as raízes foram armazenadas em álcool 70% e posteriormente

submetidas à digitalização em scanner profissional, e as imagens processadas através do programa computacional WinRhizo para determinação de comprimento, diâmetro, volume, área superficial de raiz. Após o procedimento as raízes foram secas em estufa e pesadas para a obtenção da MSR.

5.2.5 Teores Minerais

Após seca e pesada a fração parte aérea das plantas foi então moída em moinho de bancada até a obtenção de pó fino com máxima homogeneidade possível. Nesta matriz de planta foi aplicada o método de digestão 3050B (USEPA) com aquecimento em bloco digestor a 95°C (± 5 °C) para quantificação dos teores minerais totais de Zinco (Zn), Cobre (Cu), Manganês (Mn), Ferro (Fe), Fósforo (P), Cálcio (Ca) e Magnésio (Mg). Os teores minerais nas alíquotas foram determinados por espectrometria de emissão óptica com plasma indutivamente acoplado (ICP-OES) (Perkin Elmer, Optima[®] 8300, EUA). Para certificação da qualidade do método e do procedimento foram utilizadas oito provas em branco em todas as avaliações para a determinação do limite de detecção do instrumento. A taxa de recuperação do método de digestão foi validada pela utilização de amostras referência SRM 1573a (folhas de tomate), certificada pela National Institute of Standards and Technology (NIST) e RM-Agro E1001a (*Brachiaria brizantha cv Marandu*) certificada pela EMBRAPA.

5.2.6 Análise estatística

O delineamento experimental utilizado foi o inteiramente casualizado e cada tratamento foi composto de três repetições, sendo cada unidade experimental constituída de uma planta de tomate. Os dados foram submetidos à ANOVA e as médias comparadas pelo teste de Tukey ($p < 0,05$), com o auxílio do software SISVAR (Ferreira, 2011).

5.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os teores de Zn disponíveis na solução do solo, conforme esperado, foram dose dependentes. As maiores doses aplicadas ao solo proporcionaram maiores

teores disponíveis de Zn na solução dos dois solos, com clara diferenciação entre os tratamentos aplicados.

Tabela 2 – Teores disponíveis de Zn e porcentagem de Zn disponível em relação ao tratamento aplicado na solução de um Cambissolo Húmico (CH) e um Nitossolo Bruno (NB) em função de quatro tratamentos de Zn aplicados.

Doses de Zn ¹	N. B.	Disponível	C. H.	Disponível
	mg dm ⁻³	%	mg dm ⁻³	%
Controle	2,9 ^d	-	2,1 ^d	-
T 0,5	24,7 ^c	61,6	17,2 ^c	86,1
T 1,0	47,5 ^b	59,3	32,4 ^b	80,9
T 1,5	66,1 ^a	55	44,4 ^a	74,0
Média	-	58,7	-	80,4

Os valores são médias de três repetições. Médias com a mesma letra (s) na mesma coluna não são estatisticamente diferentes em $p < 0,05$ pelo teste Tukey. ¹Teores de Zn aplicados em cada solo em mg kg⁻¹: Controle: 0,0 em Ch e NB; T0,5: 20,0 em CH e 40,0 em NB; T1,0: 40,0 em CH e 80,0 em NB; T1,5: 60,0 em CH e 120 em NB.

De maneira geral, o NB apresentou teores disponíveis mais elevados que o CH (Tabela 3). Cabe ressaltar que os tratamentos aplicados ao NB foram duas vezes maiores que os aplicados ao CH, em função da dose de NCT, anteriormente descrito no material e métodos, observada pelos autores em experimento prévio. Ao observar quanto do Zn aplicado está disponível em relação a dose aplicada, pode-se identificar que o CH teve teores disponíveis maiores, cerca de 1,37 vezes em média, em comparação ao NB.

As concentrações de Zn (mg kg⁻¹ de planta) na MSPA de plantas de tomate, cultivadas em dois solos distintos, aumentou com o incremento das doses aplicadas (Figura 1). Além disso, observou-se forte correlação para ambos os solos entre teor disponível de Zn no solo e teor de Zn no tecido foliar (NB: 0,98; CH: 0,99).

O NB condicionou as plantas para acúmulo de maiores teores de Zn nos tecidos, em relação ao CH, em função da maior disponibilidade do mesmo na solução do solo. Plantas cultivadas neste solo tiveram incrementos significativos nos teores de Zn em função das doses, sendo que em relação ao controle os aumentos foram de 1,8, 2,2 e 2,8 vezes para os tratamentos T0,5, T1,0 e T1,5, respectivamente. Plantas cultivadas no solo CH apresentaram menor incremento de Zn foliar com maiores doses de Zn aplicado ao solo.

Tabela 3 - Coeficientes de correlação simples de Pearson entre as características teor de zinco nas folhas (Zn folha), zinco disponível no solo (Zn disp.), massa seca de parte aérea (MSPA) e massa seca de raiz (MSR) de plantas de tomate cultivadas em diferentes concentrações de Zn em dois solos.

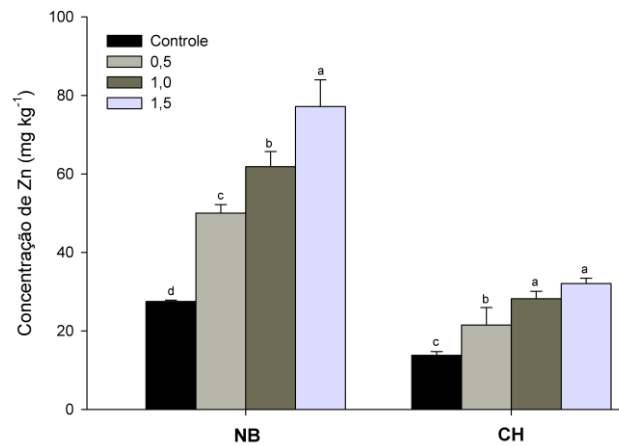
Nitossolo Bruno				
	Zn Folha	Zn Disp.	MSPA	MSR
Zn Foliar	1			
Zn Disp.	0,98**	1		
MSPA	-0,76**	-0,80**	1	
MSR	-0,72**	-0,79**	0,82**	1
Cambissolo Húmico				
	Zn Foliar	Zn Disp.	MSPA	MSR
Zn Foliar	1			
Zn Disp.	0,95**	1		
MSPA	-0,88**	-0,89**	1	
MSR	-0,85**	-0,85**	0,76**	1

**Significativo em 1 % de probabilidade de erro pelo teste t. Fonte: Elaborado pelo autor, 2022

Neste solo, plantas cultivadas no tratamento T0,5 acumularam cerca de 1,5 vezes mais Zn em relação ao controle, aquelas cultivadas no tratamento T1,0 acumularam 1,9 vezes e as cultivadas no tratamento T1,5 acumularam 2,2 vezes mais Zn em relação ao controle, sendo que não foram identificadas diferenças significativas entre T1,0 e T1,5 para plantas cultivadas em CH.

A atividade da SOD e POD em função da dose de Zn aplicada foi variável em função do tipo de solo (Figura 2 A, B). Em plantas cultivadas em CH houve aumento da atividade da SOD em T1,0 e T1,5, em relação ao controle e T0,5. Observou-se que houve aumento de atividade na ordem de 2,11 e 1,66 vezes para T1,0 e T1,5, respectivamente, em relação ao controle. Esta mesma enzima, em folhas de plantas cultivadas em NB, apresentou diminuição de atividade nos tratamentos T1,5 e T1,0, em relação aos tratamentos T0 e T0,5. Diferenças significativas não foram observadas entre controle e T0,5 e entre T1,0 e T1,5, em NB.

Figura 1 – Teor de Zn em folhas de tomateiro (*Solanum lycopersicum* L.) cultivados em Cambissolo Húmico (CH) e um Nitossolo Bruno (NB) expostas a quatro doses de Zn.



