



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGROECOSSISTEMAS

Samya Uchoa Bordallo

**Alterações Morfofisiológicas em Plantas Cultivadas em Solos Contaminados
com Cobre e Zinco na Região Sul do Brasil**

Florianópolis
2025

Samya Uchoa Bordallo

**Alterações Morfofisiológicas em Plantas Cultivadas em Solos Contaminados
com Cobre e Zinco na Região Sul do Brasil**

Tese submetida ao Programa de Pós-Graduação em Agroecossistemas da Universidade Federal de Santa Catarina como requisito parcial para a obtenção do título de Doutora em Agroecossistemas.

Orientador: Prof. Dr. Cledimar Rogério Lourenzi
Coorientadora: Profa. Dra. Rosete Pescador

Florianópolis

2025

Ficha catalográfica gerada por meio de sistema automatizado gerenciado pela BU/UFSC.
Dados inseridos pelo próprio autor.

Bordallo, Samya Uchoa
Alterações Morfofisiológicas em Plantas Cultivadas em
Solos Contaminados com Cobre e Zinco na Região Sul do
Brasil / Samya Uchoa Bordallo ; orientador, Cledimar
Rogério Lourenzi, coorientador, Rosete Pescador, 2025.
68 p.

Tese (doutorado) - Universidade Federal de Santa
Catarina, Centro de Ciências Agrárias, Programa de Pós
Graduação em Agroecossistemas, Florianópolis, 2025.

Inclui referências.

1. Agroecossistemas. 2. Metais pesados. 3.
Vitivinicultura. 4. Contaminação do solo. 5.
Morfofisiologia das plantas. I. Lourenzi, Cledimar Rogério
. II. Pescador, Rosete. III. Universidade Federal de Santa
Catarina. Programa de Pós-Graduação em Agroecossistemas. IV.
Título.

Samya Uchoa Bordallo

**Alterações Morfofisiológicas em Plantas Cultivadas em Solos Contaminados com
Cobre e Zinco na Região Sul do Brasil**

O presente trabalho em nível de Doutorado foi avaliado e aprovado, em 31 de julho de 2025,
pela banca examinadora composta pelos seguintes membros:

Guilherme Wilbert Ferreira, Dr.
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof.(a) Alberto Fontanella Brighenti, Dr.
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof.(a) Tadeu Luis Tiecher, Dr.(a)
Instituto Federal do Rio Grande do Sul, Campus Restinga

Certificamos que esta é a versão original e final do trabalho de conclusão que foi julgado
adequado para obtenção do título de Doutora em Agroecossistemas.

Coordenação do Programa de Pós-Graduação

Prof.(a) Cledimar Rogério Lourenzi, Dr.(a)
Orientador(a)

Florianópolis, 2025.

AGRADECIMENTOS

À Deus, por me conceder o dom da vida, por ter me presenteado com uma família maravilhosa e por ter me sustentado nas escolhas e nos momentos difíceis ao longo dessa jornada.

Aos meus pais, Sergiane e Marcelo, pela criação, pelo apoio incondicional, pelos ensinamentos e conselhos que moldaram quem sou. Sou profundamente grata por terem escolhido estar presentes em todos os momentos da minha vida.

Aos meus irmãos, Samanta e Allan, meus companheiros de vida, que tornaram os dias mais leves e alegres. Ser irmã de vocês é um dos maiores presentes que recebi.

Ao meu orientador, professor Cledimar, por ter sido, sem dúvida, a melhor escolha que poderia ter feito. Tive a honra de aprender com você não apenas sobre ciência do solo, mas também sobre a vida. Agradeço pelos conselhos, pela ajuda constante e, especialmente, por não ter desistido de mim. Sua paciência e apoio emocional foram fundamentais durante todos esses anos de pós-graduação.

À equipe do NEPEA, pela convivência enriquecedora e pelo auxílio essencial durante os experimentos e análises laboratoriais. Ter colegas tão colaborativos e acolhedores tornou a experiência do doutorado muito mais leve e significativa.

À todos os amigos que fiz dentro e fora dos portões da universidade, que estiveram presentes e me apoiaram em cada etapa desse processo. Cada um possui uma parcela nessa conquista, seja pelas conversas, pelas risadas, pelo ombro amigo ou simplesmente pela companhia nos momentos mais desafiadores.

RESUMO

Este trabalho teve como objetivo avaliar os efeitos morfofisiológicos do acúmulo de cobre (Cu) e zinco (Zn) em plantas cultivadas em solos contrastantes da região Sul do Brasil, com ênfase em videiras jovens e aveia-preta. Dois experimentos foram conduzidos em casa de vegetação, utilizando um Neossolo Quartzarênico Órtico e um Latossolo Vermelho Distrófico típico, coletados nos estados de Santa Catarina e do Rio Grande do Sul, respectivamente. Os solos foram preparados por secagem, peneiramento em malha de 2 mm e correção do pH para 6,0, sendo posteriormente incubados com combinações de doses crescentes de Cu (0, 30, 60 e 120 mg kg⁻¹) e Zn (0, 60, 120 e 240 mg kg⁻¹), totalizando dezesseis tratamentos com três repetições. No primeiro experimento, avaliou-se o desenvolvimento de videiras da cultivar Bordô, enxertadas sobre o porta-enxerto Paulsen 1103. No segundo experimento foi utilizada aveia-preta como planta indicadora. Ao final do ciclo experimental, foram analisados o acúmulo de metais nos tecidos, o crescimento das plantas, a massa seca da parte aérea e das raízes, os teores de clorofilas a e b, clorofila total, carotenoides, macronutrientes e índices de translocação. Os dados foram submetidos à análise estatística e os efeitos dos tratamentos avaliados por comparação de médias. Os resultados mostraram que o Neossolo, devido à baixa capacidade de troca catiônica e maior acidez potencial, favoreceu a biodisponibilidade de Cu e Zn, intensificando sua toxicidade sobre o sistema radicular, sobretudo nas videiras. Nessas condições, observou-se maior acúmulo de metais nas raízes, redução da biomassa radicular e menor translocação para a parte aérea. Ainda assim, registraram-se concentrações elevadas de pigmentos fotossintéticos nas folhas. Por outro lado, o Latossolo proporcionou maior crescimento radicular, teores mais elevados de nitrogênio, cálcio e magnésio, além de melhores respostas fisiológicas em ambas as espécies. A aveia-preta demonstrou sensibilidade aos altos teores de metais, mas apresentou melhor desempenho fisiológico no Latossolo, evidenciado por maior acúmulo de biomassa, maior teor de clorofila total, maior taxa de translocação e absorção de nutrientes. Os resultados evidenciam que os atributos físico-químicos do solo exercem influência direta sobre a disponibilidade de metais pesados e seus efeitos sobre a fisiologia e nutrição das plantas. Conclui-se que o Latossolo apresenta maior capacidade de atenuar os efeitos da contaminação por Cu e Zn, mostrando-se mais apropriado ao cultivo em áreas vitícolas impactadas. Esses achados contribuem para a compreensão dos mecanismos de tolerância vegetal e oferecem subsídios relevantes para estratégias de manejo e remediação de solos contaminados.

Palavras-chave: *Avena strigosa*; contaminação do solo; metais pesados; *Vitis vinifera*.

ABSTRACT

This study aimed to evaluate the morphophysiological effects of copper (Cu) and zinc (Zn) accumulation in plants grown in contrasting soils from Southern Brazil, with emphasis on young grapevines and black oat. Two greenhouse experiments were conducted using an Orthic Quartzarenic Neosol and a typical Dystrophic Red Latosol, collected in the states of Santa Catarina and Rio Grande do Sul, respectively. The soils were prepared by drying, sieving through a 2 mm mesh, and adjusting the pH to 6.0, followed by incubation with combinations of increasing doses of Cu (0, 30, 60, and 120 mg kg⁻¹) and Zn (0, 60, 120, and 240 mg kg⁻¹), totaling sixteen treatments with three replications. In the first experiment, the development of 'Bordô' grapevines grafted onto the Paulsen 1103 rootstock was evaluated. In the second experiment, black oat was used as an indicator plant. At the end of the experimental cycle, metal accumulation in tissues, plant growth, shoot and root dry mass, chlorophyll a and b, total chlorophyll, carotenoids, macronutrient contents, and translocation indices were analyzed. Data were subjected to statistical analysis, and treatment effects were assessed by mean comparisons. Results showed that the Neosol, due to its low cation exchange capacity and higher potential acidity, enhanced the bioavailability of Cu and Zn, intensifying their toxicity to the root system, particularly in grapevines. Under these conditions, higher metal accumulation in roots, reduced root biomass, and lower translocation to shoots were observed. Nevertheless, elevated concentrations of photosynthetic pigments were recorded in leaves. In contrast, the Latosol promoted greater root growth, higher nitrogen, calcium, and magnesium contents, and better physiological responses in both species. Black oat proved sensitive to high metal levels but showed better physiological performance in the Latosol, as evidenced by greater biomass accumulation, higher total chlorophyll content, higher translocation rate, and nutrient uptake. These findings demonstrate that soil physicochemical attributes directly influence the availability of heavy metals and their effects on plant physiology and nutrition. It is concluded that the Latosol has greater capacity to mitigate the effects of Cu and Zn contamination, making it more suitable for cultivation in impacted vineyard areas. These results contribute to the understanding of plant tolerance mechanisms and provide relevant insights for soil management and remediation strategies.

Keywords: *Avena strigosa*; soil contamination; heavy metals; *Vitis vinifera*.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Teores de Cu e Zn extraídos por água e Mehlich 1 em Neossolo após a aplicação de diferentes doses de Cu e Zn	29
Figura 2 – Teores de Cu e Zn extraídos por água e Mehlich 1 em Latossolo após a aplicação de diferentes doses de Cu e Zn	30

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Caracterização dos solos utilizados nos experimentos em casa de vegetação com o cultivo de videiras jovens com a aplicação de diferentes doses de cobre e zinco	26
Tabela 2 – Análise de variância dos parâmetros fisiológicos, nutricionais e de acúmulo de metais em aveia-preta cultivada em Neossolo e Latossolo sob diferentes doses de cobre e zinco.	32
Tabela 3 – Teores médios dos parâmetros fisiológicos, nutricionais e de acúmulo de metais em aveia-preta cultivada em Neossolo e Latossolo sob diferentes doses de cobre e zinco	36
Tabela 4 – Análise de variância para matéria seca da parte aérea (MSPA) e da raiz (MSR), índice SPAD, teores de clorofila a (Chl a), clorofila b (Chl b), clorofila total (Chl total) e carotenoides em videiras jovens cultivadas em Neossolo e Latossolo, submetidas a diferentes doses de cobre (Cu) e zinco (Zn).....	47
Tabela 5 – Teores médios de matéria seca da parte aérea (MSPA), da raiz (MSR), índice SPAD (SPAD), clorofila a (Chl a), b (Chl b), total (Chl total) e carotenoides em plantas de videira cultivadas em Neossolo e Latossolo, expostas à diferentes doses de cobre (Cu) e zinco (Zn).....	48
Tabela 6 – Análise de variância para os teores de cobre (Cu) e zinco (Zn) na parte aérea (Cu-PA e Zn-PA) e na raiz (Cu-R e Zn-R), e índice de translocação (IT) de Cu e Z em plantas de videira cultivadas em dois de solos (Neossolo e Latossolo), expostas a diferentes doses de Cu e Zn	49
Tabela 7 – Teores médios de cobre (Cu) e zinco (Zn) na parte aérea (Cu-PA e Zn-PA), na raiz (Cu-R e Zn-R), e índice de translocação (IT) de Cu e Z em plantas de videira cultivadas em dois de solos (Neossolo e Latossolo), expostas a diferentes doses de Cu e Zn.....	50
Tabela 8 – Análise de variância para os teores totais de nitrogênio (N), potássio (K), cálcio (Ca) e magnésio (Mg) na parte aérea de plantas de videira cultivadas em dois tipos de solo (Neossolo e Latossolo), expostas a diferentes doses de cobre (Cu) e zinco (Zn).....	51
Tabela 9 – Teores totais de nitrogênio (N), potássio (K), cálcio (Ca) e magnésio (Mg) na parte aérea de plantas de videira cultivadas em dois tipos de solo	

(Neossolo e Latossolo), expostas a diferentes doses de cobre (Cu) e zinco (Zn)52

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
2	REFERENCIAL TEÓRICO	14
2.1	A VITIVINICULTURA NO BRASIL	14
2.2	DINÂMICA DO COBRE E ZINCO NO SOLO	15
2.3	ALTERAÇÕES MORFOFISIOLÓGICAS EM PLANTAS OCASIONADAS PELOS ELEVADOS TEORES DE COBRE E ZINCO NO SOLO	17
2.4	SISTEMA ANTIOXIDANTE E PARÂMETROS FOTOSSINTÉTICOS EM PLANTAS SOB ESTRESSE POR METAIS PESADOS	20
3	HIPÓTESES	23
4	OBJETIVOS	23
4.1	GERAL	23
4.2	ESPECÍFICOS	23
5	ESTUDO 1	24
5.1	INTRODUÇÃO	24
5.2	MATERIAL E MÉTODOS.....	25
5.2.1	Caracterização e instalação do experimento	25
5.2.2	Análise dos parâmetros fotossintéticos	28
5.2.3	Análise dos parâmetros de crescimento	28
5.2.4	Análise dos nutrientes essenciais e metais pesados	28
5.2.5	Teores de cobre e zinco no solo	30
5.2.6	Análise estatística	31
5.3	RESULTADOS E DISCUSSÃO	31
5.4	CONCLUSÃO	39
6	ESTUDO 2	41
6.1	INTRODUÇÃO	41
6.2	MATERIAL E MÉTODOS.....	42
6.2.1	Caracterização e instalação do experimento	42
6.2.2	Análise dos parâmetros fotossintéticos	44
6.2.3	Análise dos parâmetros de crescimento	44
6.2.4	Análise dos nutrientes essenciais e metais pesados	44
6.2.5	Teores de cobre e zinco no solo	46
6.2.6	Análise estatística	46

6.3	RESULTADOS.....	46
6.3.1	Parâmetros fotossintéticos	46
6.3.2	Teores de cobre zinco nos tecidos	48
6.3.3	Macronutrientes nos tecidos	51
6.4	DISCUSSÃO	53
6.5	CONCLUSÃO	57
7	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	59
	REFERÊNCIAS	60

1 INTRODUÇÃO

A Região Sul do Brasil representa cerca de 56 % da produção nacional de uvas, com destaque para o Rio Grande do Sul, responsável por aproximadamente 53 % do valor bruto da produção (VBP) da cultura em 2024, segundo dados do IBGE e do Ministério da Agricultura (MAPA, 2025). Devido ao elevado índice pluviométrico característico da Região Sul do Brasil, a viticultura enfrenta desafios significativos no controle de doenças fúngicas foliares, principalmente o míldio (*Plasmopara viticola*). Para mitigar esses problemas, são realizadas em média 14 pulverizações por ciclo produtivo, sendo cerca de 8 a 10 especificamente voltadas ao manejo do míldio, com aplicações semanais de fungicidas convencionais (Chavarria, et al., 2007; Pinto et al., 2022).