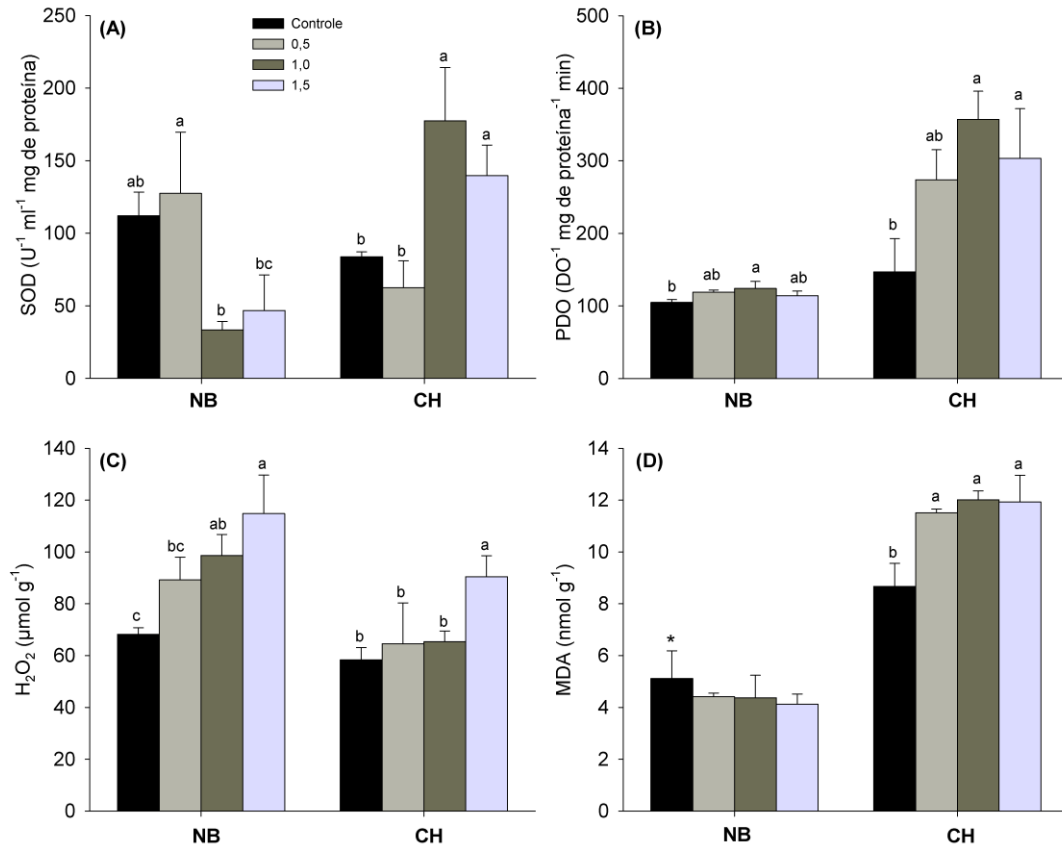
A barra de erro representa o desvio padrão e as médias separadas pelo teste Tukey em $P < 0,05$. Teores de Zn aplicados em cada solo em mg kg^{-1} : Controle: 0,0 em Ch e NB; T0,5: 20,0 em CH e 40,0 em NB; T1,0: 40,0 em CH e 80,0 em NB; T1,5: 60,0 em CH e 120 em NB.

Fonte: Elaborado pelo autor (2022)

A atividade da enzima POD em folhas de tomateiro cultivado em NB apresentou maior valor no tratamento T1,0, que foi 18,3 % superior a atividade da enzima em folhas de plantas controle (Figura 2B). Por sua vez, plantas cultivadas em CH tiveram acentuado aumento de atividade da enzimas, em relação controle, nos tratamentos T1,0 e T1,5, enquanto T0,5 apresentou um comportamento intermediário, sem diferir de todos os demais tratamentos. Para o CH o aumento de atividade da POD foi de 143% e 106% para T1,0 e T1,5, respectivamente, em relação ao controle.

Plantas cultivadas em NB e CH apresentaram incremento de H_2O_2 em função do incremento das doses de Zn (Figura 2C). Plantas cultivadas em NB apresentaram maior conteúdo de H_2O_2 nos tratamentos T1,0 e T1,5, em relação ao controle, com um incremento na ordem de 44,7% e 68,3 %, respectivamente. Também foi observada maior conteúdo de H_2O_2 em T1,5, em relação a T0,5, com valor de aproximadamente 28,7 % superior. Plantas cultivadas em CH apresentaram aumento no conteúdo de H_2O_2 apenas no tratamento com maior concentração de Zn (T1,5), o qual diferiu de todos os outros tratamentos, sem diferenças entre os demais tratamentos. O incremento em T1,5, em relação ao controle, por exemplo, foi de 54,9 % em CH. Os dados de MDA não foram influenciados pelos tratamentos naquelas plantas cultivadas em NB, mas em CH houve aumento da concentração deste indicador nos tratamentos com adição de Zn em relação ao controle.

Figura 2 – Efeito de doses de Zn na atividade de SOD (A), POD (B) e produção de H_2O_2 (C) e peroxidação lipídica (D) em plantas de tomate (*Solanum lycopersicum* L.) cultivadas em solos distintos.



A barra de erro representa o desvio padrão e as médias separadas pelo teste Tukey em $P < 0,05$. Teores de Zn aplicados em cada solo em $mg\ kg^{-1}$: Controle: 0,0 em Ch e NB; T0,5: 20,0 em CH e 40,0 em NB; T1,0: 40,0 em CH e 80,0 em NB; T1,5: 60,0 em CH e 120 em NB.

O índice SPAD, que tem forte correlação com o teor de clorofila nas folhas, reduziu com a aplicação do Zn em ambos os solos estudados (Tabela 4). Aquelas plantas cultivadas em NB demonstraram diferenças significativas entre o controle e T1,0 e T1,5, sendo que ocorreu uma diminuição dos valores observados para este índice na ordem de aproximadamente 7,3 % para ambos os tratamentos em relação ao controle. As plantas cultivadas em CH apresentam redução do índice SPAD, em relação ao controle, nos tratamentos com aplicação de Zn (redução de aproximadamente 6,2 %), os quais não diferiram entre si.

O incremento de Zn pela aplicação dos tratamentos gerou efeitos variáveis nos dados de taxa fotossintética líquida (A), condutância estomática e concentração

interna de CO₂ e transpiração (Tabela 4). A fotossíntese líquida, em tomateiros cultivados em NB, reduziu com a aplicação de Zn a partir de T1,0. Já para as plantas de tomate cultivadas em CH os efeitos negativos foram significativos apenas no T1,5, com diminuição aproximada de 17,1 % em relação ao controle (Tabela 4).

Tabela 4 – Efeito do Zn no índice SPAD, taxa fotossintética líquida (A), condutância estomática (gs), concentração interna de CO₂ (Ci) e transpiração (E) de plantas de tomate (*Solanum lycopersicum* L.) cultivadas em solos distintos.

Dose de Zn ¹	SPAD	A	gs	Ci	E
mg kg ⁻¹	-	μmol CO ₂ m ⁻² s ⁻¹	mmol H ₂ O m ⁻² s ⁻¹	μmol CO ₂ mol ⁻¹	mol H ₂ O m ⁻² s ⁻¹
Nitossolo Bruno					
Controle	60,5 ± 0,7 ^a	13,3 ± 0,8 ^a	1,19 ± 0,1 ^{ab}	422,9 ± 9,50 ^a	3,1 ± 0,6 ^a
T0,5	59,5 ± 1,0 ^{ab}	12,8 ± 0,7 ^a	1,66 ± 0,7 ^a	403,7 ± 25,8 ^{ab}	3,3 ± 0,5 ^a
T1,0	56,2 ± 2,0 ^b	11,3 ± 0,1 ^b	0,49 ± 0,1 ^{bc}	387,7 ± 2,60 ^b	2,8 ± 0,2 ^a
T1,5	56,1 ± 1,8 ^b	10,8 ± 0,3 ^b	0,46 ± 0,1 ^c	377,7 ± 10,1 ^b	2,9 ± 0,4 ^a
Cambissolo Húmico					
Controle	62,5 ± 1,2 ^a	15,2 ± 0,4 ^a	0,86 ± 0,3 ^a	389,5 ± 8,5 ^a	4,8 ± 0,8 ^a
T0,5	58,7 ± 1,3 ^b	15,2 ± 1,4 ^a	0,87 ± 0,3 ^a	384,2 ± 0,2 ^{ab}	4,8 ± 0,6 ^a
T1,0	58,5 ± 0,7 ^b	15,1 ± 0,8 ^a	0,96 ± 0,1 ^a	375,6 ± 3,1 ^b	5,1 ± 0,1 ^a
T1,5	58,6 ± 1,1 ^b	12,6 ± 0,3 ^b	1,27 ± 0,2 ^a	380,9 ± 1,2 ^{ab}	5,3 ± 0,2 ^a

Os valores são médias ± DP. Médias seguidas com letras diferentes na mesma coluna diferem entre si pelo teste Tukey p<0,05. ¹Teores de Zn aplicados em cada solo em mg kg⁻¹: Controle: 0,0 em Ch e NB; T0,5: 20,0 em CH e 40,0 em NB; T1,0: 40,0 em CH e 80,0 em NB; T1,5: 60,0 em CH e 120 em NB.

A condutância estomática foi reduzida significativamente entre o controle e T1,5 em cerca de 61,4 %. Houve também redução das leituras de gs quando comparamos T 0,5 com T 1,0 e T1,5, redução está de 70,5 % e 72,3 %, respectivamente. Já as plantas cultivadas em CH não apresentaram efeito significativo da aplicação de Zn sobre a gs.

A concentração interna de CO₂ foi afetada pelos tratamentos com presença de Zn (Tabela 4). Em NB foi observado redução da Ci, em relação ao controle, em T1,0 e T1,5, com diminuição de 8,3 % e 10,7 %, respectivamente. Já em CH apenas T1,0 diferiu do controle, apresentando valores mais baixos de Ci, com diminuição de 3,6 %. Os dados de transpiração não demonstraram diferenças em função da aplicação dos tratamentos.

As concentrações foliares de P reduziram com a aplicação de Zn em ambos os solos, e Fe apenas nas plantas cultivadas em NB e no tratamento T1,5 (Tabela 5). Já os teores de Ca, Mg, Cu e Mn não foram influenciado pela aplicação de Zn em ambos os solos.

Tabela 5 – Teores Minerais de Cálcio, Magnésio, Ferro, Cobre, Manganês e Fósforo em folhas de tomate (*Solanum lycopersicum* L.) cultivadas em um cambissolo húmico e um nitossolo bruno expostas a doses crescentes de Zn.

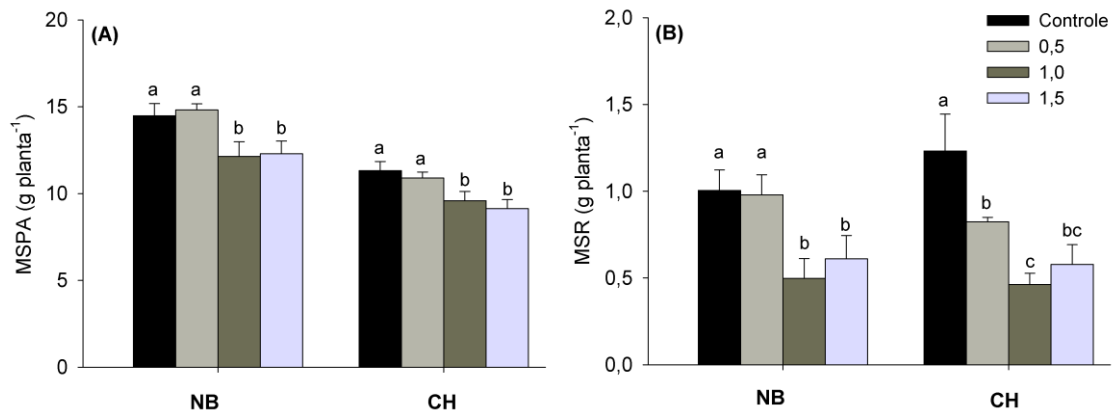
Dose de Zn ¹ mg kg ⁻¹	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Fe ²⁺	Cu ²⁺	Mn ²⁺	P
	----- mg kg ⁻¹ -----					
Nitossolo Bruno						
Controle	1394 ± 98	1009 ± 146	155 ± 19 ^a	8,9 ± 2,1	37,4 ± 9,0	169 ± 5,8 ^a
T0,5	1571 ± 41	1119 ± 65	161 ± 17 ^a	10,5 ± 1,0	55,4 ± 10	134 ± 6,6 ^b
T1,0	1585 ± 146	1183 ± 129	123 ± 12 ^{ab}	11,6 ± 1,8	65,1 ± 19	137 ± 9,7 ^b
T1,5	1435 ± 169	981 ± 125	96 ± 10 ^b	9,6 ± 2,5	48,9 ± 11	125 ± 6,9 ^b
Cambissolo Húmico						
Controle	1318 ± 185	1051 ± 103	183 ± 55	8,3 ± 1,9	47,2 ± 4,0	139 ± 12 ^a
T0,5	1312 ± 228	1085 ± 183	177 ± 38	10,8 ± 2,0	46,7 ± 5,3	131 ± 9 ^{ab}
T1,0	1311 ± 123	1033 ± 103	142 ± 20	10,8 ± 0,6	52,6 ± 6,6	110 ± 9 ^b
T1,5	1269 ± 41	1049 ± 20	143 ± 26	10,3 ± 0,4	59,4 ± 2,9	112 ± 9 ^b

Os valores são médias ± DP. Médias com a mesma letra (s) na mesma coluna não são estatisticamente diferentes em $p < 0,05$ pelo teste Tukey. ¹Teores de Zn aplicados em cada solo em mg kg⁻¹: Controle: 0,0 em Ch e NB; T0,5: 20,0 em CH e 40,0 em NB; T1,0: 40,0 em CH e 80,0 em NB; T1,5: 60,0 em CH e 120 em NB.

O teor de P nos tecidos foliares de plantas de tomate expostas ao Zn foi influenciado negativamente em função das doses aplicadas no NB (Tabela 5). As plantas cultivadas com a aplicação de T0,5, T1,0 e T1,5 Zn acumularam cerca de 20,0 %, 19,0 % e 26,0 % menos P em relação ao controle, respectivamente. As plantas cultivadas em CH também apresentaram diminuição da capacidade de acúmulo de P nos tecidos foliares, porém somente a partir de T1,0. É possível observar que as plantas expostas aos tratamentos T1,0 e T1,5 tiveram diminuição dos teores de P de 20,1% e 19,5 %, respectivamente, em relação ao controle.

A produção de massa seca de raiz e de parte aérea das plantas de tomate expostas aos tratamentos foi influenciada significativamente pelos tratamentos em ambos os solos estudados (Figura 3 A, B). A aplicação de Zn nas doses de T1,0 e T1,5 reduziu a MSPA, em ambos os solos, em relação aos tratamentos controle e T0,5, que não diferiram entre si. No NB houve redução na ordem de 15,0 % entre o grupo controle e 0,5 e os tratamentos 1,0 e 1,5 (Figura 3A). Para as plantas cultivadas em CH foi observada uma redução aproximada de 16,5 % e 19,3 % entre o controle e T1,0 e T1,5, respectivamente. Foi observada forte relação entre MSPA e os teores disponíveis de Zn na solução do solo CH (0,94) e NB (0,75).

Figura 3 – Produção de massa seca de parte aérea (MSPA) (A) e massa seca de raiz (MSR) (B) de plantas de tomate (*Solanum lycopersicum* L.) cultivadas em dois solos distintos expostas a diferentes teores de Zn.



A barra de erro representa o desvio padrão e as médias separadas pelo teste de LSD em $P < 0,05$. Teores de Zn aplicados em cada solo em mg kg^{-1} : Controle: 0,0 em Ch e NB; T0,5: 20,0 em CH e 40,0 em NB; T1,0: 40,0 em CH e 80,0 em NB; T1,5: 60,0 em CH e 120 em NB.

A produção de MSR foi alterada pela presença dos tratamentos com Zn, especialmente T1,0 e T1,5 (Figura 3B). Para as plantas cultivadas em NB foi observado menor MSR em T1,0 e T1,5, que não diferiram entre si. Plantas cultivadas em T1,0 e T1,5 apresentaram redução de 50,0 % e 39,0% na MSR em relação ao controle. As plantas cultivadas em CH apresentaram um decréscimo na MSR de aproximadamente 1,5, 2,7 e 2,2 vezes para T0,5, T1,0 e T1,5, respectivamente, em relação ao controle. Diferenças também foram observadas entre T0,5 e T1,0, com redução de 43,7 % no T1,0 em relação a T0,5. A MSR apresentou correlação significativa com os teores disponíveis de Zn no solo, sendo que para CH foi de 0,82 e para NB de 0,76.

O comprimento de raiz foi influenciado negativamente pela presença dos tratamentos em ambos os solos estudados especialmente na presença dos tratamentos T1,0 e T1,5. Em NB o comprimento de raiz foi menor nos tratamentos T1,0 e T1,5, onde é possível observar diminuição de 25,6 % e 23,4 %, respectivamente, em relação ao controle. As plantas cultivadas em CH apresentaram menor comprimento de raiz em todos os tratamentos com aplicação de Zn, sem diferença entre eles. Plantas cultivadas em solo que recebeu os tratamentos T0,5,

T1,0 e T1,5 apresentaram redução no comprimento das raízes de 30,4 %, 29,8 % e 31,3 %, respectivamente, em relação ao controle.

Tabela 6 – Arquitetura radicular de plantas de tomate (*Solanum lycopersicum* L.) expostas a doses de Zn crescentes cultivadas em um Cambissolo Húmico e um Nitossolo Bruno.

Dose de Zn ¹ mg kg ⁻¹	Comprimento	Área Superficial	Diâmetro	Volume
	cm	cm ⁻²	mm	cm ⁻³
Nitossolo Bruno				
Controle	833 ± 75 ^a	97,8 ± 10 ^a	0,40 ± 0,1 ^a	10,5 ± 1,3 ^a
T 0,5	812 ± 57 ^a	100,0 ± 4,6 ^a	0,41 ± 0,1 ^a	10,3 ± 1,1 ^a
T 1,0	619 ± 75 ^b	71,8 ± 4,8 ^b	0,41 ± 0,1 ^a	8,2 ± 0,3 ^{ab}
T 1,5	638 ± 15 ^b	71,7 ± 6,3 ^b	0,41 ± 0,1 ^a	8,0 ± 0,3 ^b
Cambissolo Húmico				
Controle	799 ± 27 ^a	85,8 ± 1,4 ^a	0,41 ± 0,1 ^a	10,7 ± 1,6 ^a
T 0,5	556 ± 70 ^b	82,9 ± 1,5 ^a	0,42 ± 0,1 ^a	9,3 ± 1,1 ^{ab}
T 1,0	561 ± 14 ^b	72,8 ± 1,4 ^b	0,41 ± 0,1 ^a	7,6 ± 0,4 ^b
T 1,5	549 ± 32 ^b	76,4 ± 3,6 ^b	0,41 ± 0,1 ^a	7,5 ± 0,6 ^b

Os valores são médias ± DP. Médias com a mesma letra (s) na mesma coluna não são estatisticamente diferentes em $p < 0,05$ pelo teste Tukey. ¹Teores de Zn aplicados em cada solo em mg kg⁻¹: Controle: 0,0 em Ch e NB; T0,5: 20,0 em CH e 40,0 em NB; T1,0: 40,0 em CH e 80,0 em NB; T1,5: 60,0 em CH e 120 em NB.

A área superficial das raízes foi influenciada negativamente pela presença dos tratamentos T 1,0 e T 1,5 com Zn em ambos os solos estudados (Tabela 6). Em ambos os solos, a menor área superficial de raízes foi observada nos tratamentos T1,0 e T1,5. No NB a redução foi de aproximadamente 26,5 % em relação ao controle. Já as plantas cultivadas em CH, a diminuição na área superficial de raízes foi de 15,1 % e 10,9 % nos tratamentos T1,0 e T1,5, respectivamente, em relação ao controle.