Dentre os principais ingredientes ativos utilizados, destacam-se compostos à base de cobre (Cu), como a calda bordalesa [$\text{Ca(OH)}_2 + \text{CuSO}_4$] e o oxiclreto de cobre [$\text{CuCl}_2 \cdot 3\text{Cu(OH)}_2$], além do zinco (Zn), presente no fungicida Mancozeb [$(\text{C}_4\text{H}_6\text{N}_2\text{S}_4\text{Mn})_x\text{Zn}$]. O uso contínuo desses produtos leva ao acúmulo progressivo de Cu e Zn no solo, uma vez que a pulverização é direcionada às partes aéreas das plantas, e os resíduos podem alcançar o solo por meio do escoamento superficial, da queda de folhas tratadas ou senescentes e da lixiviação (Paradelo et al., 2008). Esses metais, devido à sua baixa mobilidade, tendem a se acumular nas camadas superficiais do solo, geralmente ligados à fração orgânica (Strawn & Baker, 2009).

A dinâmica de sorção de Cu e Zn nos solos ocorre inicialmente em sítios de maior afinidade, sendo os íons excedentes posteriormente redistribuídos em frações menos estáveis, mais móveis e, portanto, com maior potencial de disponibilidade às plantas (Tiecher et al., 2013). A disponibilidade desses metais é fortemente influenciada pelos teores de matéria orgânica, pela composição mineralógica da fração argila e pela presença de óxidos (Bradl, 2004; Strawn & Baker, 2009).

O acúmulo de metais em vinhedos tem se tornado uma preocupação crescente. Embora videiras adultas consigam se desenvolver em solos contaminados devido ao seu sistema radicular profundo, que pode alcançar camadas menos afetadas, a presença de Cu e Zn em altas concentrações na superfície do solo representa um risco significativo para plantas jovens e espécies utilizadas como cobertura vegetal (Miotto et al., 2014; Provenzano et al., 2010). Nessas condições, é comum observar redução no crescimento radicular, clorose em folhas novas e

acúmulo excessivo de metais nas raízes, o que compromete o desenvolvimento das plantas e pode causar perdas econômicas (Miotto et al., 2014; Giroto et al., 2014; Ambrosini et al., 2015).

A absorção excessiva de Cu e Zn pode desencadear estresse oxidativo, decorrente do desbalanço entre a geração de espécies reativas de oxigênio (EROs) e a capacidade antioxidante das plantas (Giroto et al., 2013). Esses metais também podem afetar negativamente a fotossíntese, as trocas gasosas e a integridade morfológica das raízes (Cambrollé et al., 2015; Ambrosini et al., 2015; Guimarães et al., 2016), dificultando o estabelecimento de culturas agrícolas em áreas contaminadas e ampliando os impactos ambientais e econômicos.

Os vinhedos, especialmente no Sul do Brasil, constituem agroecossistemas de grande relevância econômica, social e ambiental, contribuindo com a ciclagem de nutrientes e a conservação dos recursos naturais quando bem manejados. Contudo, os efeitos da contaminação por Cu e Zn ainda são pouco compreendidos em diferentes tipos de solo. A maioria dos estudos existentes concentra-se em solos arenosos da Campanha Gaúcha, muitas vezes conduzidos em soluções nutritivas ou em ambientes controlados, como casas de vegetação. Diante disso, torna-se essencial investigar como diferentes características edáficas influenciam a disponibilidade desses metais e seus impactos na fisiologia e morfologia de espécies vegetais cultivadas em solos contaminados.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 A VITIVINICULTURA NO BRASIL

A introdução da vitivinicultura no Brasil remonta a 1626, quando padres jesuítas, como Roque Gonzáles de Santa Cruz, implantaram videiras europeias na região das Missões, no atual Rio Grande do Sul, com a finalidade de produzir vinho para uso litúrgico. Posteriormente, entre 1745 e 1756, imigrantes açorianos ocuparam o litoral de Santa Catarina, mas a viticultura só ganhou maior expressão nas décadas seguintes. Em 1839, a uva americana Isabel (*Vitis labrusca*) foi introduzida com sucesso na Serra Gaúcha e, a partir de 1875, a chegada de imigrantes italianos da região do Vêneto consolidou a vitivinicultura regional, sobretudo com vinhedos da cultivar Isabel e outras castas adaptadas às condições locais (ENOPIRA, 2025).

Atualmente, a viticultura no Brasil ocupa cerca de 76.799 ha, dos quais 72,05% concentram-se na Região Sul (PROTAS et al., 2024). O Rio Grande do Sul lidera a atividade, com 47.564 ha cultivados (61,93% da área nacional), sendo responsável por mais de 90% da produção de vinhos e sucos do país. Em 2020, estima-se que 661.820 Mg de uvas foram destinadas ao processamento e 754.578 Mg ao consumo in natura (IBGE, 2020). O Paraná mantém aproximadamente 4.000 ha cultivados, enquanto Santa Catarina apresenta 3.773 ha, número ligeiramente inferior ao registrado em anos anteriores.

A vitivinicultura brasileira distribui-se desde o extremo sul (30°56'15"S) até regiões próximas à linha do equador (5°11'15"S), abrangendo aproximadamente 78 mil hectares. Essa amplitude geográfica resulta em distintos sistemas produtivos: regiões temperadas, com repouso hibernar da videira; áreas subtropicais, com dois ciclos anuais influenciados por variações térmicas e risco de geadas; e regiões tropicais, onde podas sucessivas permitem até três ciclos vegetativos por ano. Em média, a produção nacional de uvas gira em torno de 1,5 milhão de toneladas anuais. Desse total, cerca de 50% é destinado à industrialização em vinhos, sucos e derivados, e os outros 50% ao consumo in natura. Entre os processados, destacam-se os vinhos de mesa (42%) e os sucos de uva (49%), elaborados sobretudo a partir de cultivares americanas (*Vitis labrusca*, *Vitis bourquina* e híbridos interespecíficos). Já os vinhos finos, provenientes de *Vitis vinifera*, representam cerca de 7% da produção nacional (IBGE, 2020).

Apesar da relevância econômica, a vitivinicultura brasileira apresenta déficit na balança comercial. Em 2020, o setor registrou saldo negativo de US\$ 356,62 milhões, 4,18% superior ao de 2019. Nesse mesmo período, as exportações alcançaram US\$ 118,26 milhões, um aumento de 10,09% em relação ao ano anterior (IBGE, 2020).

No que se refere às condições edafoclimáticas, a Região Sul concentra os principais polos vitícolas do Brasil. O clima é predominantemente subtropical úmido e oceânico, classificado como Cfa e Cfb segundo Köppen-Geiger, com temperaturas médias anuais variando entre 14 °C e 24 °C, conforme o relevo. A precipitação situa-se entre 1.250 mm e 2.000 mm, sendo mais elevada no litoral paranaense e no oeste de Santa Catarina. Embora essas condições favoreçam a diversidade agrícola, também impõem desafios à vitivinicultura, sobretudo pela elevada umidade, que aumenta a incidência de doenças fúngicas, e pelas variações térmicas que podem comprometer a qualidade das uvas.

Essas características climáticas exigem práticas intensivas de manejo fitossanitário. Destaca-se o uso recorrente de fungicidas à base de cobre (Cu) e zinco (Zn), aplicados nas partes aéreas das plantas para controle de patógenos. Entretanto, parte desses insumos atinge o solo por meio da lavagem pelas chuvas, da queda de folhas tratadas ou senescentes e da ação da gravidade, promovendo o acúmulo gradual de metais pesados ao longo dos ciclos produtivos (Paradelo et al., 2008). Esse processo levanta preocupações ambientais e agrônômicas, sobretudo quanto à contaminação do solo e aos impactos sobre o desenvolvimento de videiras jovens e espécies de cobertura.

2.2 DINÂMICA DO COBRE E ZINCO NO SOLO

As aplicações frequentes de fungicidas em vinhedos promovem o acúmulo de Cu e Zn no solo, alterando a distribuição de suas frações químicas e aumentando a proporção das formas mais lábeis, o que pode intensificar os efeitos tóxicos sobre as plantas (Ferreira et al., 2024). A elevação da labilidade desses metais também favorece sua mobilização por meio da solução do solo, ampliando o risco de contaminação ambiental, incluindo a possibilidade de atingirem águas subterrâneas. Essa situação foi observada em solos arenosos por Mirlean et al. (2007), que associaram tal mobilidade à interação de fatores como alta precipitação, textura arenosa, acidez do solo e proximidade do aquífero da superfície.

O impacto do excesso de metais pesados no solo está relacionado não apenas à sua concentração total, mas também às formas químicas em que se encontram, como as frações solúvel, trocável, oclusa, precipitada, complexada à matéria orgânica ou associada à biomassa microbiana (McBride, 1994). Nesse contexto, a disponibilidade (ou biodisponibilidade) de um metal é definida pela interação entre os fatores de intensidade, quantidade e capacidade tampão durante o ciclo da cultura (Abreu et al., 2002).

A mobilidade e disponibilidade de Cu e Zn no solo são determinadas por suas interações com os grupos funcionais das partículas reativas, cuja capacidade de sorção é influenciada por características edáficas. Solos com maior teor de argila, óxidos e hidróxidos de ferro (Fe), alumínio (Al) e manganês (Mn), além de altos níveis de matéria orgânica (MOS) e carbonatos, tendem a apresentar maior capacidade de retenção desses metais (Bradl, 2004). Entre os principais fatores que influenciam esse processo, destacam-se o pH, a capacidade de troca catiônica (CTC) e a qualidade da MOS, os quais regulam diretamente os mecanismos de sorção (Brun et al., 2001; Arias et al., 2005). Em solos de pH neutro a alcalino, a disponibilidade de Cu e Zn é geralmente reduzida devido à maior precipitação e adsorção facilitada pela presença de carbonatos (Bradl, 2004). Em contrapartida, solos ácidos favorecem a solubilização desses elementos, aumentando seu potencial tóxico e o risco de contaminação ambiental (Pietrzak & Mcphail, 2004). Neste cenário, a prática da calagem é fundamental, pois a elevação do pH promove a desprotonação de grupos funcionais da MOS e dos argilominerais, aumentando as cargas negativas dos coloides e favorecendo a retenção de Cu e Zn no solo (Brunetto et al., 2014).

A retenção de Zn no solo está positivamente correlacionada ao teor de carbono orgânico, sendo predominantemente adsorvido por meio da formação de complexos de esfera externa, interações eletrostáticas menos estáveis (Araújo et al., 2002). Apesar disso, os minerais do solo respondem por até 60% da retenção do Zn aplicado, evidenciando o papel central da fração mineral nesse processo (Giotto et al., 2010). Já o Cu apresenta comportamento distinto: em solos da região Sul do Brasil, cerca de 71% do Cu total está associado à fração orgânica (Giotto et al., 2010). Essa diferença decorre da configuração eletrônica dos elementos. O Cu ($[Ar] 3d^{10} 4s^1$) apresenta estados de oxidação variáveis, com destaque para Cu^{2+} , que possui elevada afinidade para formar complexos de coordenação estáveis com grupos funcionais ricos em oxigênio, nitrogênio e enxofre da matéria orgânica, resultando em

ligações covalentes fortes e específicas (Croué et al., 2003). O Zn ($[Ar] 3d^{10} 4s^2$), por sua vez, ao apresentar um orbital mais estável, tende a formar interações menos específicas e predominantemente eletrostáticas, o que explica sua maior dependência da composição mineralógica e sua menor imobilização pela matéria orgânica.

Estudo conduzido por Fadigas et al. (2002), com 162 amostras representativas das principais classes de solo do Brasil, destacando-se Argissolos (27%) e Latossolos (42%), demonstrou correlação positiva e significativa entre o teor de argila e os teores totais de Cu e Zn, por meio de análise de componentes principais. Essa relação entre metais pesados e argila já havia sido apontada em outros estudos (Souza et al., 1996; Lavado et al., 1998).

Importante destacar que a presença de Cu pode interferir na dinâmica do Zn no solo, e vice-versa, devido à competição por sítios de adsorção e processos de interação química. Estudos indicam que altas concentrações de Cu podem reduzir a disponibilidade de Zn ao competir pelos mesmos locais de fixação no solo, o que pode afetar a absorção da planta e gerar desequilíbrios nutricionais (Arias et al., 2006; Tiecher et al., 2016a). Similarmente, níveis elevados de Zn podem influenciar a mobilidade do Cu, embora esse efeito seja geralmente menos pronunciado, dada a maior afinidade do Cu por grupos funcionais da MOS. Essa interação complexa entre Cu e Zn deve ser considerada na avaliação do risco de toxicidade e no manejo dos solos contaminados.

A principal preocupação associada ao aumento dos teores de Cu e Zn em formas mais biodisponíveis é a toxidez potencial às videiras jovens e às espécies de cobertura utilizadas nos vinhedos. Essa situação é especialmente relevante nas condições edafoclimáticas da região Sul do Brasil, onde solos ácidos, elevada precipitação e práticas contínuas de aplicação de fungicidas favorecem o acúmulo desses elementos nas camadas superficiais, aumentando os riscos agrônômicos e ambientais (Giroto et al., 2014; Miotto et al., 2014; Tiecher et al., 2016a, 2017).

2.3 ALTERAÇÕES MORFOFISIOLÓGICAS EM PLANTAS OCACIONADAS PELOS ELEVADOS TEORES DE COBRE E ZINCO NO SOLO

O Cu e o Zn são micronutrientes essenciais ao crescimento e desenvolvimento das plantas, exigidos em quantidades significativamente menores que os macronutrientes. Ambos participam de praticamente todas as funções metabólicas e celulares, incluindo o metabolismo energético, processos primário e

secundário, proteção contra estresses oxidativos, regulação da expressão gênica, percepção hormonal, transdução de sinais e reprodução vegetal (Hansch & Mendel, 2009; Kabata-Pendias, 2011).

O Cu, em especial, está envolvido em processos fundamentais como a fotossíntese e a respiração mitocondrial, no metabolismo de carboidratos, na reprodução e na proteção contra espécies reativas de oxigênio. Também é necessário para a síntese da parede celular (Hansch & Mendel, 2009; Kabata-Pendias, 2011). A maior parte do Cu nas plantas localiza-se nos cloroplastos, participando diretamente das reações fotossintéticas. Assim, sua deficiência costuma manifestar-se primeiramente em folhas jovens e estruturas reprodutivas (Hansch & Mendel, 2009).

O Zn, por sua vez, atua como cofator enzimático na síntese de proteínas, na geração de energia e na manutenção da integridade estrutural das biomembranas (Kramer & Clemens, 2005). Além disso, está associado a funções como metabolismo de carboidratos, regulação da transcrição de DNA, processamento de RNA, tradução de proteínas, manutenção da estrutura do ribossomo e metabolismo de fosfatos. Também é essencial para a atividade de enzimas como desidrogenases, proteinases e peptidases (Kabata-Pendias, 2011).

Contudo, o acúmulo excessivo de Cu e Zn no solo pode comprometer o desenvolvimento vegetal. Ambrosini et al. (2015) observaram que a presença em níveis tóxicos desses metais reduz os teores de pigmentos fotossintéticos e altera a morfologia radicular, dificultando a absorção de água e nutrientes. Essa toxicidade pode afetar também plantas de cobertura como a aveia-preta (*Avena strigosa*), utilizada nas entrelinhas de vinhedos, prejudicando seu crescimento e eficiência no controle da erosão (Santana et al., 2015; Tiecher et al., 2016b).