O volume radicular de plantas cultivadas em NB diminuiu em T1,5, em relação ao controle e T0,5. Esta redução de volume foi da ordem de 23,8 % entre o controle e T1,5. Já plantas cultivadas em CH apresentaram menor volume radicular em T1,0 e T1,5, em relação ao controle, com redução de 29,9 %. Para o diâmetro médio não houve diferença entre tratamentos, em ambos os solos.

5.4 DISCUSSÃO

Os resultados evidenciam diferenças notáveis na disponibilidade de Zn no solo e nos teores de Zn nos tecidos de parte aérea das plantas de tomate em função dos tratamentos aplicados e do tipo de solo cultivado. Em geral, se tem conhecimento que fatores como teor de matéria orgânica, teor de argila e pH tem forte influência na disponibilidade de metais na solução do solo, tal como o Zn (Kabata-Pendias, 2011; Rajput et al., 2018). O teor de argila e de M.O. do NB era superior ao observado no CH, e mesmo o NB recebendo doses duas vezes maiores que as do CH, os teores totais disponíveis não foram duas vezes maiores (Tabela 3). Sabe-se que as argilas têm capacidade de reter maiores teores de Zn, e conseqüentemente diminuir a disponibilidade na solução do solo e às plantas, uma vez que as argilas adsorvem os íons de Zn, tanto por troca iônica como por adsorção específica (Shi et al., 2018). Outros estudos têm demonstrado que a matéria orgânica do solo tem efeito sobre os metais no solo, diminuindo a capacidade de absorção e a disponibilidade de Zn em função do incremento da mesma no solo (Diagboya et al., 2015; Refaey et al, 2017). A fração de Zn disponível na solução do solo foi maior no NB em função da dose mais elevada que o mesmo recebeu, mas, em relação a dose aplicada, a quantidade relativa disponível, em termos de porcentagem do que foi aplicado, os valores observados em CH foram mais elevados, o que valida o fato de o NB ter maior capacidade de adsorção do elemento em função da maior fração argila e teor de M.O.

A disponibilidade de nutrientes na solução do solo é um fator chave e que tem alta correlação com o acúmulo de nutrientes nos materiais vegetais (Kaur e Garg, 2021). Para a movimentação do Zn absorvido nas raízes até a parte aérea o fluxo de massa é o principal mecanismo utilizado pelas plantas, e acredita-se que o Zn forme complexos associado com aminoácidos e ácidos orgânicos para facilitar este transporte (Balafrej et al., 2020). Porém, antes da absorção do metal pelas plantas, outros fatores podem influenciar amplamente a quantidade mobilizada no sistema, entre eles o tipo de solo e a fonte de Zn. Obrador et al (2022) demonstraram que o tipo de solo tem alta influência na disponibilidade de Zn para a absorção pelas plantas, independente da fonte de Zn utilizada. Estes autores relatam que a dose de 20 mg kg⁻¹ de Zn foi capaz de incrementar teores adequados de Zn em plantas de beterraba e ervilha, porém somente em solo ácido (pH:5,4; Argila: 18,0%). Em solo calcário (pH: 8,5; Argila: 39%) este resultado não foi observado, independente da fonte de Zn utilizada. Neste trabalho, os teores de Zn na parte aérea das plantas de tomate tiveram alta correlação com os teores disponíveis na solução do solo (NB: 0,99; CH: 0,98),

independentemente do tipo de solo. Contudo, teores disponíveis mais elevados, como os observados em NB, resultaram em maiores teores acumulados e efeitos mais pronunciados destes altos teores.

O Zn em níveis tóxicos, representado neste estudo pelos tratamentos T1,0 e T1,5, influenciou negativamente vários atributos de crescimento das plantas, como MSR e MSPA e características de raiz, como comprimento, área superficial e volume de raiz, sugerindo que níveis tóxicos de Zn no ambiente podem ser um forte limitante a produtividade (Garg e Singh, 2018; Almendros et al., 2022). Estudos anteriores sugeriram redução no crescimento e produtividade de culturas como trigo (Du et al., 2019) e arroz (Mehrabanjoubani et al., 2014), sob toxicidade de Zn.

A alteração em atributos de crescimento em plantas de tomate, observadas neste estudo, podem ser resultado do dano oxidativo induzido por Zn, indicado principalmente pela maior concentração de H_2O_2 , em plantas cultivadas em ambos os solos, e MDA, em plantas cultivadas em CH (Figura 2 C, D). Possivelmente os danos oxidativos, induzidos pela toxicidade de Zn, prejudicaram a maquinaria fotossintética, o que levou a inibição do acúmulo de MSPA e MSR. A redução no índice SPAD, que é um forte indicador do teor de clorofilas (Shibaeva et al., 2020), pode estar associada aos danos causados pelas EROs, mas também podem ser resultado da diminuição da expressão de genes envolvidos na síntese de clorofila (por exemplo, Clorofila A Oxigenase, Clorofila Sintase) e de genes que envolvem a expressão de estruturas do fotossistema (por exemplo, Fotossistema I subunidade D-2, Fotossistema I subunidade E-2, Fotossistema I subunidade K) ou de ambos (Wang et al., 2016). Os resultados de índice SPAD, e taxa fotossintética líquida apoiam esta ideia, pois são significativamente reduzidos em presença de excesso de Zn (Tabela 4).

O incremento das concentrações de Zn no solo aumentou significativamente as concentrações de Zn no tecido foliar, o que resultou em diminuição da biomassa, de crescimento radicular e de A_g s e C_i , juntamente com alterações na atividade de enzimas antioxidantes. Além disso, a concentração elevada de Zn competiu com a absorção de nutrientes, especialmente Fe e P, efeito observado também por Jain et al. (2013). Estes resultados são apoiados pelo trabalho de Feigl et al. (2019), que observaram influência negativa de teores elevados de Zn (500 ppm) em raízes de plantas de *B. napus* quanto ao crescimento, alteração na homeostase de microelementos, aumento na produção de EROs e ainda alterações em características radiculares. Estes autores também avaliaram a exposição de plantas

a menor concentração de Zn (10 ppm) e, de maneira global, os efeitos foram inexistentes ou favoráveis à planta, dependendo da variável analisada. Resultado semelhante era esperado no presente estudo com a exposição das plantas a T0,5, considerado baixa exposição ao Zn. Contudo, possivelmente, este tratamento ainda expos as plantas a teores relativamente elevados, pois foram observados alguns resultados negativos para o crescimento de plantas de tomate, tal qual como o aumento do conteúdo de MDA, diminuição das leituras de SPAD, da MSR e do comprimento radicular em CH, e diminuição dos teores de P em ambos os solos. Outro efeito que também foi observado em condições adversas ao crescimento das plantas, tal qual o estresse por Zn, foi o fechamento estomático, com conseqüente limitação a absorção e fixação de CO₂. Esta condição ainda pode desencadear alterações no processo fotossintético e contribuir para maior produção de EROs (Ali et al., 2020).

Em resposta a níveis elevados de Zn observados em tecidos foliares e ao estresse oxidativo, plantas de tomate apresentaram modificações na atividade de enzimas antioxidantes, ocorrendo resposta variável em função do tipo de solo no qual as plantas foram cultivadas. Efeitos adversos, tal como o estresse por Zn, podem levar a hipergeração desequilibrada de EROs, e o aumento da atividade destas enzimas é amplamente relatado como um meio pelo qual as plantas buscam minimizar este estresse e proteger a sua organização anatômica e bioquímica (Akanbi-Gada et al., 2019). Em CH houve um claro aumento de atividade das enzimas SOD e POD nas plantas expostas aos tratamentos com maiores concentrações de Zn, muito em resposta ao aumento da concentração de H₂O₂. Em contrapartida, em NB, a enzima SOD apresentou maior atividade nos tratamentos controle e T0,5, sob menor concentração de Zn, e forte redução da atividade em exposição a concentrações mais elevadas de Zn. Estes dados sugerem capacidade reduzida da planta em suportar a explosão oxidativa induzida pela toxicidade de Zn e os seus efeitos da exposição prolongada, pois a atividade da SOD parece ser dose e tempo dependente (Song et al. 2011; Kundu et al., 2018; You et al., 2021). Cabe ressaltar que os teores de Zn observados no tecido foliar de plantas de tomate cultivadas em CH no maior tratamento (T1,5) foram menores que aqueles observados em T1,0 das plantas cultivadas em NB.

Alterações na atividade de enzimas antioxidantes estão relacionadas a toxicidade do Zn que causa desequilíbrio redox (Chibuike e Obiora, 2014). A SOD desempenha um importante papel na desintoxicação de EROs pela conversão de O₂⁻

livre em O_2 e H_2O_2 (Del Rio et al., 2018). O aumento da atividade de SOD em tecidos foliares de tomate foi observado por Akanbi-Gada et al. (2019), após 90 dias de exposição a teores elevados de Zn. Em contrapartida, You et al. (2021) observaram redução da atividade em concentrações elevadas de Zn, condizendo com o observado neste estudo. A enzima POD por sua vez aumentou sua atividade, principalmente em CH e isto influenciou nos teores observados de H_2O_2 , sendo observado efeito inverso em NB, de baixa atividade da enzima e incremento dos teores de H_2O_2 . A POD é um importante mecanismo de conversão de H_2O_2 em água (Rajput et al., 2021), funcionando como uma ferramenta de redução do estresse em plantas.

5.5 CONCLUSÃO

A aplicação de Zn em concentrações elevadas, representada por T1,0 (40,0 mg kg^{-1} de Zn em CH e 80 mg kg^{-1} de Zn em NB) e T1,5 (60,0 mg kg^{-1} de Zn em CH e 120 mg kg^{-1} de Zn em NB), reduziu significativamente a produção de massa seca de raiz e de parte aérea, taxa fotossintética líquida, índice SPAD, absorção de Fe e P. Também aumentou a atividade de enzimas antioxidantes e a presença de H_2O_2 e MDA, especialmente em plantas cultivadas em Cambissolo Húmico.

O tratamento T0,5 (20,0 mg kg^{-1} de Zn em CH e 40 mg kg^{-1} de Zn em NB) não gerou efeito positivo esperado em plantas de tomate.

O Zn se comportou predominantemente como um elemento tóxico sob as variáveis analisadas, inclusive naquele tratamento que era esperado efeito positivo (T0,5).

6. REFERÊNCIAS

ADREES, M., KHAN, Z. S., HAFEEZ, M., RIZWAN, M., HUSSAIN, K., ASRAR, M., ALI, S. Foliar exposure of zinc oxide nanoparticles improved the growth of wheat (*Triticum aestivum* L.) and decreased cadmium concentration in grains under simultaneous Cd and water deficient stress. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, v. 208, p. 111627, 2021. <http://doi:10.1016/j.ecoenv.2020.111627>

AKANBI-GADA, M., OGUNKUNLE, C. O., VISHWAKARMA, V., VISWANATHAN, K., FATOBA, P. O. Phytotoxicity of nano-zinc oxide to tomato plant (*Solanum lycopersicum* L): Zn uptake, stress enzymes response and influence on non-enzymatic antioxidants in fruits. **Environmental Technology e Innovation**, p. 100325, 2019. <http://doi:10.1016/j.eti.2019.100325>

ALI, M., GUL, A., HASAN, H., GUL, S., FAREED, A., NADEEM, M., JAMIL, M. Cellular mechanisms of drought tolerance in wheat. **Climate Change and Food Security with Emphasis on Wheat**, p. 155–167, 2020. <http://doi:10.1016/b978-0-12-819527-7.00009-1>

ALMENDROS, P., GONZÁLEZ, D., FERNÁNDEZ, M. D., GARCÍA-GOMEZ, C., OBRADOR, A. Both Zn biofortification and nutrient distribution pattern in cherry tomato plants are influenced by the application of ZnO nanofertilizer. **Heliyon**, v. 8, n. 3, p. e09130, 2022. <http://https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e09130>

BALAFREJ, H., BOGUSZ, D., TRIQUI, Z.-E. A., GUEDIRA, A., BENDAOU, N., SMOUNI, A., FAHR, M. Zinc Hyperaccumulation in Plants: A Review. **Plants**, v. 9, n. 5, p. 562, 2020. <http://doi:10.3390/plants9050562>

CHIBUIKE, G. U., OBIORA, S. C. Heavy Metal Polluted Soils: Effect on Plants and Bioremediation Methods. **Applied and Environmental Soil Science**, v. 2014, p. 1–12, 2014. <http://doi:10.1155/2014/752708>

DEL RÍO, L. A., CORPAS, F. J., LÓPEZ-HUERTAS, E., PALMA, J. M. Plant Superoxide Dismutases: function under abiotic stress conditions. **Antioxidants and Antioxidant Enzymes in Higher Plants**, p. 1–26, 2018. http://doi:10.1007/978-3-319-75088-0_1

DIAGBOYA, P. N., OLU-OWOLABI, B. I., ADEBOWALE, K. O. Effects of time, soil organic matter, and iron oxides on the relative retention and redistribution of lead, cadmium, and copper on soils. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 22, n. 13, p. 10331–10339, 2015. <http://doi:10.1007/s11356-015-4241-0>

DU, W., YANG, J., PENG, Q., LIANG, X., MAO, H. Comparison study of zinc nanoparticles and zinc sulphate on wheat growth: From toxicity and zinc biofortification. **Chemosphere**, 2019. <http://doi:10.1016/j.chemosphere.2019.03>

EPAGRI. (2016). **Sistema de produção integrada para o tomate tutorado em Santa Catarina** (p151). Florianópolis, SC: Epagri.

FAIZAN, M., HAYAT, S. Effect of foliar spray of ZnO-NPs on the physiological parameters and antioxidant systems of *Lycopersicon esculentum*. **Polish Journal of Natural Sciences**, v. 34, p. 87–105, 2019.

FEIGL, G., MOLNÁR, Á., SZÖLLŐSI, R., ÖRDÖG, A., TÖRŐCSIK, K., OLÁH, D., KOLBERT, Z. Zinc-induced root architectural changes of rhizotron-grown *B. napus* correlate with a differential nitro-oxidative response. **Nitric Oxide**, v. 90, p. 55–65, 2019. <http://doi:10.1016/j.niox.2019.06.003>

FERREIRA, D. F. **Sisvar: um sistema computacional de análise estatística. Ciência e Agrotecnologia**, v. 35, n. 6, p. 1039-1042, 2011. <https://doi.org/10.1590/S1413-70542011000600001>

GAI, A. P. C., SANTOS, D. S., VIEIRA, E. A. Effects of zinc excess on antioxidant metabolism, mineral content and initial growth of *Handroanthus impetiginosus* (Mart. ex DC.) Mattos and *Tabebuia roseoalba* (Ridl.) Sandwith. **Environmental and Experimental Botany**, v. 144, p. 88–89, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2017.09.006>

GARG, N., SINGH, S. Arbuscular mycorrhiza *Rhizophagus irregularis* and silicon modulate growth, proline biosynthesis and yield in *Cajanus cajan* l. millsp. (pigeonpea) genotypes under cadmium and zinc stress. **Journal of Plant Growth Regulation**, v. 37, n. 1, p. 46–63, 2017. <http://doi:10.1007/s00344-017-9708-4>

GAY, C., COLLINS, J., GEBICKI, J. M. Hydroperoxide Assay with the Ferric–Xylenol Orange Complex. **Analytical Biochemistry**, v. 273, n. 2, p. 149–155, 1999. <http://doi:10.1006/abio.1999.4208>

GIANNOPOLITIS, C. N., RIES, S. K. Superoxide dismutases: I. Occurrence in higher plants. **Plant physiology**, v. 59, n. 2, p. 309-314, 1977.

GILL, S. S., ANJUM, N. A., GILL, R., YADAV, S., HASANUZZAMAN, M., FUJITA, M., TUTEJA, N. Superoxide dismutase - mentor of abiotic stress tolerance in crop plants. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 22, n. 14, p. 10375–10394, 2015. <http://doi:10.1007/s11356-015-4532-5>

GOMES, M. P., DUARTE, D. M., CARNEIRO, M. M. L. C., BARRETO, L. C., CARVALHO, M., SOARES, A. M., GARCIA, Q. S. Zinc tolerance modulation in *Myracrodruon urundeuva* plants. **Plant physiology and biochemistry**, v. 67, p. 1–6, 2013. <http://doi:10.1016/j.plaphy.2013.02.018>

GOODARZI, A., NAMDJOYAN, S., SOORKI, A. A. Effects of exogenous melatonin and glutathione on zinc toxicity in safflower (*Carthamus tinctorius* L.) seedlings.

Ecotoxicology and Environmental Safety, v. 201, p. 110853, 2020. <http://doi:10.1016/j.ecoenv.2020.110853>

HARRIS, K. D., MATHUMA, V. Effect of foliar application of boron and zinc on growth and yield of tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill.). **Asian J. Pharm. Sci. Technol.**, v.5, n. 2, p. 74–78, 2015. <http://doi.org/10.4038/agrieast.v12i1.49>

HAMMERSCHMIDT, R., NUCKLES, E. M., KUĆ, J. Association of enhanced peroxidase activity with induced systemic resistance of cucumber to *Colletotrichum lagenarium*. **Physiological Plant Pathology**, v. 20, n. 1, p. 73–82, 1982. [http://doi:10.1016/0048-4059\(82\)90025-x](http://doi:10.1016/0048-4059(82)90025-x)

HEATH, R. L., PACKER, L. Photoperoxidation in isolated chloroplast I. Kinetics and stoichiometry of fatty acid peroxidation. **Archives of biochemistry and biophysics**, v. 125, n. 2, p. 189-198, 1968.

HEINZEN, A. S. **Qualidade de ameixas ‘laetitia’ frigo conservadas e submetidas ao estresse inicial por baixo oxigênio, tratamento térmico e vapor de etanol**. 2016. Dissertação (Mestrado em produção vegetal) – Centro de Ciências Agroveterinárias, Universidade do Estado de Santa Catarina, 2016.

HEINZEN, A. S. **Cera de carnaúba e quitosana com óleos essenciais para controle de mofo azul e o impacto sobre a qualidade de maçãs ‘fuji’**. 2021. Tese (Doutorado em produção vegetal) – Centro de Ciências Agroveterinárias, Universidade do Estado de Santa Catarina, 2021.