Em estudo conduzido por Tiecher et al. (2017) em Argissolo Vermelho com adição combinada de Cu e Zn, foi observada retenção desses metais nas raízes de videiras jovens, com consequente redução na translocação para a parte aérea. Em doses mais elevadas, verificou-se redução no crescimento das plantas e na eficiência fotoquímica, associadas à diminuição dos pigmentos fotossintéticos.

Plantas jovens e de cobertura cultivadas em solos com altos teores de Cu e Zn tendem a apresentar crescimento lento, clorose foliar e acúmulo dos metais em diferentes órgãos (Ambrosini et al., 2015). Após a absorção, os íons Cu^{2+} e Zn^{2+} induzem alterações nos transportadores de membrana e canais iônicos. O Cu^{2+} , por exemplo, compete com Ca^{2+} e Mg^{2+} , reduzindo a absorção desses elementos,

enquanto o Zn^{2+} pode substituir cátions divalentes de maior raio iônico como Mn^{2+} e Fe^{2+} , provocando deficiências nutricionais e afetando processos vitais como fotossíntese e respiração, além de aumentar a suscetibilidade a pragas e doenças (Kabata-Pendias, 2011).

Esses metais são majoritariamente retidos nas raízes, onde a translocação para a parte aérea ocorre de forma limitada. Isso se deve à ativação de mecanismos de defesa vegetal, que incluem alterações morfológicas no sistema radicular com o objetivo de restringir a absorção e a mobilização excessiva dos íons metálicos (Kabata-Pendias, 2011). O acúmulo de Cu, por exemplo, pode promover maior diferenciação celular da endoderme e lignificação dos tecidos corticais, resultando no espessamento da parede celular (Arduini et al., 1995). Além disso, pode haver redução da coifa, menor atividade meristemática e acúmulo de compostos fenólicos, como evidenciado por Ambrosini et al. (2015), que estudaram o efeito da aplicação de 0 e 50 mg kg⁻¹ de Cu em solos arenosos, com e sem correção com calcário, sobre videiras jovens e aveia-preta. Os resultados indicaram que a dose de 50 mg kg⁻¹ de Cu inibiu o crescimento da aveia-preta, alterou a distribuição de nutrientes, reduziu a concentração de clorofila e aumentou os teores de carboidratos solúveis e amido. Nas videiras, a mesma dose comprometeu a estrutura das raízes, reduziu os teores de Ca e aumentou a concentração de Cu nas raízes.

Tais estratégias de tolerância, embora visem reduzir a toxicidade dos metais, resultam em menor absorção de água e nutrientes essenciais, implicando na redução da biomassa radicular (Ambrosini et al., 2015). A fotossíntese líquida também é prejudicada, dado que a atividade enzimática e as trocas gasosas são comprometidas. Diminuições nos níveis de pigmentos fotossintéticos, como clorofilas *a*, *b* e carotenoides, foram relatadas em plantas cultivadas sob condições de elevada contaminação metálica (Tiecher et al., 2016a, 2016b).

Em experimento conduzido por Tiecher et al. (2017) em um Argissolo Vermelho típico da região da Campanha Gaúcha (RS), foram aplicadas doses de 0, 30 e 60 mg kg⁻¹ de Cu e 0, 15, 20, 60, 120 e 180 mg kg⁻¹ de Zn. Após cultivo de aveia-preta por 30 dias, foram transplantadas mudas de videira, mantidas por 60 dias. Observou-se que os tratamentos sem adição de Cu resultaram na maior produção de matéria seca da parte aérea e das raízes das videiras. Nos tratamentos com 30 e 60 mg kg⁻¹ de Cu, os teores de Cu na parte aérea foram iguais ou superiores a 15 mg kg⁻¹, enquanto os teores de Zn ultrapassaram 200 mg kg⁻¹ nas condições com adição

de 60 mg kg⁻¹ de Zn ou mais. Ainda assim, o Cu acumulou-se majoritariamente nas raízes, com baixa mobilidade para os tecidos superiores, corroborando resultados obtidos tanto para aveia-preta cultivada em solos contaminados com Cu (Tiecher et al., 2016b), quanto para videiras expostas a soluções nutritivas com elevadas concentrações desse metal (Cambrollé et al., 2013; 2015).

2.4 SISTEMA ANTIOXIDANTE E PARÂMETROS FOTOSSINTÉTICOS EM PLANTAS SOB ESTRESSE POR METAIS PESADOS

O acúmulo excessivo de Cu e Zn nos solos de vinhedos pode desencadear efeitos fitotóxicos em diversas espécies vegetais, com destaque para as videiras e plantas de cobertura cultivadas nesses ambientes (Tiecher et al., 2016a, 2016b). Fisiologicamente, a presença desses metais em concentrações elevadas promove alterações no sistema fotossintético, induz foto-inibição, afeta o transporte de elétrons e reduz os teores de pigmentos fotossintéticos. Esses efeitos comprometem a captação de energia luminosa e a assimilação de carbono, além de danificar estruturas celulares como os cloroplastos e as moléculas de clorofila. Em consequência, há inibição da divisão celular e desaceleração do crescimento vegetal (Cambrollé et al., 2015).

O estresse provocado pela absorção excessiva de Cu e Zn também está fortemente associado ao aumento da produção de espécies reativas de oxigênio (EROs), como resultado do desequilíbrio entre sua geração e a capacidade antioxidante da planta (Giroto et al., 2013). As EROs são radicais livres altamente reativos, gerados principalmente na cadeia de transporte de elétrons mitocondrial durante o processo respiratório (Halliwell & Gutteridge, 2007). Devido à sua constante formação nos organismos autotróficos, as plantas desenvolveram sofisticados sistemas antioxidantes para minimizar os danos oxidativos. Os antioxidantes são definidos como moléculas capazes de inibir ou retardar processos de oxidação, protegendo as estruturas celulares contra os efeitos deletérios das EROs (Halliwell & Gutteridge, 2007).

O sistema antioxidante das plantas é composto por mecanismos enzimáticos e não enzimáticos que atuam em sinergia na desintoxicação das EROs, possibilitando a restauração da homeostase celular frente ao estresse (Martinez et al., 2010). Entre as enzimas antioxidantes, destacam-se a superóxido dismutase (SOD), a ascorbato peroxidase (APX) e a catalase (CAT). A SOD, considerada a primeira linha de defesa

antioxidante, catalisa a dismutação do radical superóxido (O_2^-) em peróxido de hidrogênio (H_2O_2) e oxigênio molecular (O_2), contribuindo para a modulação dos níveis de H_2O_2 nos cloroplastos, mitocôndrias, peroxissomos e citosol (Mittler, 2002). A APX é particularmente eficaz na eliminação do H_2O_2 nos cloroplastos e citosol, embora também atue em mitocôndrias, parede celular e peroxissomos (Hegedüs et al., 2001). Já a CAT complementa essa ação ao converter o H_2O_2 em água e oxigênio.

No caso do Cu, sua capacidade redox promove reações do tipo Fenton, nas quais a alternância entre os estados Cu^{2+} e Cu^+ catalisa a formação de radicais hidroxila (OH^-) a partir do O_2^- e do H_2O_2 , exacerbando o estresse oxidativo (Vo et al., 2024). Como resposta, a planta ativa seu sistema antioxidante enzimático, com o objetivo de preservar a integridade das membranas celulares (Gill & Tuteja, 2010). Já o Zn, embora não atue diretamente como agente redox, interfere negativamente no sistema antioxidante, contribuindo para a intensificação do estresse oxidativo em condições de acúmulo excessivo (Gratão et al., 2005; Girotto et al., 2013). Andrade et al. (2010) observaram que a elevação da atividade das enzimas antioxidantes está correlacionada com maior tolerância ao estresse induzido por metais como Cu e Zn.

Diante disso, diversos estudos têm utilizado a atividade das enzimas antioxidantes como biomarcadores na avaliação da toxicidade por metais pesados em plantas (Girotto et al., 2014; Miotto et al., 2014; Santana et al., 2015; Tiecher et al., 2017), devido à sua alta sensibilidade em detectar os efeitos fisiológicos precoces da fitotoxicidade.

A elevada concentração de Cu e Zn, especialmente em órgãos fotossinteticamente ativos, compromete processos celulares essenciais como a biossíntese de clorofila e a assimilação do carbono (Chen et al., 2008). De forma recorrente, estudos relatam a redução nos teores de clorofila *a*, clorofila *b* e carotenoides em plantas cultivadas em solos contaminados com esses metais (Santana et al., 2015; Tiecher et al., 2016b; 2017). Essa diminuição pode estar relacionada tanto à degradação acelerada das clorofilas quanto à inibição de sua síntese, sendo reflexo do comprometimento do transporte de elétrons no fotossistema (Cambrollé et al., 2013).

Reduções semelhantes nos níveis de pigmentos fotossintéticos foram observadas em diferentes espécies vegetais, como feijão-de-porco (*Canavalia ensiformis*), milho (*Zea mays* L.) e aveia-preta (*Avena strigosa* Schreb.), cultivadas em

solos com concentrações elevadas de Cu e Zn (Santana et al., 2015; Tiecher et al., 2016b).

Embora a quantificação laboratorial da clorofila seja um método preciso, apresenta limitações como o tempo de processamento e a destruição do material vegetal (Ferreira et al., 2006). Como alternativa, instrumentos portáteis como medidores de clorofila do tipo SPAD permitem a avaliação não destrutiva da intensidade do verde das folhas, fornecendo leituras rápidas e correlacionadas com o teor de clorofila (Gil et al., 2002). Esses dispositivos operam com base na medição da transmissão de luz em dois comprimentos de onda: 650 nm, onde há absorção pela clorofila, e 940 nm, onde não ocorre absorção. A partir dessas leituras, o equipamento calcula um índice (SPAD), frequentemente associado ao status nutricional da planta e capaz de indicar tanto deficiências quanto toxicidade por metais pesados (Gil et al., 2002; Ferreira et al., 2006).

3 HIPÓTESES

H₁: Solos com maiores teores de argila reduzem os efeitos tóxicos de concentrações elevadas de Cu e Zn, enquanto solos com baixos teores de argila, devido à menor capacidade de adsorção e complexação, intensificam as alterações morfofisiológicas e fotossintéticas em aveia-preta (*Avena strigosa* Schreb.) e videiras jovens (*Vitis* spp.).

4 OBJETIVOS

4.1 GERAL

Avaliar os efeitos de diferentes concentrações de Cu e Zn sobre o crescimento, a nutrição e os processos fisiológicos de videiras jovens (*Vitis* spp.) e plantas de aveia-preta (*Avena strigosa* Schreb.), cultivadas em solos com características contrastantes representativos da região Sul do Brasil.

4.2 ESPECÍFICOS

- i) Analisar os efeitos tóxicos do Cu e Zn sobre os parâmetros fotossintéticos de videiras jovens e aveia-preta, considerando a influência das características dos diferentes solos utilizados.
- ii) Avaliar os processos de absorção e translocação de Cu e Zn nas plantas e seus efeitos sobre a disponibilidade e absorção de nutrientes essenciais, como nitrogênio, potássio, cálcio e magnésio, em videiras jovens e aveia-preta.

5 ESTUDO 1

Alterações Fisiológicas em Aveia-preta Cultivada em Neossolo e Latossolo Contaminados com Cobre e Zinco

5.1 INTRODUÇÃO

A viticultura exerce papel fundamental na economia da região Sul do Brasil, especialmente nos estados do Rio Grande do Sul, Santa Catarina e Paraná. Em 2022, o Brasil possuía cerca de 74.520 hectares de vinhedos, com o Rio Grande do Sul concentrando aproximadamente 47% da produção nacional de uvas (≈ 703 mil toneladas), seguido por Santa Catarina e Paraná (BRASIL, 2023). Além da importância socioeconômica, a viticultura destaca-se por adotar práticas sustentáveis como a cobertura vegetal do solo, especialmente em áreas declivosas da Serra Gaúcha e do Planalto Catarinense. O uso de plantas de cobertura nesses sistemas promove melhorias na qualidade física e biológica do solo, reduz perdas por erosão, aumenta o teor de matéria orgânica e contribui para o controle de plantas daninhas e redução do uso de herbicidas (Cassol et al., 2020; Flores et al., 2023). Entre as espécies mais utilizadas, destaca-se a aveia-preta (*Avena strigosa* Schreb), devido à sua rusticidade, ciclo curto e capacidade de adaptação a diferentes condições edafoclimáticas.

Entretanto, em vinhedos com longo histórico de cultivo, é comum o acúmulo de metais pesados no solo, principalmente cobre (Cu) e zinco (Zn), oriundos do uso frequente de fungicidas como a calda bordalesa e o Mancozebe. Esses elementos tendem a se acumular nas camadas superficiais do solo, devido à baixa mobilidade, podendo atingir concentrações fitotóxicas ao longo do tempo (Giroto et al., 2016). Em plantas de cobertura, como a aveia-preta, o excesso de Cu e Zn pode comprometer o crescimento, a absorção de nutrientes e a fotossíntese, além de provocar alterações no balanço redox celular, reduzindo sua eficiência agrônômica e ambiental (Hu et al., 2023). Assim, compreender a resposta fisiológica dessa espécie frente à contaminação por metais em diferentes classes de solo é essencial para avaliar sua viabilidade como estratégia sustentável em sistemas vitivinícolas.

Neste contexto, a importância deste estudo está em compreender como diferentes doses combinadas de Cu e Zn afetam a fisiologia da aveia-preta cultivada em dois tipos de solo característicos do sul do Brasil, o Neossolo e o Latossolo, com texturas distintas. Essa análise é fundamental para avaliar a influência da textura do

solo nas respostas da planta, contribuindo para determinar a viabilidade da aveia-preta como uma estratégia sustentável de manejo em áreas vitivinícolas contaminadas por metais pesados.

5.2 MATERIAL E MÉTODOS

5.2.1 Caracterização e instalação do experimento

O experimento foi conduzido em casa de vegetação no Departamento de Microbiologia, Imunologia e Parasitologia da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), em Florianópolis (SC), utilizando dois tipos de solo contrastantes: um Neossolo Quartzarênico e um Latossolo Vermelho (Santos et al., 2018). As amostras de solo foram coletadas nos municípios de Araranguá (SC) e Ibirubá (RS), respectivamente, em quantidade aproximada de 400 kg por solo.

Após a coleta, os solos foram encaminhados ao Laboratório de Análise de Solo, Água e Tecidos Vegetais da UFSC para caracterização físico-química. Subamostras (cerca de 300 g) foram secas em estufa com circulação de ar forçado a 40 °C, peneiradas em malha de 2 mm e submetidas às análises. Os parâmetros determinados foram: teor de argila e carbono orgânico total (COT), conforme metodologia da EMBRAPA (2017); pH em água (1:1 solo:água); índice SMP; teores disponíveis de P, K, Cu, Mn e Zn (extrator Mehlich-1); e teores trocáveis de Al, Ca e Mg (extrator KCl 1,0 mol L⁻¹), segundo os procedimentos descritos por Tedesco et al. (1995).

A partir desses dados, foram calculados os valores de acidez potencial (H+Al), capacidade de troca catiônica efetiva (CTCefetiva) e potencial (CTCpH7,0), além dos índices de saturação por alumínio (m%) e por bases (V%), conforme fórmulas apresentadas pela CQFS-RS/SC (2016). As principais características dos solos utilizados podem ser encontradas na Tabela 1.