HERMES-LIMA, M. Quantification of lipid peroxidation in tissue extracts based on Fe(III)xlylenol orange complex formation. **Free Radical Biology and Medicine**, v. 19, n. 3, p. 271–280, 1995. [http://doi:10.1016/0891-5849\(95\)00020-x](http://doi:10.1016/0891-5849(95)00020-x)

JAIN, A., SINILAL, B., DHANDAPANI, G., MEAGHER, R. B., SAHI, S. V. Effects of deficiency and excess of zinc on morphophysiological traits and spatiotemporal regulation of zinc-responsive genes reveal incidence of cross talk between micro- and macronutrients. **Environmental Science & Technology**, v. 47, n. 10, p. 5327–5335, 2013. <http://doi:10.1021/es400113y>

KABATA-PENDIAS, A. (2011). **Trace elements in soils and plants**, 4th edn. CRC Press, Boca Raton

KAUR, H., GARG, N. Zinc toxicity in plants: a review. **Plant**, p. 253:129, 2021. <https://doi.org/10.1007/s00425-021-03642-z>

KAYA, C., ASHRAF, M., AKRAM, N. A. Hydrogen sulfide regulates the levels of key metabolites and antioxidant defense system to counteract oxidative stress in pepper (*Capsicum annuum* L.) plants exposed to high zinc regime. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 25, n. 13, p. 12612–12618, 2018. <http://doi:10.1007/s11356-018-1510-8>

MEHRABANJOUBANI, P., ABDOLZADEH, A., SADEGHIPOUR, H. R., AGHDASI, M. Impacts of silicon nutrition on growth and nutrient status of rice plants grown under varying zinc regimes. **Theoretical and Experimental Plant Physiology**, v. 27, n. 1, p. 19–29, 2014. <http://doi:10.1007/s40626-014-0028-9>

NOULAS, C, TZIOUVALEKAS, M. KARYOTIS, T. Zinc in soils, water and food crops. **Journal of Trace Elements in Medicine and Biology**, v. 49, p. 252–260, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.jtemb.2018.02.009>

OBRADOR, A., GONZÁLEZ, D., ALMENDROS, P., GARCÍA-GÓMEZ, C., FERNÁNDEZ, M. D. Assessment of phytotoxicity and behavior of 1-year-aged zn in soil from ZnO nanoparticles, bulk ZnO, and Zn sulfate in different soil-plant cropping systems: from biofortification to toxicity. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, v.22, p. 150–164, 2022. <https://doi.org/10.1007/s42729-021-00640-8>

PACKER, L., CADENAS, E. (2013). **Hydrogen peroxide and cell signaling**, Part B, San Diego, CA: Elsevier Science & Technology. v.527, p. 376, 2013.

RAJPUT, V. D., HARISH, SINGH, R. K., VERMA, K. K., SHARMA, L., QUIROZ-FIGUEROA, F. R., MANDZHIEVA, S. Recent developments in enzymatic antioxidant defence mechanism in plants with special reference to abiotic stress. **Biology**, v. 10, n. 4, p. 267, 2021. <http://doi:10.3390/biology10040267>

RAJPUT, V. D., MINKINA, T. M., BEHAL, A., SUSHKOVA, S. N., MANDZHIEVA, S., SINGH, R., MOVSESYAN, H. S. Effects of zinc-oxide nanoparticles on soil, plants, animals and soil organisms: A review. **Environmental Nanotechnology, Monitoring e Management**, v. 9, p. 76–84, 2018. <http://doi:10.1016/j.enmm.2017.12.006>

REFAEY, Y., JANSEN, B., PARSONS, J. R., DE VOOGT, P., BAGNIS, S., MARKUS, A., KALBITZ, K. Effects of clay minerals, hydroxides, and timing of dissolved organic matter addition on the competitive sorption of copper, nickel, and zinc: A column experiment. **Journal of Environmental Management**, v. 187,p. 273–285, 2017. <http://doi:10.1016/j.jenvman.2016.11.056>

REHMAN, A., FAROOQ, M., OZTURK, L., ASIF, M., SIDDIQUE, K. H. M. Zinc nutrition in wheat-based cropping systems. **Plant and Soil**, v. 422, n. 1-2, p. 283–315, 2017. <http://doi:10.1007/s11104-017-3507-3>

SADEGHZADEH, B. A review of zinc nutrition and plant breeding. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, v. 13, n.4, p. 905-927, 2013. <http://doi:10.4067/s0718-95162013005000072>

SANDEEP, G., VIJAYALATHA, K. R., ANITHA, T. Heavy metals and its impact in vegetable crops. **International Journal of Chemical Studies**, v.7, n. 1, p. 1612-1621, 2019.

SARDAR, H., NAZ, S., EJAZ, S., RAROOQ, O., REHMAN, A.U., JAVED, M.S., AKHTAR, G. Effect of foliar application of zinc oxide on growth and photosynthetic traits of cherry tomato under calcareous soil conditions. **Acta Sci. Pol. Hortorum Cultus**, v. 20, n. 1, p. 91–99, 2021. <http://doi:10.24326/asphc.2021.1.9>

SHI, J., WU, Q., ZHENG, C., YANG, J. The interaction between particulate organic matter and Copper, Zinc in paddy soil. **Environmental Pollution**. 2018. <http://doi:10.1016/j.envpol.2018.09.085>

SHIBAEVA, T. G., MAMAEV, A. V., SHERUDILO, E. G. Evaluation of a SPAD-502 plus chlorophyll meter to estimate chlorophyll content in leaves with interveinal chlorosis. **Russian Journal of Plant Physiology**, v. 67, n. 4, p. 690–696, 2020. <http://doi:10.1134/s1021443720040160>

SONG, A., LI, P., LI, Z., FAN, F., NIKOLIC, M., LIANG, Y. The alleviation of zinc toxicity by silicon is related to zinc transport and antioxidative reactions in rice. **Plant and Soil**, v. 344, n. 1-2, p. 319–333, 2011. <http://doi:10.1007/s11104-011-0749-3>

TEDESCO, M. J., GIANELLO, C., BISSANI, C. A., BOHNEN, H., VOLKWEISS, S. J. **Análises de solo, plantas e outros materiais**. Porto Alegre, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1995. 174p. (Boletim Técnico de solos, 5).

THE JAMOVI PROJECT (2021). **Jamovi. (Version 2.2)** [Computer Software]. Retrieved from <https://www.jamovi.org>

TIRANI, M. M., HAGHJOU, M. M. Reactive oxygen species (ROS), total antioxidant capacity (aoc) and malondialdehyde (mda) make a triangle in evaluation of zinc stress extension. **The Journal of Animal e Plant Sciences**, v. 29, n. 4, p. 1100-1111, 2019.

WANG, X., YANG, X., CHEN, S., LI, Q., WANG, W., HOU, C., WANG, S. Zinc oxide nanoparticles affect biomass accumulation and Photosynthesis in *Arabidopsis*. **Frontiers in Plant Science**, v. 6, 2016. <http://doi:10.3389/fpls.2015.01243>

YOU, Y., WANG, L., JU, C., WANG, G., MA, F., WANG, Y., YANG, D. Effects of arbuscular mycorrhizal fungi on the growth and toxic element uptake of *Phragmites australis* (Cav.) Trin. ex Steud under zinc/cadmium stress. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, v. 213, p. 112023, 2021. <http://doi:10.1016/j.ecoenv.2021.112023>

ZHANG, Y., WANG, Y., DING, Z., WANG, H., SONG, L., JIA, S., MA, D. Zinc stress affects ionome and metabolome in tea plants. **Plant Physiology and Biochemistry**, v. 111, p. 318–328, 2017. <http://doi:10.1016/j.plaphy.2016.12.014>

7. CONSIDERAÇÕES FINAIS

As plantas de tomate apresentaram sensibilidade aos teores elevados de Zn disponíveis no solo, especialmente quando expostas a altos teores como observado no primeiro estudo. Os efeitos destes maiores teores disponíveis foram observados especialmente quando as plantas foram cultivadas em Cambissolo Húmico, solo este que proporcionou maiores teores disponíveis. A disponibilidade do Zn no solo resultou em alterações no desenvolvimento das plantas de maneira geral e seus efeitos foram expressos em redução da produção de massa seca da planta, diminuição da capacidade fotossintética, da condutância estomática e de parâmetros radiculares, tais como comprimento e o volume. O incremento de Zn no solo através dos tratamentos também permitiu que as plantas de tomate transcolassem maiores teores de Zn para a parte aérea em relação às raízes, e isto gerou efeitos tóxicos mais acentuados.

A observação dos resultados do estudo II por sua vez nos dá a dimensão de alguns dos efeitos causados pelo excesso de Zn. O aumento da atividade enzimática, caracterizado pelas enzimas SOD e POD e da presença de H_2O_2 e MDA, especialmente em CH demonstra que o excesso de Zn desencadeia uma reação de estresse em plantas de tomate. Possivelmente, as plantas de tomate também não sejam capazes de suportar um aumento do estresse oxidativo do que aquela observa em CH, como demonstram os dados da atividade da SOD em NB. Este estresse gerado pelo excesso de Zn, principalmente nas doses de NCT e acima geraram efeitos adversos ao comportamento enzimático, assim como alteraram diversos parâmetros de crescimento, como observado no estudo I. Ainda, a dose que corresponde à metade do NCT, da qual era esperado efeito positivo sobre os parâmetros avaliados, não gerou este comportamento, e em alguns casos proporcionou efeitos negativos. Ela aumentou o conteúdo de MDA, e diminuiu leituras do índice SPAD, massa seca e comprimento de raiz em CH.

Os diferentes tipos de solos geraram respostas distintas quanto ao comportamento das plantas. O Cambissolo Húmico, solo com menor teor de argila e matéria orgânica, proporcionou às plantas um ambiente com maior teor disponível de Zn em relação ao Nitossolo Bruno. Essas diferenças entre os solos e a sua capacidade

de adsorção do Zn resultou em valores distintos de nível crítico tóxico de Zn para as plantas de tomate. Isto demonstra a importância do conhecimento a um nível mais detalhado das características dos solos em que se deseja introduzir a cultura e as adubações nela necessárias.