Tabela 1. Caracterização dos solos utilizados nos experimentos em casa de vegetação com o cultivo de videiras jovens com a aplicação de diferentes doses de cobre e zinco.

Atributos físico-químicos	Neossolo	Latossolo
Argila, g kg ⁻¹	45	481
COT, g kg ⁻¹	12,26	30,51
pH _{água}	4,67	5,22
SMP	6,92	5,64
H+Al, cmol _c dm ⁻³	1,51	6,59
P, mg kg ⁻¹	4,50	35,08
K, cmol _c dm ⁻³	0,01	1,17
Ca, cmol _c dm ⁻³	3,31	8,39
Mg, cmol _c dm ⁻³	4,52	8,62
Al, cmol _c dm ⁻³	0,50	0,00
Cu, mg L ⁻¹	0,93	5,48
Zn, mg L ⁻¹	0,86	2,32
Mn, mg L ⁻¹	21,26	134,98
CTC _{efetiva} , cmol _c dm ⁻³	8,38	17,13
CTC _{pH7,0} , cmol _c dm ⁻³	9,49	19,73
Saturação por Al, %	5,96	0,00
Saturação por K+Ca+Mg, %	83	87

Com base na caracterização inicial dos solos, foram calculadas as quantidades necessárias de carbonato de cálcio (CaCO₃) e carbonato de magnésio (MgCO₃), na proporção 2:1 (PRNT = 100%), para elevar o pH de cada solo até o valor de 6,0. Após a incorporação desses corretivos, os solos foram umedecidos até atingir 60% da capacidade máxima de retenção de água (CMRA) e mantidos nessa condição por 30 dias, com monitoramento da umidade a cada dois dias.

A CMRA foi determinada utilizando-se 30 g de solo colocado em funil com lã de vidro na extremidade inferior, seguida da adição de 50 mL de água destilada. O excesso de água drenada foi coletado em recipiente apropriado. Após 4 horas, a CMRA FOI calculada pela diferença entre o volume de água adicionado e o volume coletado, sendo posteriormente extrapolada para 1 kg de solo. Para o experimento, adotou-se o valor correspondente a 60% da CMRA como referência para irrigação.

Não foi necessária a adubação de fósforo (P) e potássio (K) antes do transplante das mudas, pois os teores desses nutrientes estavam classificados como “muito altos” segundo as recomendações da CQFS-RS/SC (2016). Quanto ao nitrogênio (N), aplicou-se ureia no 20º dia do experimento, com doses ajustadas para 80 kg ha⁻¹ no Neossolo e 40 kg ha⁻¹ no Latossolo, conforme recomendações da CQFS-RS/SC (2016) para a cultura da aveia.

Finalizado o período de incubação, os solos foram homogeneizados com auxílio de betoneira e distribuídos em vasos plásticos de 5 litros, contendo 4 kg de solo cada. Posteriormente, foram aplicadas quatro doses de cobre (0, 30, 60 e 120 mg kg⁻¹) em combinação com quatro doses de zinco (0, 60, 120 e 240 mg kg⁻¹), totalizando 16 tratamentos. Cada tratamento contou com três repetições, totalizando 48 unidades experimentais para cada solo (Neossolo e Latossolo).

As doses de Cu e Zn utilizadas basearam-se nos estudos de Tiecher et al. (2016, 2018). As fontes dos metais foram sulfato de cobre e sulfato de zinco, respectivamente, os quais foram previamente diluídos em água na concentração necessária para atingir as doses estipuladas e aplicados ao solo com o auxílio de pisseta plástica, garantindo homogeneidade na distribuição. O delineamento experimental foi inteiramente casualizado, em esquema fatorial 4 × 4, com os fatores correspondendo às doses de Cu e Zn.

Inicialmente, foram semeadas cinco sementes de milho (*Zea mays* L.) em cada vaso contendo solo previamente preparado. Após sete dias da germinação, realizou-se o desbaste, mantendo-se apenas as duas plantas com maior vigor e desenvolvimento inicial. As plantas de milho foram cultivadas por um período de 30 dias sob condições controladas. Ao término desse período, o material vegetal foi coletado e destinado às análises posteriores (não utilizadas na tese).

Em seguida, as sementes de aveia-preta (*Avena strigosa* Schreb) foram semeadas nos mesmos vasos, utilizando-se o mesmo solo, sem qualquer adição de nutrientes ou correção química entre os cultivos, de modo a preservar as condições originais do substrato. As plantas de aveia foram mantidas sob as mesmas condições experimentais por mais 30 dias. Durante todo o período experimental, as irrigações foram realizadas diariamente, de modo a manter a umidade do solo em aproximadamente 60% da capacidade máxima de retenção de água (CMRA).

5.2.2 Análise dos parâmetros fotossintéticos

No 30º dia após o plantio, foi determinado o índice SPAD utilizando um clorofilômetro SPAD-502 (Minolta, Japão). Foram realizadas cinco leituras na folha mais desenvolvida de uma planta por vaso, entre 9h e 11h da manhã. Em seguida, as folhas foram coletadas, pesadas para determinação da massa fresca (g) e imersas em 5 mL de dimetilsulfóxido (DMSO), sendo mantidas em temperatura ambiente e protegidas da luz por 36 horas. Após esse período, uma alíquota de 250 µL da solução foi utilizada para medir a absorvância em leitor de microplacas (SpectraMax Paradigm, Molecular Devices, Inglaterra) nos comprimentos de onda de 665, 645 e 480 nm. Com base nessas leituras, foram calculados os teores de clorofila *a*, clorofila *b*, clorofila total e carotenoides (mg g^{-1}), conforme os métodos de Hiscox & Israelstam (1979) e Wellburn (1994).

5.2.3 Análise dos parâmetros de crescimento

Após a coleta das folhas, as plantas foram cuidadosamente retiradas dos vasos para evitar danos ao sistema radicular. As raízes foram então lavadas com solução de $0,02 \text{ mol L}^{-1}$ de ácido etilenodiamino tetra-acético (EDTA) e posteriormente enxaguadas três vezes com água destilada para remoção de resíduos de solo (Miotto et al., 2014; Tiecher et al., 2016a). Em seguida, a parte aérea e as raízes das plantas foram pesadas, separadamente, em balança de precisão para determinação da massa fresca da parte aérea (MFPA) e da raiz (MFR) (g). Posteriormente, foram acondicionadas em estufa com circulação de ar a $60 \text{ }^\circ\text{C}$ até atingirem peso constante, quando foram novamente pesadas para obtenção da matéria seca da parte aérea (MSPA) e da raiz (MSR).

5.2.4 Análise dos nutrientes essenciais e metais pesados

Após a secagem e pesagem, as plantas foram trituradas com o auxílio de um moedor de tecido. Para a determinação dos teores totais de macronutrientes (N, K, Ca e Mg) na parte aérea e nas raízes, foram utilizadas amostras de 0,2 g do material triturado, submetidas à digestão ácida com ácido sulfúrico, conforme descrito por Tedesco et al. (1995).

O teor de N foi determinado pelo método titulométrico, baseado na digestão das amostras em ácido sulfúrico concentrado na presença dos catalisadores (Na_2SO_4 ,

CuSO₄ e selênio), que promove a conversão do nitrogênio orgânico em íons amônio (NH₄⁺). Após o resfriamento, a solução foi alcalinizada com hidróxido de sódio (NaOH) e destilada, liberando amônia (NH₃), que foi capturada em solução de ácido bórico (H₃BO₃) e titulada com solução padrão de ácido sulfúrico (H₂SO₄) 0,01 mol L⁻¹ para quantificação do nitrogênio total.

Os teores de K, Ca e Mg foram determinadas por espectrometria de absorção atômica (FAAS - Flame Atomic Absorption Spectrometry), após a digestão ácida do material vegetal. Para isso, as amostras digeridas foram diluídas em água deionizada e analisadas no espectrofotômetro, utilizando comprimentos de onda específicos para cada elemento: 766,5 nm para K, 422,7 nm para Ca e 285,2 nm para Mg, conforme procedimentos padronizados descritos por Tedesco et al. (1995).

Para a determinação dos micronutrientes Cu e Zn, foi realizada uma digestão nitroperclórica, e a quantificação dos teores desses elementos no extrato obtido foi feita por espectrometria de absorção atômica, utilizando o equipamento PerkinElmer Analyst 200 (Estados Unidos), conforme descrito por Tedesco et al. (1995). O cálculo do acúmulo (A) de Cu e Zn na parte aérea (folhas + caule) e nas raízes das plantas foi realizado por meio da equação 1:

$$A = (MSPA \text{ ou } MSR \times C) / 1000 \quad (1)$$

Onde: MSPA representa a massa seca da parte aérea (mg), MSR a massa seca das raízes (mg) e C a concentração do elemento (mg kg⁻¹). A quantidade total acumulada de Cu e Zn na planta foi obtida pela soma das quantidades acumuladas em cada parte da planta, ou seja, parte aérea e raízes.

A partir dessa quantidade total acumulada, foi calculada a porcentagem de acúmulo dos metais em cada parte da planta. Conforme Abicheque e Bohnen (1998), o índice de translocação (IT) dos elementos foi calculado, em porcentagem, pela equação:

$$IT = (QAPA / QAP) \times 100 \quad (2)$$

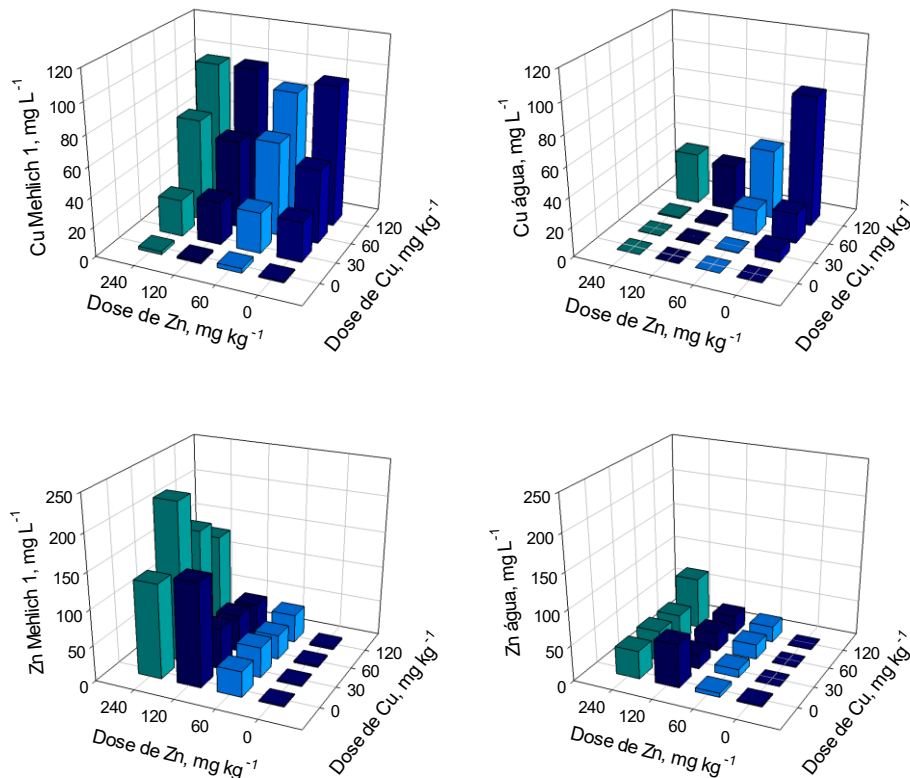
Onde: QAPA é a quantidade do elemento acumulada na parte aérea, expressa em miligramas (mg), e QAP é a quantidade total do elemento acumulada na

planta, também em miligramas (mg), correspondendo à soma das quantidades acumuladas na parte aérea e nas raízes.

5.2.5 Teores de cobre e zinco no solo

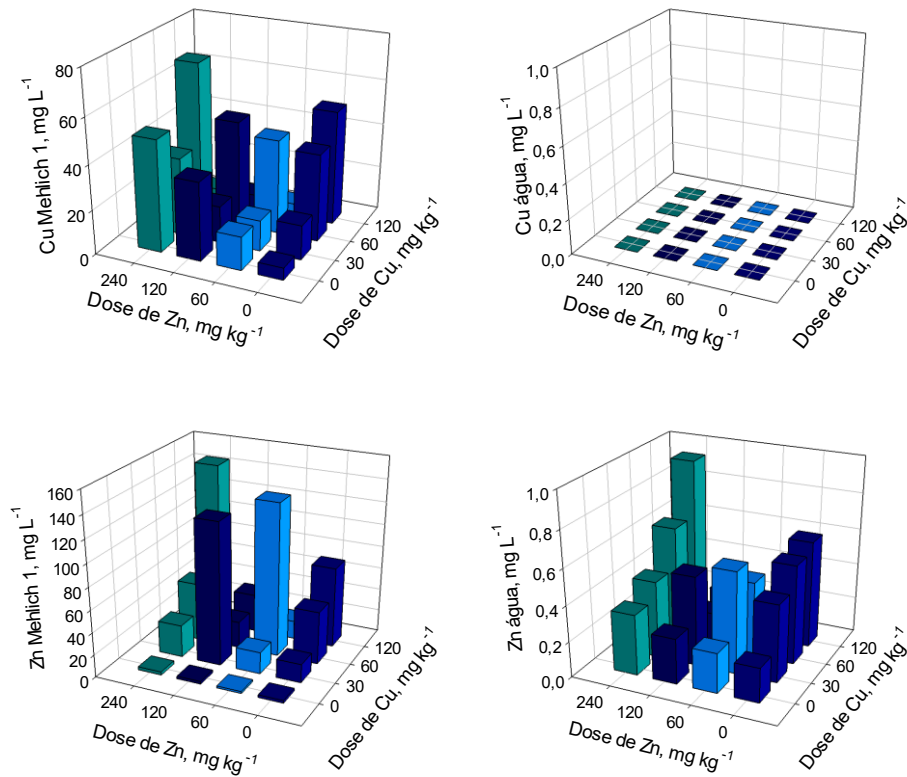
Ao final do experimento, amostras de solo (± 100 g) foram coletadas de cada vaso para determinação dos teores de Cu e Zn extraídos em água e em Mehlich 1 para caracterização e auxílio na discussão dos resultados. As amostras coletadas foram secas em estufa com circulação forçada de ar a 45°C sendo, posteriormente, moídas e peneiradas em malha de 2,0 mm. Os teores de Cu e Zn solúveis em água (relação 1:10, solo-solução) foram determinados como proposto por Moraes (2020), enquanto os teores de Cu e Zn extraídos por Mehlich-1 foram determinados conforme Tedesco et al. (1995). Os dados de Cu e Zn extraídos por água e Mehlich 1 estão apresentados nas Figuras 1 e 2, para Neossolo e Latossolo, respectivamente.

Figura 1. Teores de Cu e Zn extraídos por água e Mehlich 1 em Neossolo após a aplicação de diferentes doses de Cu e Zn.



Fonte: Autor (2025).

Figura 2. Teores de Cu e Zn extraídos por água e Mehlich 1 em Latossolo após a aplicação de diferentes doses de Cu e Zn.



Fonte: Autor (2025).

5.2.6 Análise estatística

Os dados obtidos foram submetidos à análise de variância (ANOVA), utilizando um modelo linear adequado ao delineamento experimental, com o objetivo de avaliar os efeitos das doses de Cu, Zn e da interação Cu × Zn sobre as variáveis analisadas. Quando identificadas diferenças significativas, as médias dos tratamentos foram comparadas pelo teste de Tukey, ao nível de 5% de probabilidade.

Todas as análises estatísticas foram conduzidas utilizando o software Sisvar, versão 5.8 (Ferreira, 2011), e os resultados foram interpretados com base nos níveis de significância estatística adotados e nas características dos modelos ajustados.

5.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A análise de variância dos dados experimentais revelou que a matéria seca da parte aérea (MSPA) da aveia-preta foi significativamente influenciada apenas pelo tipo de solo (Tabela 2).

Tabela 2. Análise de variância dos parâmetros fisiológicos, nutricionais e de acúmulo de metais em aveia-preta cultivada em Neossolo e Latossolo sob diferentes doses de cobre e zinco.

Parâmetro	Solo	Cu	Zn	Cu x Zn
MSPA	0,0000*	0,5137	0,3108	0,3706
MSR	0,0000*	0,0009*	0,0605	0,0244*
SPAD	0,0000*	0,0169*	0,7888	0,9022
Chl a	0,0000*	0,4655	0,0039*	0,0017*
Chl b	0,0000*	0,0403*	0,8484	0,0330*
Chl total	0,0000*	0,0692	0,0126*	0,0000*
Carotenoides	0,0000*	0,7688	0,0031*	0,0331*
Cu-PA	0,1491	0,0512	0,5219	0,8628
Cu-R	0,0000*	0,0000*	0,8172	0,9913
IT – Cu	0,0000*	0,0000*	0,4625	0,4197
Zn-PA	0,0000*	0,0000*	0,0001*	0,0671
Zn-R	0,0000*	0,0010*	0,0000*	0,1140
IT – Zn	0,0000*	0,0001*	0,0278*	0,3357
N	0,0000*	0,1450	0,4546	0,6168
K	0,4848	0,3120	0,1023	0,9173
Ca	0,0000*	0,1215	0,0782	0,8087
Mg	0,0000*	0,1636	0,4977	0,6507

*Efeito significativo ao nível de 5% de probabilidade de erro ($p < 0,05$); MSPA – matéria seca da parte aérea; MSR – matéria seca da raiz; SPAD – índice relativo de clorofila; Chl a – clorofila a; Chl b – clorofila b; Chl total – clorofila total; Cu-PA e Zn-PA – teores de cobre e zinco na parte aérea; Cu-R e Zn-R – teores de cobre e zinco na raiz; IT – índice de translocação de Cu e Zn; N, K, Ca, Mg – teores totais de nitrogênio, potássio, cálcio e magnésio na parte aérea.

Esse resultado sugere que atributos edáficos, como textura, capacidade de retenção hídrica e disponibilidade de nutrientes, desempenham papel central no desenvolvimento da biomassa aérea da cultura. Por outro lado, a matéria seca das raízes (MSR) apresentou sensibilidade não apenas ao tipo de solo, mas também às doses de Cu e à interação Cu × Zn, sem resposta significativa às doses isoladas de Zn. Tais achados evidenciam que o Cu apresenta maior toxicidade sobre o crescimento radicular em comparação ao Zn, efeito que pode ser atribuído à ocorrência de danos estruturais nas células da raiz, inibição do alongamento celular e prejuízo na absorção de água e nutrientes.

Esses efeitos são corroborados por Zhou et al. (2023), que observaram que altas concentrações de Cu comprometem a viabilidade do meristema radicular, ocasionando ruptura da membrana celular e redução do comprimento da raiz primária, possivelmente em decorrência da interferência nos processos mitóticos. De forma complementar, Ivanova, Kholodova e Kuznetsov (2010) demonstraram que, em *Brassica napus*, o Cu é substancialmente mais tóxico que o Zn, com concentrações de 50 a 150 μM de CuSO_4 causando efeitos fisiológicos similares aos observados com 1000 a 2500 μM de ZnSO_4 , tanto na biomassa quanto nos pigmentos fotossintéticos.

O índice SPAD, indicativo do teor de clorofila nas folhas, foi significativamente afetado pelo tipo de solo e pelas doses de Cu, refletindo a sensibilidade da atividade fotossintética às condições edáficas e à presença de metais pesados. Os teores de clorofila *a* apresentaram resposta significativa ao tipo de solo, às doses de Zn e à interação Cu \times Zn, padrão também observado para a clorofila total e para os carotenoides. Em contraste, a clorofila *b* foi influenciada principalmente pelo solo, pelas doses de Cu e pela interação Cu \times Zn, sugerindo que cada pigmento responde de forma diferenciada à presença dos metais. A interação significativa entre Cu e Zn aponta para a existência de mecanismos sinérgicos e antagônicos que regulam a síntese e estabilidade dos pigmentos, afetando diretamente a eficiência fotossintética e o sistema antioxidante das plantas.

Resultados similares foram descritos por Moeen-Ud-Din et al. (2024), que observaram que em *Arabidopsis thaliana*, a combinação tóxica de Cu e Zn reduziu significativamente os teores de clorofilas, carotenoides e comprometeu a funcionalidade do fotossistema II (PSII). Da mesma forma, Behtash et al. (2022) relataram que, em *Cucurbita pepo*, a aplicação simultânea de Cu e Zn provocou diminuição nos níveis de clorofila *b* e no índice SPAD, acompanhada por aumento dos carotenoides, interpretado como uma resposta fotoprotetora ao estresse oxidativo induzido pelos metais.

No que tange à dinâmica de absorção e translocação de metais, verificou-se que os teores de Cu-PA e nas raízes Cu-R foram significativamente determinados apenas pelas doses aplicadas de Cu, enquanto os teores de Zn-PA e Zn-R responderam exclusivamente às doses de Zn. Esses resultados demonstram que a absorção de cada metal está primariamente associada à sua concentração disponível no solo, com baixa interferência cruzada direta entre Cu e Zn nesse processo específico.

Entretanto, ao se avaliar os índices de translocação de cobre (IT–Cu) e zinco (IT–Zn), observou-se influência estatisticamente significativa de todos os fatores analisados, incluindo o tipo de solo, as doses aplicadas de Cu e Zn, bem como a interação entre ambos. Esses resultados indicam que a mobilidade dos metais no interior da planta não é determinada unicamente pela sua concentração disponível na solução do solo, mas é também modulada por propriedades físico-químicas do ambiente edáfico, como textura, pH, CTC e teor de MOS, além da competição iônica entre metais pesados durante os processos de absorção radicular e redistribuição via vasos condutores.

A literatura tem corroborado essa complexidade. A translocação de metais pesados em plantas é mediada por uma rede intrincada de transportadores de membrana, cuja atividade é influenciada tanto pela disponibilidade de nutrientes quanto pelas interações iônicas específicas entre elementos presentes no solo. Segundo Yruela (2005), o Cu tende a se acumular preferencialmente nas raízes, principalmente em solos ácidos, devido à sua baixa mobilidade via xilema, o que restringe sua translocação para a parte aérea. Complementarmente, Cambrollé et al. (2015) destacam que a eficiência na absorção e distribuição de Zn e Cu em espécies tolerantes está intimamente associada à seletividade dos canais iônicos e à capacidade de compartimentalização celular. Em consonância, Tiecher et al. (2016b) demonstraram que a presença simultânea de Cu e Zn pode desencadear efeitos antagônicos ou sinérgicos, afetando tanto a absorção quanto a translocação de ambos os elementos.

Esses achados sustentam a hipótese de que, embora a absorção de Cu e Zn ocorra de forma relativamente independente, sua mobilidade intracelular é fortemente modulada pela presença simultânea do outro metal e pelas características do solo em que a planta está inserida. Tal constatação possui implicações agronômicas relevantes para o manejo da toxicidade em solos contaminados, uma vez que a interação entre metais pode potencializar efeitos fitotóxicos mesmo quando suas concentrações individuais estão abaixo dos níveis críticos estabelecidos.

No que tange à nutrição mineral da aveia-preta, observou-se que os teores foliares dos macronutrientes N, Ca e Mg foram significativamente influenciados apenas pelo tipo de solo, evidenciando a relevância das propriedades edáficas na disponibilidade e assimilação desses elementos essenciais. Em contrapartida, os teores de K não apresentaram variações significativas entre os tratamentos, o que

sugere uma menor sensibilidade desse nutriente às variações nas condições do solo avaliadas neste estudo.

Esses padrões são reforçados por investigações anteriores. Benedet et al. (2019) estudaram a aveia cultivada em solos contaminados com Cu e constataram que, apesar do acúmulo considerável de Cu e Zn na rizosfera, os teores foliares de N, K, Ca e Mg foram mantidos dentro de faixas adequadas, possivelmente devido à capacidade fisiológica da planta em regular seletivamente a absorção de nutrientes essenciais. De forma semelhante, Cantoni et al. (2025) avaliaram o desempenho de aveia-preta em solo arenoso de vinhedos contaminados com Cu e observaram que, mesmo sob concentrações elevadas do metal, os teores foliares de N, K, Ca e Mg permaneceram estáveis, sem prejuízos nutricionais aparentes.

Esses dados corroboram os resultados obtidos neste estudo, indicando que, mesmo sob condições de contaminação significativa por Cu e Zn, a absorção de macronutrientes pode ser preservada, desde que o solo apresente condições físico-químicas adequadas à manutenção da homeostase nutricional. Essa capacidade de regulação nutricional representa um fator-chave para a tolerância fisiológica da aveia-preta ao estresse metálico, especialmente em ambientes edáficos contrastantes.

A Tabela 3 apresenta os valores médios dos parâmetros fisiológicos e de crescimento da aveia-preta, avaliados nos dois tipos de solo utilizados: Neossolo e Latossolo. De modo geral, os resultados demonstram que os teores de MSPA, MSR, índice SPAD, clorofila *a*, clorofila *b*, clorofila total e carotenoides foram consistentemente mais elevados nas plantas cultivadas no Latossolo, evidenciando o papel decisivo das características edáficas no desempenho fisiológico e bioquímico da cultura.

Tabela 3. Teores médios dos parâmetros fisiológicos, nutricionais e de acúmulo de metais em aveia-preta cultivada em Neossolo e Latossolo sob diferentes doses de cobre e zinco.

Parâmetro	Neossolo	Latossolo
MSPA (g)	0,35 b	1,58 a
MSR (g)	0,21 b	0,40 a
SPAD	22,28 b	31,50 a
Chl a (mg g ⁻¹)	0,56 b	0,94 a
Chl b (mg g ⁻¹)	0,17 b	0,33 a
Chl total (mg g ⁻¹)	0,87 b	1,11 a
Carotenoides (mg g ⁻¹)	0,15 b	0,23 a
Cu-PA (mg kg ⁻¹)	18,53 ^{ns}	24,58 ^{ns}
Cu-R (mg kg ⁻¹)	478,37 a	63,52 b
IT – Cu (%)	12,82 b	62,50 a
Zn-PA (mg kg ⁻¹)	863,91 a	185,72 b
Zn-R (mg kg ⁻¹)	990,73 a	299,68 b
IT – Zn (%)	43,56 b	73,74 a
N (%)	2,08 b	4,21 a
K (%)	2,66 a	2,83 a
Ca (%)	0,09 b	0,20 a
Mg (%)	0,04 b	0,10 a

*Médias seguidas de letras distintas na coluna diferem entre si pelo teste de Tukey ($p < 0,05$); ^{ns}: não significativo ao nível de 5% de probabilidade de erro ($p < 0,05$). MSPA – matéria seca da parte aérea; MSR – matéria seca da raiz; SPAD – índice relativo de clorofila; Chl a – clorofila a; Chl b – clorofila b; Chl total – clorofila total; Cu-PA e Zn-PA – teores médios de cobre e zinco na parte aérea; Cu-R e Zn-R – teores médios de cobre e zinco na raiz; IT – índice de translocação de Cu e Zn; N, K, Ca, Mg – teores totais de nitrogênio, potássio, cálcio e magnésio na parte aérea.

Essa diferença de desempenho pode ser atribuída às características contrastantes entre os solos avaliados. O Neossolo, por se tratar de um solo jovem e com baixo grau de desenvolvimento pedogenético, apresenta baixa capacidade de retenção de água e nutrientes, menor capacidade tampão e perfil superficial pouco estruturado (Pedron et al., 2011). Essas limitações favorecem a maior biodisponibilidade imediata de metais pesados na solução do solo, o que pode intensificar o risco de toxicidade para as plantas. Em contrapartida, o Latossolo é um solo mais desenvolvido, com teores mais elevados de argila, matéria orgânica e maior

capacidade de adsorção, características que favorecem a imobilização de Cu e Zn por meio de processos de complexação e retenção em coloides do solo (Nascimento & Fontes, 2004).

Essa relação é corroborada pelos dados da Tabela 1, que indicam que o Latossolo possui textura mais argilosa (481 g kg^{-1} de argila), maior teor de carbono orgânico total ($30,51 \text{ g kg}^{-1}$), CTC mais elevada ($11,13 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$) e maiores teores de P, K, Ca e Mg em comparação ao Neossolo. Tais atributos conferem ao Latossolo maior estabilidade no sistema solo-planta, contribuindo para a atenuação dos efeitos tóxicos dos metais e promovendo condições mais favoráveis ao desenvolvimento vegetal. Em contraste, o Neossolo apresenta baixos teores de argila (45 g kg^{-1}), matéria orgânica ($12,26 \text{ g kg}^{-1}$) e CTC efetiva ($2,61 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$), além de elevada saturação por alumínio trocável ($\text{Al}^{3+} = 55\%$), o que não apenas restringe o crescimento radicular, mas também aumenta a solubilização de Cu e Zn, resultando na redução da biomassa e dos pigmentos fotossintéticos observada nesse solo.

Esse comportamento reforça o papel do tipo de solo como modulador-chave da toxicidade de metais pesados, regulando diretamente a absorção de nutrientes, a integridade dos pigmentos fotossintéticos e o acúmulo de biomassa vegetal. Conforme demonstrado por Pinto (2016), em Neossolos Quartzarênicos, a biodisponibilidade de Cu, Zn e Ni é significativamente maior do que em Latossolos Vermelhos distróficos, resultando em maior acúmulo desses metais nos tecidos vegetais e, conseqüentemente, em maior risco de toxicidade.

Os achados deste estudo reforçam ainda mais o papel atenuador do Latossolo frente à toxicidade por Cu e Zn, decorrente de sua maior capacidade de retenção hídrica e nutricional, maior teor de argila e CTC elevada. Neste sentido, Silva et al. (2018) observaram que, em Latossolo Amarelo cultivado com hortaliças, o Cu e o Zn se encontravam majoritariamente associados a frações menos biodisponíveis, como aquelas ligadas à matéria orgânica e aos óxidos de ferro, reduzindo assim sua toxicidade para as plantas.

A análise estatística demonstrou que os teores de Cu na parte aérea da aveia-preta não diferiram significativamente entre os solos avaliados. Contudo, observou-se maior acúmulo de Cu nas raízes das plantas cultivadas no Neossolo, comportamento também verificado para os teores de Zn, tanto na parte aérea quanto na raiz. Em contraste, os índices de translocação (IT-Cu e IT-Zn) foram significativamente mais

elevados no Latossolo, indicando maior mobilidade interna desses metais nesse tipo de solo.