Também fica claro, que os cultivos que buscam a biofortificação agronômica da cultura do tomate com Zn, por exemplo, necessitam de avaliações individuais. Pois, em muitos casos, a biofortificação agronômica exige que doses mais elevadas de nutrientes sejam aplicadas, e a falta de conhecimento do ambiente pode expor as plantas a níveis críticos tóxicos de Zn no solo. Estes níveis por sua vez, como demonstrado neste estudo, podem ser muito prejudiciais ao desenvolvimento das plantas e terminam por impactarem fortemente a capacidade produtiva destas plantas. Também é importante ter a percepção de que estas avaliações individuais devem ser feitas a nível de cultivar, pois, possivelmente os efeitos do Zn sobre plantas de tomate chegam a se expressar neste nível.

8. REFERÊNCIAS

ALLOWAY, B.J. **Zinc in Soils and Crop Nutrition**. Second edition. IZA and IFA Brussels, Belgium and Paris, France, 2008.

ALI, M. A., FAHAD, S., HAIDER, I., AHMED, N., AHMAD, S., HUSSAIN, S., ARSHAD, M. Oxidative Stress and Antioxidant Defense in Plants Exposed to Metal/Metalloid Toxicity. **Reactive Oxygen, Nitrogen and Sulfur Species in Plants**, p. 353–370, 2019. doi:10.1002/9781119468677.ch15

ALMEIDA, J. A. de. **Fatores abióticos**. In: Boldrini, I. I. et al. **Biodiversidade dos campos de planalto das araucárias**. Brasília: MMA, 2009. p. 19-38.

ANDREINI, C.; BERTINI, I. A bioinformatics view of zinc enzymes. **Journal of inorganic biochemistry**, v.111, p.150-156, 2012.

BHATT, R., HOSSAIN, A., SHARMA, P. Zinc biofortification as an innovative technology to alleviate the zinc deficiency in human health: a review. **Open Agriculture**, v. 5, n. 1, p. 176 – 187, 2020. <https://doi.org/10.1515/opag-2020-0018>

BIONDI, C. M.; NASCIMENTO, C. W. A. DO; FABRICIO NETA, A. DE B.; RIBEIRO, M. R. Teores de Fe, Mn, Zn, Cu, Ni e Co em solos de referência de Pernambuco. **Revista Brasileira de Ciências do Solo**, v.35, p.1057-1066, 2011.

BORG, S.; BRINCH-PEDERSEN, H.; TAURIS, B.; MADSEN, L.H.; DARBANI, B.; NOEPARVAR, S. Wheat ferritins: improving the iron content of the wheat grain. **Journal of Cereal Science**, n.56, p. 204–213. 2012.

BORRILL, P.; CONNORTON, J.M.; BALK, J.; MILLER, A.J.; SANDERS, D.; UAUY, C. Biofortification of wheat grain with iron and zinc: integrating novel genomic resources and knowledge from model crops. **Frontiers in Plant Science**, n.5, p. 1–8, 2014.

BROWN, P.H.; CAKMAK, I.; ZHANG, Q. **Form and function of zinc in plants**. Chap 7 in Robson, A.D. (ed.) **Zinc in Soils and Plants**, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht. 1993, p 90-106.

BROADLEY, M.R., WHITE, P.J.; HAMMOND, J.P.; ZELKO, I.; LUX, A. Zinc in plants. **N. Phytol.**, v. 173, p. 677-702, 2007.

BURLESON, C.A.; DACUS, A.D.; GERARD C.J. The effect of phosphorus fertilization on the zinc nutrition of several irrigated crops. **Soil Sci. Soc. Amer. Proc.** v.25, p. 365-368, 1961.

CAKMAK, A.I.; KALAYCI, B.M.; EKIZ, C.H.; BRAUN, D.H.J.; KILINÇ, E.Y.; YILMAZ, C.A. Zinc deficiency as a practical problem in plant and human nutrition in Turkey: A

NATO-science for stability Project. **Field Crops Research**. v.60, n. 1–2, p.175 – 188, 1999.

CAKMAK, A.I.; KUTMAN, U.B. Agronomic biofortification of cereals with zinc: a review. **European Journal of Soil Science**, n.69, p.172–180, 2018.

CARNEIRO, L.F.; FURTINI NETO, A.E.; RESENDE, A.V.; CURI, N., SANTOS, J.Z.L.; LAGO, F.J. Fontes, doses e modos de aplicação de fósforo na interação fósforo-zinco em milho. **Cienc. Agrotec.**, v.32, n.4, 1133 -1141, 2008.

CHASAPIS, C. T.; LOUTSIDOU, A.C.; SPILIOPOULOU, C.A. STEFANIDOU, M. E. Zinc and human health: a update. **Arch Tóxicol**. v. 86, n. 4, p.521-534, 2012.

EMBRAPA, **A cultura do tomateiro para mesa. Serviço de produção de informação – SPI**, Brasília, DF, 1993, 92 p.

EMBRAPA, **Cultivo de tomate para industrialização**. Embrapa Hortaliças, versão eletrônica, 2006. Disponível em:<
[https://sistemasdeproducao.cnptia.embrapa.br/FontesHTML/Tomate/TomateIndustria I_2ed/](https://sistemasdeproducao.cnptia.embrapa.br/FontesHTML/Tomate/TomateIndustria_I_2ed/)>. Acessado em: 14/06/2022.

EPAGRI. **Sistema de produção integrada para o tomate tutorado em Santa Catarina**. Florianópolis, SC: Epagri, 2016. 151p.

EPAGRI. **Boletim agropecuário n° 68**. CEPA, Florianópolis, SC: Epagri, 2019. 61p.

ERNANI, P.R. **Química do solo e disponibilidade de nutrientes**. (1ªEd). Lages: O autor, 2008. 230p.

FADIGAS, F. F., AMARAL SOBRINHO, N. M. B., MAZUR, N., ANJOS, L. C. H., FREIXO, A. A. Proposition of reference values for natural concentration of heavy metals in Brazilian soils. **Rev. bras. eng. agríc. ambient.**, v.10, n. 3, 2006.

FAQUIN, V. **Nutrição mineral de plantas**. - Lavras: UFLA / FAEPE, 2005.

GALLAGHER, M.L. **Os nutrientes e seu metabolismo**. 2010. In: KRAUSE: **Alimentos, nutrição e dietoterapia**. 12ª edição, rio de janeiro: Elsevier.

GAUTAM, S., PLATEL, K., SRINIVASAN, K. Influence of b-carotene-rich vegetables on the bioaccessibility of zinc and iron from food grains. **Food Chemistry**, V.122, N.3, P.668-672, 2010

GOMEZ-GALERA, S.; SUDHAKAR, D.; PELACHO, A.M.; CAPELL, T.; CHRISTOU, P. Constitutive expression of abarley; transporter increases alkaline soil tolerance and results in iron partitioning between vegetative and storage tissues under stress. **Plant Physiology e Biochemistry**, n.53, p. 46–53, 2012.

GUPTA, B.; PATHAK, G.C.; PANDEY, N. Induction of oxidative stress and antioxidant responses in *Vigna mungo* by zinc stress. **Russ. J. Plant Physiol.**, V. 58, p. 85-91, 2011.

HESS SY, LÖNNERDAL B, HOTZ C, RIVERA JA, BROWN KH. Recent advances in knowledge of zinc nutrition and human health. **Food Nutr Bull.** 2009; 30(1): 5-11

HUGEN, C.; MIQUELLUTI, D.J.; CAMPOS, M.L.; ALMEIDA, J.A.; FERREIRA, E.R.N.C.; POZZAN, M. Teores de Cu e Zn em perfis de solos de diferentes litologias em Santa Catarina. **Revista Brasileira de engenharia agrícola e ambiental.** v.17, n.6, p.622–628, 2013.

KABATA-PENDIAS, A. **Trace Elements in Soils and Plants.** (4° ed.), CRC Press, Inc, Boca Raton, Florida, USA (2011).

KABATA-PENDIAS, A.; MUKHERJEE, A.B. **Trace elements from soil to human.** New York, Springer-Verlag, 2007. 550p.

KARIMI, A., MOEZZI, A., CHOROM, M., ENAYATIZAMIR, N. Chemical Fractions and Availability of Zn in a Calcareous Soil in Response to Biochar Amendments. 2019. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, v. 19, p. 851–864, 2019. doi:10.1007/s42729-019-00084-1

KUNDU, P., GILL, R., AHLAWAT, S., ANJUM, N. A., SHARMA, K. K., ANSARI, A. A., GILL, S. S. Targeting the redox regulatory mechanisms for abiotic stress tolerance in crops. **Biochemical, Physiological and Molecular Avenues for Combating Abiotic Stress Tolerance in Plants**, p. 151–220, 2018. <http://doi:10.1016/b978-0-12-813066-7.00010-3>

LINDSAY, W.L (Eds). Micronutrients in agriculture. Madison; **Soil Science Society of America**, 1972, p. 343 – 364.

LIN, Y.; AARTS, M.G.M. The molecular mechanism of zinc and cadmium stress response in plants. **Cell. Molec. Life Sci.**, v.69, p.3187-3206, 2012

LO, S.Y.; REISENAUER, H.M. Zinc nutrition of alfafa. **Agronomy J.** v. 60, p. 464 – 466, 1968.

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

MARSCHNER H. 1995. **Mineral nutrition of higher plants**, 2nd edn. London, UK: Academic Press.