Esses resultados evidenciam que a textura arenosa, baixa CTC e o baixo teor de matéria orgânica do Neossolo proporcionam maior biodisponibilidade imediata de Cu e Zn na solução do solo, o que favorece o acúmulo desses metais nas raízes e pode restringir sua translocação para a parte aérea como estratégia fisiológica de tolerância ao estresse por metais (Kabata-Pendias, 2011; Liu et al., 2013). Por outro lado, o Latossolo, com maior teor de argila, CTC elevada e melhor capacidade de retenção de cátions, atua como ambiente tamponante, o que reduz o estresse na rizosfera e favorece a absorção controlada e a redistribuição interna dos metais (Alloway, 2013).

O comportamento menos móvel do Cu, especialmente evidenciado pelo seu acúmulo radicular em solos argilosos, está associado à sua forte adsorção aos colóides do solo, o que limita sua movimentação via xilema (Yrueala, 2005; Sharma & Dubey, 2005). Por outro lado, a mobilidade relativamente maior do Zn, sugerida pelos teores significativamente elevados na parte aérea e pelo maior índice de translocação em condições de menor tamponamento (Neossolo), está de acordo com estudos que indicam que o Zn é mais solúvel e móvel em plantas quando comparado ao Cu (Broadley et al., 2007; Cambrollé et al., 2015).

A ausência de interação significativa entre Cu e Zn em termos de acúmulo e translocação sugere que, nas condições testadas, não houve interferência mútua expressiva entre os elementos. Esse comportamento reforça a noção de que a dinâmica dos metais pesados em plantas depende fortemente das características do solo e da presença de mecanismos fisiológicos seletivos (Clemens, 2006). A sensibilidade dos índices de translocação aos fatores isolados também indica que a qualidade edáfica é determinante para o comportamento dos metais, especialmente no contexto de uso de plantas de cobertura para fitorremediação ou fitotolerância (Tangahu et al., 2011).

No que se refere à nutrição mineral, os teores foliares de N, Ca e Mg foram significativamente superiores nas plantas cultivadas no Latossolo, com valores de 4,21; 0,20; e 0,10 %, respectivamente, enquanto no Neossolo os valores foram de 2,08; 0,09; e 0,04 %. Para o K, não foram observadas diferenças estatisticamente significativas entre os tratamentos. Esses dados apontam para a maior fertilidade natural do Latossolo, associada à sua textura argilosa e maior CTC, que favorece a

retenção e absorção de nutrientes essenciais, resultando em melhor desempenho nutricional e possivelmente maior vigor vegetativo (Marschner, 2012).

Por outro lado, o Neossolo, devido à sua baixa CTC e textura arenosa, apresenta menor capacidade de retenção de nutrientes, o que pode ter restringido sua absorção pelas plantas, independentemente da presença de metais pesados. A ausência de efeitos significativos das doses de Cu e Zn sobre os teores de macronutrientes na parte aérea reforça a ideia de que, nas concentrações avaliadas, os metais não comprometeram diretamente a nutrição mineral, sendo os atributos edáficos os principais moduladores da disponibilidade de nutrientes em ambientes contaminados (Zhao et al., 2020).

5.4 CONCLUSÃO

Os resultados deste estudo evidenciam que o tipo de solo é um fator determinante na modulação das respostas fisiológicas, nutricionais e de crescimento da aveia-preta cultivada sob diferentes níveis de contaminação por Cu e Zn. O Latossolo, devido à sua maior fração de argila e CTC mais elevada, favoreceu o desempenho das plantas, refletido em valores superiores de biomassa, índice SPAD, teores de clorofilas, carotenoides e absorção de macronutrientes, especialmente N, Ca e Mg. Já no Neossolo, caracterizado por textura arenosa e baixa CTC, observou-se não apenas elevado acúmulo de Zn nas raízes (990,73 mg/kg), mas também expressiva translocação para a parte aérea (863,91 mg/kg), resultando em um IT de 43,56%. Esses achados indicam que, nesse solo, a toxicidade radicular é acompanhada por um risco adicional de contaminação da parte aérea.

Embora os metais pesados tenham afetado parâmetros pontuais, como a matéria seca das raízes, os pigmentos fotossintéticos e os teores de Cu e Zn nos tecidos vegetais, ficou evidente que a interação entre os metais e as propriedades físico-químicas do solo foi o principal fator condicionante das respostas observadas. A ausência de efeitos significativos de Cu e Zn sobre os teores de macronutrientes na parte aérea reforça o papel tamponante do Latossolo frente à contaminação do solo com metais.

Neste contexto, atributos edáficos como textura e CTC se destacam como elementos-chave na viabilidade da aveia-preta em programas de revegetação ou fitorremediação de solos contaminados. O Latossolo, por apresentar maior teor de argila e maior CTC, mostrou-se mais favorável à manutenção da funcionalidade fisiológica e nutricional da

planta. Contudo, esse mesmo ambiente também promoveu maior eficiência de translocação dos metais para a parte aérea (IT de 62,5% para Cu e 73,7% para Zn). Assim, enquanto o Latossolo representa um cenário promissor para estratégias de fitoextração, ele pode oferecer risco maior quando o objetivo é a produção de forragem com baixos teores de contaminantes.

6 ESTUDO 2

Alterações Fisiológicas e Nutricionais em Videiras Jovens Cultivadas em Solos Contaminados com Cobre e Zinco no Sul do Brasil

6.1 INTRODUÇÃO

A viticultura é uma atividade agrícola importante na Região Sul do Brasil, favorecida pelo clima subtropical úmido, que também propicia o desenvolvimento de doenças fúngicas. Para controlá-las, fungicidas contendo metais pesados, como cobre (Cu) e zinco (Zn), são amplamente utilizados, como a calda bordalesa, oxiclreto de cobre e Mancozeb. O uso contínuo desses produtos pode resultar no acúmulo de Cu e Zn no solo, comprometendo o desenvolvimento das plantas (Tiecher et al., 2018).

Videiras adultas possuem maior tolerância a esses metais, mas mudas jovens são mais sensíveis, apresentando dificuldades no estabelecimento inicial (Tiecher et al., 2016a; Ambrosini et al., 2016). Altas concentrações de Cu e Zn em solos ácidos comprometem o desenvolvimento radicular de videiras jovens, reduzindo o crescimento das raízes, interferindo na absorção de água e nutrientes, além de afetarem o metabolismo fotossintético e induzirem respostas de estresse oxidativo, como o aumento da atividade da enzima superóxido dismutase (SOD) (Tiecher et al., 2018).

Esses metais são micronutrientes essenciais, participando de processos fisiológicos como fotossíntese, respiração e síntese proteica (Hansch & Mendel, 2009). Porém, seu excesso interfere na biossíntese de clorofila e na estrutura dos cloroplastos, prejudicando a eficiência fotossintética (Chen et al., 2013). O índice SPAD é uma ferramenta útil para avaliar a toxicidade pelo teor de clorofila (Daniel et al., 2016).

Apesar de estudos sobre metais pesados em outras culturas, há poucas informações sobre Cu e Zn em videiras jovens em solos distintos. Este estudo teve como objetivo avaliar os efeitos do acúmulo desses metais sobre crescimento, nutrição, translocação e pigmentos fotossintéticos em videiras cultivadas em dois solos do Sul do Brasil, contribuindo para práticas agrícolas mais sustentáveis e alinhadas aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável da ONU, especialmente os ODS 2 (Fome Zero e Agricultura Sustentável), ODS 12 (Consumo e Produção

Responsáveis), ODS 13 (Ação Contra a Mudança Global do Clima) e ODS 15 (Vida Terrestre).

6.2 MATERIAL E MÉTODOS

6.2.1 Caracterização e instalação do experimento

O experimento foi conduzido em casa de vegetação no Departamento de Microbiologia, Imunologia e Parasitologia da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), em Florianópolis (SC), utilizando dois tipos de solo contrastantes: um Neossolo Quartzarênico e um Latossolo Vermelho (Santos et al., 2018). As amostras de solo foram coletadas nos municípios de Araranguá (SC) e Ibirubá (RS), respectivamente, em quantidade aproximada de 400 kg por solo.

Após a coleta, os solos foram encaminhados ao Laboratório de Análise de Solo, Água e Tecidos Vegetais da UFSC para caracterização físico-química. Subamostras foram secas em estufa com circulação de ar forçado a 40 °C, peneiradas em malha de 2 mm e submetidas às análises. Os parâmetros determinados foram: teor de argila e carbono orgânico total (COT), conforme metodologia da EMBRAPA (2017); pH em água (1:1 solo:água); índice SMP; teores disponíveis de P, K, Cu, Mn e Zn (extrator Mehlich-1); e teores trocáveis de Al, Ca e Mg (extrator KCl 1,0 mol L⁻¹), segundo metodologias descritos por Tedesco et al. (1995).

A partir desses dados, foram calculados os valores de acidez potencial (H+Al), capacidade de troca catiônica efetiva (CTCefetiva) e potencial (CTCpH7,0), além dos índices de saturação por alumínio (m%) e por bases (V%), conforme fórmulas apresentadas pela CQFS-RS/SC (2016). As principais características dos solos utilizados podem ser encontradas na Tabela 1.

Com base na caracterização inicial dos solos, foram calculadas as quantidades necessárias de carbonato de cálcio (CaCO₃) e carbonato de magnésio (MgCO₃), na proporção 2:1 (PRNT = 100%), para elevar o pH de cada solo até o valor de 6,0. Após a incorporação desses corretivos, os solos foram umedecidos até atingir 60% da capacidade máxima de retenção de água (CMRA) e mantidos nessa condição por 30 dias, com monitoramento da umidade a cada dois dias.

A CMRA foi determinada utilizando-se 30 g de solo colocado em funil com lâ de vidro na extremidade inferior, seguida da adição de 50 mL de água destilada. O excesso de água drenada foi coletado em recipiente apropriado. Após 4 horas, a CMRA foi calculada pela diferença entre o volume de água adicionado e o volume

coletado, sendo posteriormente extrapolada para 1 kg de solo. Para o experimento, adotou-se o valor correspondente a 60% da CMRA como referência para irrigação.

Não foi necessária a adubação de fósforo (P) e potássio (K) antes do transplante das mudas, pois os teores desses nutrientes estavam classificados como “muito altos” segundo as recomendações da CQFS-RS/SC (2016). Quanto ao nitrogênio (N), aplicou-se ureia no 20º e 40º dia do experimento, com doses ajustadas para 80 kg ha⁻¹ no Neossolo e 40 kg ha⁻¹ no Latossolo, conforme recomendações da CQFS-RS/SC (2016) para a cultura da videira.

Finalizado o período de incubação de 30 dias, os solos foram homogeneizados com auxílio de betoneira e distribuídos em vasos plásticos de 5 litros, contendo 4 kg de solo cada. Posteriormente, foram aplicadas quatro doses de cobre (0, 30, 60 e 120 mg kg⁻¹) em combinação com quatro doses de zinco (0, 60, 120 e 240 mg kg⁻¹), totalizando 16 tratamentos. Cada tratamento contou com três repetições, totalizando 48 unidades experimentais para cada solo (Neossolo e Latossolo).

As doses de Cu e Zn utilizadas basearam-se nos estudos de Tiecher et al. (2018). As fontes dos metais foram sulfato de cobre e sulfato de zinco, respectivamente, os quais foram previamente diluídos em água na concentração necessária para atingir as doses estipuladas e aplicados ao solo com o auxílio de piseta plástica, garantindo homogeneidade na distribuição. O delineamento experimental foi inteiramente casualizado, em esquema fatorial 4 × 4, com os fatores correspondendo às doses de Cu e Zn.

Inicialmente, foram semeadas cinco sementes de milho (*Zea mays* L.) em cada vaso contendo solo previamente preparado. Após sete dias da germinação, realizou-se o desbaste, mantendo-se apenas as duas plantas com maior vigor e desenvolvimento inicial. As plantas de milho foram cultivadas por 30 dias sob condições controladas, sendo posteriormente coletadas para análises (informações não utilizadas na tese).

Na sequência, as sementes de aveia-preta (*Avena strigosa* Schreb) foram semeadas nos mesmos vasos e cultivadas por mais 30 dias sob as mesmas condições experimentais. Após a coleta da aveia, procedeu-se ao cultivo de mudas de videira do porta-enxerto Paulsen 1103 (P1103), produzidas pela Embrapa Uva e Vinho (Bento Gonçalves, RS), as quais foram transplantadas para os vasos e mantidas por 60 dias, no período de 8 de setembro a 9 de novembro de 2021.

Durante todo o experimento, as plantas foram irrigadas diariamente, de modo a manter a umidade do solo em aproximadamente 60% da capacidade máxima de retenção de água (CMRA), sem a adição de qualquer nutriente ou correção química ao solo entre os cultivos, garantindo a manutenção das mesmas condições edáficas ao longo de todas as etapas experimentais.

6.2.2 Análise dos parâmetros fotossintéticos

No 60º dia após o plantio, foi determinado o índice SPAD utilizando um clorofilômetro SPAD-502 (Minolta, Japão). Foram realizadas cinco leituras na folha mais desenvolvida de uma planta por vaso, entre 9h e 11h da manhã. Em seguida, as folhas foram coletadas, pesadas para determinação da massa fresca e imersas em 5 mL de dimetilsulfóxido (DMSO), sendo mantidas em temperatura ambiente e protegidas da luz por 36 horas. Após esse período, uma alíquota de 250 µL da solução foi utilizada para medir a absorvância em leitor de microplacas (SpectraMax Paradigm, Molecular Devices, Inglaterra) nos comprimentos de onda de 665, 645 e 480 nm. Com base nessas leituras, foram calculados os teores de clorofila *a*, clorofila *b*, clorofila total e carotenoides, conforme os métodos de Hiscox & Israelstam (1979) e Wellburn (1994).

6.2.3 Análise dos parâmetros de crescimento

Após a coleta das folhas, as plantas foram cuidadosamente retiradas dos vasos para evitar danos ao sistema radicular. As raízes foram então lavadas com solução de 0,02 mol L⁻¹ de ácido etilenodiamino tetra-acético (EDTA) e posteriormente enxaguadas três vezes com água destilada para remoção de resíduos de solo. Em seguida, a parte aérea e as raízes das plantas foram pesadas, separadamente, em balança de precisão para determinação da massa fresca da parte aérea (MFPA) e da raiz (MFR). Posteriormente, foram acondicionadas em estufa com circulação de ar a 60 °C até atingirem peso constante, quando foram novamente pesadas para obtenção da massa seca da parte aérea (MSPA) e da raiz (MSR).

6.2.4 Análise dos nutrientes essenciais e metais pesados

Após a secagem e pesagem, as plantas foram trituradas com o auxílio de um moedor de tecido. Para a determinação dos teores totais de macronutrientes (N, K,

Ca e Mg) na parte aérea e nas raízes, foram utilizadas amostras de 0,2 g do material triturado, submetidas à digestão ácida com ácido sulfúrico, conforme descrito por Tedesco et al. (1995).

O teor de N foi determinado pelo método titulométrico, baseado na digestão das amostras em ácido sulfúrico concentrado na presença dos catalisadores (Na_2SO_4 , CuSO_4 e selênio), que promove a conversão do nitrogênio orgânico em íons amônio (NH_4^+). Após o resfriamento, a solução foi alcalinizada com hidróxido de sódio (NaOH) e destilada, liberando amônia (NH_3), que foi capturada em solução de ácido bórico (H_3BO_3) e titulada com solução padrão de ácido sulfúrico (H_2SO_4) $0,01 \text{ mol L}^{-1}$ para quantificação do nitrogênio total.

Os teores de K, Ca e Mg foram determinadas por espectrometria de absorção atômica (FAAS - Flame Atomic Absorption Spectrometry), após a digestão ácida do material vegetal. Para isso, as amostras digeridas foram diluídas em água deionizada e analisadas no espectrofotômetro, utilizando comprimentos de onda específicos para cada elemento: 766,5 nm para K, 422,7 nm para Ca e 285,2 nm para Mg, conforme procedimentos padronizados descritos por Tedesco et al. (1995).

Para a determinação dos micronutrientes Cu e Zn, foi realizada uma digestão nitroperclórica, e a quantificação dos teores desses elementos no extrato obtido foi feita por espectrometria de absorção atômica, utilizando o equipamento PerkinElmer Analyst 200 (Estados Unidos), conforme descrito por Tedesco et al. (1995). O cálculo do acúmulo (A) de Cu e Zn na parte aérea (folhas + caule) e nas raízes das plantas foi realizado por meio da equação 1:

$$A = (\text{MSPA ou MSR} \times C) / 1000 \quad (1)$$

Onde: MSPA representa a massa seca da parte aérea (mg), MSR a massa seca das raízes (mg) e C a concentração do elemento (mg kg^{-1}). A quantidade total acumulada de Cu e Zn na planta foi obtida pela soma das quantidades acumuladas em cada parte da planta, ou seja, parte aérea e raízes.

A partir dessa quantidade total acumulada, foi calculada a porcentagem de acúmulo dos metais em cada parte da planta. Conforme Abicheque e Bohnen (1998), o índice de translocação (IT) dos elementos foi calculado, em porcentagem, pela equação:

$$IT = (QAPA / QAP) \times 100 \quad (2)$$

Onde: QAPA é a quantidade do elemento acumulada na parte aérea, expressa em miligramas (mg), e QAP é a quantidade total do elemento acumulada na planta, também em miligramas (mg), correspondendo à soma das quantidades acumuladas na parte aérea e nas raízes.

6.2.5 Teores de cobre e zinco no solo

Ao final do experimento, amostras de solo (100 g) foram coletadas de cada vaso para determinação dos teores de Cu e Zn extraídos em água e em Mehlich 1 para caracterização e auxílio na discussão dos resultados. As amostras coletadas foram secas em estufa com circulação forçada de ar a 45°C sendo, posteriormente, moídas e peneiradas em malha de 2,0 mm. Os teores de Cu e Zn solúveis em água (relação 1:10, solo-solução) foram determinados como proposto por Morais (2020), enquanto os teores de Cu e Zn extraídos por Mehlich-1 foram determinados conforme Tedesco et al. (1995). Os dados de Cu e Zn extraídos por água e Mehlich 1 estão apresentados nas Figuras 1 e 2, para Neossolo e Latossolo, respectivamente.

6.2.6 Análise estatística

Os dados obtidos foram submetidos à análise de variância (ANOVA), utilizando um modelo linear adequado ao delineamento experimental, com o objetivo de avaliar os efeitos das doses de Cu, Zn e da interação Cu × Zn sobre as variáveis analisadas. Quando identificadas diferenças significativas, as médias dos tratamentos foram comparadas pelo teste de Tukey, ao nível de 5% de probabilidade.

Todas as análises estatísticas foram conduzidas utilizando o software Sisvar, versão 5.8 (Ferreira, 2011), e os resultados foram interpretados com base nos níveis de significância estatística adotados e nas características dos modelos ajustados.

6.3 RESULTADOS

6.3.1 Parâmetros fotossintéticos

A análise de variância revelou que a MSPA das plantas de videira não foi influenciada significativamente por nenhum dos fatores avaliados (tipo de solo, doses de Cu, doses de Zn e interação Cu × Zn), com valores de p superiores a 0,05 em todos

os casos. Por outro lado, a MSR foi significativamente influenciada tanto pelo tipo de solo ($p < 0,0001$) quanto pelas doses de Zn ($p = 0,0380$), indicando que a disponibilidade de Zn e as características físico-químicas dos solos afetaram o desenvolvimento radicular das plantas (Tabela 4).

Tabela 4. Análise de variância para matéria seca da parte aérea (MSPA) e da raiz (MSR), índice SPAD, teores de clorofila a (Chl a), clorofila b (Chl b), clorofila total (Chl total) e carotenoides em videiras jovens cultivadas em Neossolo e Latossolo, submetidas a diferentes doses de cobre (Cu) e zinco (Zn).

Fator	MSPA	MSR	SPAD	Chl a	Chl b	Chl total	Carotenoides
	Valor de p						
Solo	0,3427	< 0,0001*	0,0003*	0,0021*	0,0015*	< 0,0001*	0,3204
Cu	0,0605	0,9265	0,2042	0,6569	0,8227	0,2532	0,3974
Zn	0,8049	0,0380*	0,0707	0,0098*	0,0307*	0,0368*	0,3974
Cu x Zn	0,3465	0,9696	0,0477*	0,1285	0,3344	0,0185*	0,4472

*Efeito significativo ao nível de 5% de probabilidade de erro ($p < 0,05$); MSPA: matéria seca da parte aérea; MSR: matéria seca da raiz; SPAD: índice SPAD; Chl a: clorofila a; Chl b: clorofila b; Chl total: clorofila total.

O índice SPAD, indicador indireto da concentração de clorofila nas folhas, foi significativamente influenciado pelo tipo de solo ($p = 0,0003$) e pela interação entre as doses de Cu e Zn ($p = 0,0477$). Esses resultados sugerem que a combinação dos dois metais pode interferir na síntese ou estabilidade da clorofila, variando conforme o tipo de solo.

Em relação aos pigmentos fotossintéticos, os teores de clorofila a e clorofila b foram significativamente afetados pelo tipo de solo ($p = 0,0021$ e $p = 0,0015$, respectivamente) e pelas doses de Zn ($p = 0,0098$ e $p = 0,0307$, respectivamente). Por outro lado, as doses de Cu e a interação Cu \times Zn não influenciaram esses parâmetros. A clorofila total, entretanto, foi afetada significativamente por três fatores: tipo de solo ($p < 0,0001$), doses de Zn ($p = 0,0368$) e pela interação entre Cu e Zn ($p = 0,0185$), indicando uma resposta mais complexa e multifatorial. Por fim, os teores de carotenoides não apresentaram diferenças significativas em relação a nenhum dos fatores avaliados ($p > 0,3$), sugerindo baixa sensibilidade desse pigmento às condições experimentais aplicadas.

Os valores médios dos parâmetros fisiológicos das videiras cultivadas nos dois tipos de solo estão apresentados na Tabela 5. A massa seca das raízes (MSR) foi significativamente maior nas plantas cultivadas no Latossolo (1,92 g) em comparação àquelas cultivadas no Neossolo (1,33 g), reforçando a influência das

características físico-químicas do solo sobre o desenvolvimento do sistema radicular. Por outro lado, o índice SPAD, que reflete o teor relativo de clorofila nas folhas, foi significativamente maior nas plantas cultivadas no Neossolo (39,00) em relação ao Latossolo (37,05).

Tabela 5. Teores médios de matéria seca da parte aérea (MSPA), da raiz (MSR), índice SPAD (SPAD), clorofila *a* (Chl *a*), *b* (Chl *b*), total (Chl total) e carotenoides em plantas de videira cultivadas em Neossolo e Latossolo, expostas à diferentes doses de cobre (Cu) e zinco (Zn).

Trat.	MSPA	MSR	SPAD	Chl <i>a</i>	Chl <i>b</i>	Chl total	Carotenoides
	-----g-----			-----mg cm ⁻² -----			
Neossolo	1,42 ^{ns}	1,33 b*	39,00 a	0,92 a	0,67 a	1,46 a	0,00 ^{ns}
Latossolo	1,31	1,92 a	37,05 b	0,65 b	0,35 b	1,00 b	0,02

MSPA: Matéria seca da parte aérea; MSR: Matéria seca da raiz; SPAD: índice SPAD; Chl *a*: clorofila *a*; Chl *b*: clorofila *b*; Chl total: clorofila total. *Médias seguidas de letras distintas na coluna diferem entre si pelo teste de Tukey ($p < 0,05$); ns: não significativo ao nível de 5% de probabilidade de erro ($p < 0,05$).

Em relação aos pigmentos fotossintéticos, as concentrações de clorofila *a* (0,92 mg cm⁻²), clorofila *b* (0,67 mg cm⁻²) e clorofila total (1,46 mg cm⁻²) foram significativamente maiores no Neossolo. Esses resultados indicam que, mesmo apresentando menor desenvolvimento radicular, as plantas cultivadas nesse solo demonstraram maior capacidade fotossintética foliar.

O Neossolo apresentou valores significativamente superiores para quase todos os parâmetros foliares, especialmente os relacionados à atividade fotossintética (índice SPAD e pigmentos), apresentando aumentos de 91,43% na clorofila *b* e 46% na clorofila total em comparação ao Latossolo. Em contrapartida, o Latossolo favoreceu o desenvolvimento radicular, promovendo um aumento de 30,73% na massa seca das raízes em relação ao Neossolo.

6.3.2 Teores de cobre zinco nos tecidos

A análise de variância referente aos teores de Cu e Zn na parte aérea e radicular das plantas de videira evidenciou efeitos significativos dos fatores analisados (Tabela 6). O tipo de solo influenciou significativamente todos os teores de Cu e Zn, tanto na parte aérea quanto nas raízes, reforçando o papel fundamental das características físico-químicas do solo na disponibilidade e absorção desses micronutrientes pelas plantas.

Tabela 6. Análise de variância para os teores de cobre (Cu) e zinco (Zn) na parte aérea (Cu-PA e Zn-PA) e na raiz (Cu-R e Zn-R), e índice de translocação (IT) de Cu e Z em plantas de videira cultivadas em dois de solos (Neossolo e Latossolo), expostas a diferentes doses de Cu e Zn.

Fator	Cu-PA	Cu-R	IT – Cu	Zn-PA	Zn-R	IT – Zn
Solo	< 0,0001*	< 0,0001*	< 0,0001*	< 0,0001*	< 0,0001*	0,0044*
Cu	0,4268	< 0,0001*	< 0,0001*	0,0003*	0,0019*	0,6703
Zn	0,0338*	0,3515	0,0627	< 0,0001*	< 0,0001*	< 0,0001*
Cu x Zn	0,1377	0,8506	0,7525	0,3340	0,2209	0,8074

PA: Parte aérea; R: Raiz. *Efeito significativo ao nível de 5% de probabilidade de erro ($p < 0,05$).

O acúmulo de Cu na parte aérea não foi afetado pelas doses de Cu aplicadas ($p = 0,4268$), mas foi influenciado significativamente pelo tipo de solo ($p < 0,0001$) e pelas doses de Zn ($p = 0,0338$), sugerindo um possível efeito competitivo entre Cu e Zn no processo de absorção e translocação para os tecidos aéreos. Já os teores de Cu nas raízes foram significativamente afetados tanto pelo tipo de solo ($p < 0,0001$) quanto pelas doses de Cu ($p < 0,0001$), o que é esperado, considerando que as raízes são o primeiro ponto de contato com o metal no solo, funcionando como local primário de retenção.

O Zn apresentou alta sensibilidade às variações dos fatores estudados. Seu acúmulo na parte aérea foi influenciado pelo tipo de solo, pelas doses de Cu e, principalmente, pelas doses de Zn ($p < 0,0001$), comportamento também observado nas raízes. Esses resultados evidenciam que a absorção e a distribuição de Zn nas plantas são fortemente dependentes de sua concentração no solo, mas também podem ser moduladas pela presença de Cu.

A análise de variância dos índices de translocação (IT) de Cu e Zn também revelou efeitos significativos. O tipo de solo influenciou de forma significativa o IT tanto do Cu ($p < 0,0001$) quanto do Zn ($p = 0,0044$), indicando que a mobilidade desses micronutrientes das raízes para a parte aérea está fortemente associada a fatores edáficos, como pH, teor de matéria orgânica e capacidade de troca de cátions.

Para o Cu, além do tipo de solo, as doses aplicadas influenciaram significativamente o IT ($p < 0,0001$), sugerindo que concentrações elevadas no solo favorecem sua mobilidade dentro das plantas cultivadas. Por outro lado, o IT de Cu não foi afetado pelas doses de Zn ($p = 0,0627$) nem pela interação Cu \times Zn ($p = 0,7525$), indicando uma translocação relativamente independente da presença de Zn.

No caso do Zn, tanto o tipo de solo quanto as doses do próprio elemento afetaram significativamente o IT ($p < 0,0001$), reforçando a alta mobilidade do nutriente

e sua sensibilidade às variações de concentração. As doses de Cu e a interação Cu × Zn, entretanto, não apresentaram efeitos significativos sobre o IT do Zn.

Os teores médios de Cu e Zn na parte aérea e radicular das videiras cultivadas em Neossolo e Latossolo, sob diferentes doses dos metais, estão apresentados na Tabela 7. Na parte aérea, as plantas cultivadas em Latossolo apresentaram teores maiores de Cu ($36,08 \text{ mg kg}^{-1}$) em comparação àquelas no Neossolo ($22,52 \text{ mg kg}^{-1}$). No entanto, nas raízes, o padrão foi inverso: o Neossolo promoveu maior teor de Cu ($56,23 \text{ mg kg}^{-1}$) em relação ao Latossolo ($11,94 \text{ mg kg}^{-1}$). Esses resultados sugerem que no Neossolo a videira tende a reter o Cu nas raízes, possivelmente devido à maior disponibilidade do metal nesse tipo de solo (Figura 1), enquanto o Latossolo favorece sua translocação para os tecidos aéreos devido aos menores teores no solo (Figura 2).

Tabela 7. Teores médios de cobre (Cu) e zinco (Zn) na parte aérea (Cu-PA e Zn-PA), na raiz (Cu-R e Zn-R), e índice de translocação (IT) de Cu e Z em plantas de videira cultivadas em dois de solos (Neossolo e Latossolo), expostas a diferentes doses de Cu e Zn.

Trat.	Cu-PA	Cu-R	IT-Cu	Zn-PA	Zn-R	IT-Zn
	-----mg kg ⁻¹ -----		%	-----mg kg ⁻¹ -----		%
Neossolo	22,52 b*	56,23 a	37,35 b	179,83 a	399,79 a	35,71 b
Latossolo	36,08 a	11,94 b	67,69 a	40,60 b	54,04 b	42,44 a

Cu-PA: cobre na parte aérea; Cu-R: cobre na raiz; IT-Cu: índice da translocação de cobre; Zn-PA: zinco na parte aérea; Zn-R: zinco na raiz; IT-Zn: índice da translocação de zinco; *Médias seguidas de letras distintas na coluna diferem entre si pelo teste de Tukey ($p < 0,05$); ns: não significativo ao nível de 5% de probabilidade de erro ($p < 0,05$).

Para o Zn, observou-se um padrão distinto: as plantas cultivadas em Neossolo apresentaram acúmulo significativamente maior tanto na parte aérea ($179,83 \text{ mg kg}^{-1}$) quanto nas raízes ($399,79 \text{ mg kg}^{-1}$), em comparação às plantas cultivadas em Latossolo ($40,60 \text{ mg kg}^{-1}$ e $54,04 \text{ mg kg}^{-1}$, respectivamente). Esses resultados são devido a maior disponibilidade (Figura 1) e absorção de Zn no Neossolo, o que pode estar associado a características edáficas como menor teor de argila, menor capacidade de troca de cátions (CTC) e maior solubilidade do elemento nesse tipo de solo.