MARQUES, M.C.; NASCIMENTO, C.W.A. Tolerância de mamona a zinco avaliada por fluorescência de clorofila e nutrição das plantas. **R. Bras. Ci. Solo**, v.38, p. 850-857, 2014.

MASUDA, H.; AUNG, M.S.; NISHIZAWA, N. K. Iron biofortification of rice using different transgenic approaches. **Rice**, n.6, p.40, 2013

NOULAS, C.; TZIOUVALEKAS, M.; KARYOTIS, T. Zinc in soils, water and food crops. **Journal of Trace Elements in Medicine and Biology**, v.49, p.252 - 260, 2018.

NOVAIS, R.F.; SMYTH, T.J. **Fósforo em solo e planta em condições tropicais**. Viçosa: UFV, Departamento de Solos, 1999. 399p.

OLIVEIRA, K.S. **Biofortificação de arroz (*Oryza sativa* L.) em selênio e implicações na composição nutricional**. 2017. Dissertação (Mestrado em Qualidade Alimentar) – Universidade Nova de Lisboa, Lisboa.

OLIVEIRA, N.T.; REZENDE, P.M.; BRUZI, A.T.; MELVILLE, C.C. Effects on food-type soybean cultivars when biofortified with diferente rates of zinc. **Revista de Ciências agrárias**, v. 41, n.3,p. 647-654, 2018.

OLSEN, S.R. **Micronutrients interactions**. In: MORTVEDT, J.J.; GIORDANO, P.M.; LINDSAY, W.L (Eds). Micronutrients in agriculture. Madison; **Soil Science Society of America**, 1972, p. 343 – 364.

ORGANIZACIÓN MUNDIAL DE LA SALUD (OMS). **Documento final de la Segunda Conferencia Internacional sobre Nutrición: Declaracion de Roma sobre la Nutrición**. Roma: OMS; 2014.

PADOVANI, R.M.; AMAYA-FARFAN, J.; COLUGNATI, F. A. B.; DOMENE, S.M.A. Dietary reference intakes: aplicabilidade das tabelas em estudos nutricionais. **Rev. Nutr.**, v.19, n.6, 741-760, 2006.

PEGANOVA S., EDLER K. **Zinc**. In: **Elements and Their Compounds in the Environment**, 2nd edn., MERIAN, M. ANKE, M. IHNAT, M. STOEPLER, 1203–1239, Wiley-VCH, Weinheim. 2004.

PHATTARAKUL, N.; RERKASEM, B.; LI, L. J.; WU, L.H.; ZOU, C.Q.; RAM, H. Biofortification of rice grain with zinc through zinc fertilization in different countries. **Plant and Soil**, n. 361, p. 131–141, 2012.

SANDSTEAD, H. H. Causes of iron and zinc deficiencies and their effects on brain. **Journal of Nutrition**, v. 130, n. 2, p. 347S-349, 2000.

SANTOS, H. G., et al. **O novo mapa de solos do Brasil: legenda atualizada** - Dados eletrônicos. — Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2011. 67 p. - (Documentos / Embrapa Solos, ISSN 1517-2627 ; 130).

SANTOS, H. G., et al. **SiBCS - Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 5. ed., rev. e ampl. – Brasília, DF : Embrapa, 2018. 356 p.

SCRIMSHAW, N.S. Historical concepts of interation, synergism and antagonismo between nutrition and infection. **J. Nutr.**, v.133, 316-321, 2003.

SIDRA. **Produção Agrícola municipal** – IBGE. Disponível em:< <https://sidra.ibge.gov.br/tabela/1612>>. Acessado em: 14/06/2022.

SINGH, V., JAVED, A., KUMAR, A. S., CHAUHAN, T. M. Productivity, nutrient uptake and economics of wheat under potassium and zinc nutrition. **Indian Journal of Agronomy**. v. 60, n. 3, 2015.

SINGH, B., NATESAN, S.K.A., SINGH, B.K., USHA, K. Improving zinc efficiency of cereals under zinc deficiency. **Current Science**, V. 88, N. 1. 2005

SOMMER, A.L.; LIPMAN, C.B. Evidence of the indispensable nature of boron and zinc for higher green plants. **Plant Physiology**, n. 1, p.231–249, 1926.

SUGANYA, A., SARAVANAN. A., MANIVANNAN N. Role of Zinc Nutrition for Increasing Zinc Availability, Uptake, Yield, and Quality of Maize (*Zea Mays* L.) Grains: An Overview, **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v. 51, n.15, p. 2001-2021, 2020. DOI:10.1080/00103624.2020.1820030

STURIKOVA, H., KRYSTOFOVA, O., HUSKA, D., ADAM, V. Zinc, zinc nanoparticles and plants. **Journal of Hazardous Materials**, 349, 101–110, 2018. doi:10.1016/j.jhazmat.2018.01.04.

TORRES, L.C.R. **Bioacessibilidade e influência de promotores e inibidores de ferro e zinco na mistura arroz/feijão**. Dissertação mestrado, Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Ciência e Tecnologia de Alimentos, 2018

TÓTH, G.; HERMANN, T.; DA SILVA, M.R.; MONTANARELLA, L. Heavy metals in agricultural soils of the European Union with implications for food safety. **Environ. Int.**, v.88, p. 299-309, 2016.

TRIJATMIKO, K.R., DUENAS, C., TSAKIRPALOGLU, N., TORRIZO, L., ARINES, F.M., ADEVA, C. Biofortified indica rice attains iron and zinc nutrition dietary targets in the field. **Scientific Reports**, n.6, 2016.

VERGUTZ, L.; SILVA, M.C.S.; LUZ, J.M.R.; KASUYA, M.C.M. **A biofortificação em debate**. Boletim informativo, v.42, n.2, 2016.

ZHOU, C.Q.; ZHANG, Y.Q.; RASHID, A.; RAM, H.; SAVASLI, E.; ARISOY, R. Z. Biofortification of wheat with zinc through zinc fertilization in seven countries. **Plant and Soil**, n. 361, p. 119–130, 2012.

WEI, C., JIAO, Q., AGATHOKLEOUS, E., LIU, H., LI, G., ZHANG, J., FAHAD, S., JIANG, Y. Hormetic effects of zinc on growth and antioxidant defense system of wheat

plants. **Science of The Total Environment**, v. 807, n.10, p. 150992, 2022.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.150992>

9. ANEXOS

Anexo I – Valores de Zn obtidos em provas em branco (PB), amostra referência (AR) RM-Agro E1001a e a taxa de recuperação do valor certificado em amostras digeridas em bloco digestor seguindo método 3050B.

Material	Solos					
	Cambissolo Húmico			Nitossolo Bruno		
	PB ⁽¹⁾	AR ⁽²⁾	Recuperação ⁽³⁾	PB	AR	Recuperação
	---- mg kg ⁻¹ ---	%		--- mg kg ⁻¹ ----	%	
Folha	0,04	9,45	95,4	0,04	8,46	85,4
Caule	0,55	8,91	89,8	0,05	9,56	96,6
Raiz	0,01	8,01	80,9	0,04	8,04	81,2

¹ PB: Média da leitura das provas em branco; ²AR: Média da leitura de Zn nas amostras referências; ³: A taxa de recuperação baseia-se no valor certificado de 9,9 mg kg⁻¹ de Zn. Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

Anexo II – Porcentagem disponível de Zn em relação a dose aplicada em um Cambissolo Húmico e um Nitossolo Bruno destinados ao cultivo de plantas de tomate.

Doses de Zn	Disponível	
	Cambissolo Húmico	Nitossolo Bruno
mg kg ⁻³	----- % -----	-----
0	-	-
50	78,4	46
100	68,2	52,8
150	64,5	51,3
200	80,3	60,6
250	75,4	57,2
300	71,5	53,8
450	66,4	50,5
Média	72,15	53,25

*Valores apresentados correspondem ao teor extraível com HCl 0,1M em relação a dose de Zn aplicada. Fonte: Elaborado pelo autor (2022)

Anexo III – Planta de tomate cultivadas em Cambissolo Húmico expostas a dose de 450 mg kg^{-1} de Zn que não foram capazes de completarem o ciclo de desenvolvimento.



Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

Anexo IV – Valores de Ferro (Fe), Cobre (Cu), Zinco (Zn), Manganês (Mn), Cálcio (Ca), Magnésio (Mg) e Fósforo (P) obtidos em provas em branco, amostra referência RM-Agro E1001a e a taxa de recuperação do valor certificado em amostras digeridas em bloco digestor seguindo método 3050B.

Elemento	Fe	Cu	Zn	Mn	Ca	Mg	P
	----- mg kg ⁻¹ -----				----- g kg ⁻¹ -----		
Prova em Branco	0,18	-0,16	-0,07	-0,17	3,41	1,34	4,91
Amostra Referência	82,43	2,33	9,28	65,11	4,31	2,43	0,66
Recuperação (%)							
Taxa de Recuperação*	90,59	58,34	93,73	85,67	98,66	82,27	102,21

*Valores de taxa de recuperação (%) calculados com base nos seguintes valores: Fe: 91±13; Cu: 4,0±0,7; Zn: 9,9±1,6; Mn: 76,0±18,5; Ca: 4,37±0,58; Mg: 2,95±0,44; P: 0,65±0,19. Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

Anexo V – Perfil de um Cambissolo Húmico (a) coletado em Calmon/SC e um Nitossolo Bruno (b) coletado em Caçador/SC utilizados para a condução do estudo.



Fonte: Elaborado pelo autor (2022).