Os índices de translocação (IT) de Cu e Zn em videiras cultivadas nos dois tipos de solo são apresentados na Tabela 7. Esses resultados corroboram os obtidos na análise de variância, indicando que o tipo de solo exerceu influência significativa sobre o IT de ambos os micronutrientes. Para o IT de Cu, as plantas cultivadas em

Latossolo apresentaram valor significativamente superior (67,69%) em comparação àquelas cultivadas em Neossolo (37,35%). Esse resultado sugere que o Cu absorvido pelas raízes no Latossolo foi mais eficientemente translocado para a parte aérea, comportamento que pode ser atribuído à menor retenção radicular do Cu nesse tipo de solo. De fato, conforme observado na Tabela 5, os teores de Cu nas raízes foram menores no Latossolo, evidenciando menor retenção do elemento nas raízes em relação ao Neossolo.

De forma semelhante, o IT de Zn foi significativamente mais elevado no Latossolo (42,44%) do que no Neossolo (35,71%). Embora os teores absolutos de Zn tenham sido mais elevados no Neossolo, esse resultado indica que uma proporção relativamente maior do Zn absorvido foi translocada para a parte aérea nas plantas cultivadas em Latossolo, evidenciando a maior mobilidade relativa do Zn nesse sistema.

6.3.3 Macronutrientes nos tecidos

A Tabela 8 apresenta os valores de p obtidos na análise de variância para os teores de macronutrientes (N, K, Ca e Mg) em plantas de videira cultivadas em Neossolo e Latossolo, sob diferentes concentrações de Cu e Zn. Os resultados indicam que o tipo de solo foi o fator que mais influenciou a absorção de macronutrientes pelas plantas. Houve efeito significativo do tipo de solo sobre os teores de N ($p < 0,0001$), K ($p < 0,0001$) e Ca ($p = 0,0342$), evidenciando que as características físico-químicas distintas entre os solos avaliados interferem diretamente na disponibilidade e absorção desses nutrientes pelas videiras.

Tabela 8. Análise de variância para os teores totais de nitrogênio (N), potássio (K), cálcio (Ca) e magnésio (Mg) na parte aérea de plantas de videira cultivadas em dois tipos de solo (Neossolo e Latossolo), expostas a diferentes doses de cobre (Cu) e zinco (Zn).

Fator	N	K	Ca	Mg
Solo	< 0,0001*	< 0,0001*	0,0342*	0,3204
Cu	0,0849	0,1763	0,0048*	0,3974
Zn	0,2619	0,7981	0,5116	0,3974
Cu x Zn	0,0870	0,5293	0,6402	0,4472

Cu: Cobre; Zn: Zinco; Cu x Zn = interação entre Cu e Zn; N: nitrogênio; K: Potássio; Ca: Cálcio; Mg: Magnésio. *Efeito significativo ao nível de 5% de probabilidade de erro ($p < 0,05$).

No caso do N, a diferença estatística em função do tipo de solo confirma a alta sensibilidade desse nutriente às condições edáficas, especialmente à disponibilidade de matéria orgânica, à textura e ao pH do solo. O mesmo padrão foi observado para o K, um nutriente cuja absorção é fortemente influenciada pela CTC, geralmente menor nos Neossolos.

Para o Ca, além do efeito do tipo de solo, observou-se também influência significativa das doses de Cu aplicadas ($p = 0,0048$). Esse resultado pode estar relacionado à competição entre Cu e Ca por sítios de absorção nas raízes, ou ainda a possíveis alterações na estrutura e funcionalidade das membranas celulares provocadas pela presença de Cu, interferindo na absorção e translocação do Ca dentro das plantas.

Por outro lado, os teores de Mg não foram influenciados por nenhum dos fatores avaliados, o que pode indicar uma menor sensibilidade desse nutriente às variações nos tipos de solo e nas doses de Cu e Zn aplicadas, dentro das condições experimentais do presente estudo.

A Tabela 9 apresenta os valores médios dos teores de macronutrientes (N, K, Ca e Mg) nas plantas de videira cultivadas em Neossolo e Latossolo. O teor de N foi significativamente superior nas plantas cultivadas em Latossolo (2,73%) em comparação àquelas cultivadas em Neossolo (2,00%), representando um aumento de 36,5%. Esse resultado está de acordo com a maior capacidade de retenção de nutrientes do Latossolo, em virtude de sua maior CTC e teor de argila, o que favorece a disponibilidade de N às plantas.

Tabela 9. Teores totais de nitrogênio (N), potássio (K), cálcio (Ca) e magnésio (Mg) na parte aérea de plantas de videira cultivadas em dois tipos de solo (Neossolo e Latossolo), expostas a diferentes doses de cobre (Cu) e zinco (Zn).

Trat.	N	K	Ca	Mg
	----- % -----			
Neossolo	2,00 b*	1,00 b	0,00 b	0,00 a
Latossolo	2,73 a	1,92 a	0,08 a	0,02 a

N: nitrogênio; K: potássio; Ca: cálcio; Mg: magnésio. *Médias seguidas de letras distintas na coluna diferem entre si pelo teste de Tukey ($p < 0,05$); ns: não significativo ao nível de 5% de probabilidade de erro ($p < 0,05$).

Comportamento semelhante foi observado para K, cujo teor médio foi significativamente mais elevado no Latossolo (1,92%) em relação ao Neossolo (1,00%), correspondendo a um aumento de 92%. A maior retenção de cátions no

Latossolo pode ter favorecido a absorção de K, nutriente altamente móvel tanto no solo quanto na planta.

No caso do Ca, o teor também foi superior no Latossolo (0,08%) em comparação ao Neossolo (0,00%). Esse resultado confirma a significância estatística observada na ANOVA para o fator tipo de solo e para as doses de Cu (Tabela 6), indicando que a interação entre as propriedades edáficas e o excesso de Cu pode ter comprometido a absorção de Ca no Neossolo, possivelmente por competição por sítios de absorção ou por alterações fisiológicas no sistema radicular.

Quanto aos teores de Mg, não foram observadas diferenças estatísticas significativas entre os tipos de solo. No entanto, os valores médios foram numericamente superiores no Latossolo, sugerindo que, em condições não limitantes, esse nutriente tende a apresentar uma absorção mais estável, independentemente das variações nas características edáficas dos solos.

6.4 DISCUSSÃO

A redução do desenvolvimento radicular observada nas videiras cultivadas no Neossolo pode ser interpretada como resultado de uma resposta adaptativa complexa das plantas frente à elevada biodisponibilidade de metais pesados nesse solo (Figura 1). Em condições de toxicidade de Cu e Zn, as plantas ativam mecanismos de defesa que visam limitar a absorção e os efeitos deletérios desses elementos, incluindo a modificação estrutural da parede celular das raízes por meio do aumento da deposição de pectinas e lignina, substâncias capazes de adsorver os íons metálicos e restringir sua entrada no citoplasma (Lux et al., 2011). Além disso, o sequestro dos metais no apoplasto constitui outra estratégia eficiente na retenção desses elementos no tecido vegetal da raiz (Dalcorso et al., 2014). Embora eficazes, essas barreiras físicas e bioquímicas impõem restrições à expansão celular, comprometendo o crescimento radicular.

Simultaneamente, o estresse provocado pelos metais pesados gera espécies reativas de oxigênio (EROs), exigindo a ativação intensiva de sistemas antioxidantes como superóxido dismutase, catalase e peroxidases, o que resulta em elevado consumo de energia metabólica (Hasanuzzaman et al., 2020). Como consequência dessas estratégias de proteção, observa-se uma alteração na arquitetura do sistema radicular, com a redução do crescimento das raízes principais e na formação de raízes laterais, o que limita a área de contato com o solo e, por consequência, a absorção de

água e nutrientes (Yadav, 2010). Embora esses mecanismos de defesa sejam cruciais para a sobrevivência em ambientes contaminados, eles acarretam custos fisiológicos significativos, resultando em menor desenvolvimento radicular, redução da absorção de nutrientes e potencial comprometimento do vigor e da produtividade da planta a longo prazo (Ferreira, 2024).

Nesse contexto, destaca-se a relevância da matéria orgânica do solo (MOS) como agente mediador na disponibilidade de metais pesados e na absorção de nutrientes, uma vez que ela favorece a formação de complexos estáveis com esses elementos, diminuindo sua mobilidade no perfil do solo (De Matos et al., 2001, Ferreira et al., 2024). No presente estudo, ainda que não tenha sido o foco principal, observa-se que o Neossolo, por apresentar menor teor de MOS, tende a oferecer menor capacidade de complexação de Cu e Zn, favorecendo sua biodisponibilidade e o consequente acúmulo radicular, conforme identificado. Por outro lado, o Latossolo, com maior teor de MOS, favorece tanto a retenção e complexação desses metais quanto a maior disponibilidade de macronutrientes, como evidenciado pelos teores superiores de N, K e Ca nas plantas cultivadas nesse solo. A MOS também influencia atributos como a CTC, o pH e a atividade microbiana, impactando diretamente a qualidade química e biológica do solo.

Dessa forma, a MOS emerge como um atributo central não apenas na mitigação da toxicidade de metais pesados, mas também na promoção da saúde do solo e da eficiência nutricional das plantas. Considerar sua influência contribui para uma compreensão mais ampla das interações solo-planta, especialmente em ambientes contaminados, e reforça a necessidade de práticas que favoreçam o aumento e a manutenção da MOS como estratégia de manejo sustentável e melhoria da qualidade do solo.

Além das estratégias de defesa radicular, as videiras cultivadas em Neossolo parecem ter desenvolvido mecanismos compensatórios na parte aérea para preservar a atividade fotossintética. A produção elevada de pigmentos fotossintéticos, possivelmente desencadeada como resposta ao estresse, pode representar uma tentativa de otimizar a captura de luz, mesmo em folhas com área reduzida ou danificadas (Lux et al., 2011; Hasanuzzaman et al., 2020). Ademais, o estresse pode ter induzido a expressão de genes envolvidos na biossíntese da clorofila, como CHLH e CHLD, fortalecendo a capacidade fotossintética da planta (Dalcorso et al., 2014; Clemens, 2019). Esses genes codificam subunidades da enzima magnesiocquelatase,

responsável pela inserção de íons magnésio na protoporfirina IX, etapa essencial na formação da clorofila.

A absorção seletiva de nutrientes essenciais, como Mg e N, fundamentais para a formação dos pigmentos, também pode ter contribuído para essa adaptação (Marschner, 2012). Além disso, a menor translocação de Cu e Zn para a parte aérea nas plantas cultivadas em Neossolo possivelmente protegeu os tecidos foliares da toxicidade direta, preservando a integridade dos sistemas fotossintéticos. A atuação conjunta de mecanismos antioxidantes nas folhas pode ter reduzido os danos oxidativos, contribuindo para a estabilidade da clorofila, o acúmulo de pigmentos e a manutenção da atividade fotossintética mesmo sob condições estressantes.

Os resultados indicam que a menor massa radicular observada nas plantas cultivadas em Neossolo está diretamente relacionada ao acúmulo de Cu e Zn no sistema radicular, sendo fortemente influenciada pelas características físico-químicas do solo. Nesse sentido, destaca-se a importância da adoção de práticas agrícolas que minimizem a contaminação, tais como o uso racional de fungicidas e a incorporação de matéria orgânica no agroecossistema, estratégias que podem contribuir para atenuar os efeitos tóxicos sobre o sistema radicular de culturas sensíveis ao excesso de metais pesados, como a videira.

A mobilidade dos metais pesados nas plantas mostrou-se fortemente condicionada pelo tipo de solo, conforme evidenciado pelos índices de translocação obtidos neste estudo. Observou-se que tanto o Cu quanto o Zn apresentaram maior translocação para a parte aérea em plantas cultivadas no Latossolo, quando comparadas às cultivadas no Neossolo. Esse comportamento pode ser atribuído às propriedades físico-químicas do Latossolo, como seu maior teor de argila e maior CTC, que favorecem uma liberação mais gradual e controlada desses metais para a solução do solo, permitindo uma absorção e redistribuição mais eficientes no interior da planta. Esses resultados estão alinhados com os estudos de Komárek et al. (2010) e Brunetto et al. (2016), que ressaltam a importância da textura do solo e da CTC na dinâmica de absorção e translocação de metais em vinhedos.

Em contrapartida, no Neossolo, a baixa capacidade de tamponamento e a textura mais arenosa resultaram em maior acúmulo de metais nas raízes e menor eficiência na translocação, conforme também relatado por Abicheque e Bohnen (1998) em solos com baixos teores de argila. Esses resultados confirmam que a estrutura e composição do solo influenciam não apenas a disponibilidade dos metais para

absorção, mas também sua mobilidade no sistema planta, impactando diretamente a distribuição de elementos potencialmente tóxicos entre as raízes e a parte aérea.

A absorção de macronutrientes pelas videiras revelou-se sensivelmente influenciada pelas características do solo e, em menor grau, pela presença de metais pesados. De modo geral, o Latossolo propiciou maiores concentrações de N e K nas plantas, fenômeno associado à sua elevada CTC e ao maior teor de argila, fatores determinantes para a retenção e disponibilização eficiente dos nutrientes essenciais (Fageria, et al. 2010; Marschner, 2012).

No que concerne ao Ca, a redução de seu teor em decorrência de doses elevadas de Cu sugere a ocorrência de competição entre os íons Cu^{2+} e Ca^{2+} pelos sítios de absorção radicular (Kopittke et al., 2010) ou, alternativamente, a interferência do Cu nos mecanismos de transporte interno do Ca, comprometendo seu deslocamento para a parte aérea da planta (Yruela, 2005). Tais resultados ressaltam a importância das interações entre contaminantes e nutrientes na fisiologia vegetal, as quais possuem implicações diretas sobre a nutrição mineral e o desenvolvimento das culturas em solos contaminados.

Por outro lado, os teores Mg não apresentaram diferenças estatisticamente significativas entre os tratamentos, embora valores numericamente superiores tenham sido observados no Latossolo. Tal constatação indica que, nas condições experimentais avaliadas, esses nutrientes demonstram menor sensibilidade às variações edáficas e à presença de metais pesados, mantendo padrão de absorção relativamente estável.

O teor de N nas plantas foi significativamente superior quando cultivadas em Latossolo, fato atribuído às propriedades físico-químicas mais favoráveis desse tipo de solo para a retenção e disponibilização de nutrientes. Solos com maior teor de argila e CTC, como o Latossolo utilizado neste estudo, apresentam maior eficiência na retenção de íons amônio (NH_4^+) e no favorecimento do ciclo do nitrogênio, o que reduz perdas por lixiviação e potencializa a disponibilidade do nutriente às plantas (Fageria & Baligar, 2005; Marschner, 2012). Resultados análogos foram reportados por Geisseler et al. (2024), que observaram maiores taxas de mineralização e disponibilidade de N em solos de textura mais fina, bem como por Eick e Peak (2019), que evidenciaram o papel das argilas na adsorção de cátions e na manutenção da fertilidade do solo.

Ademais, a melhor estrutura física e a maior capacidade de retenção hídrica do Latossolo possivelmente contribuíram para condições mais estáveis de mineralização do N, favorecendo sua absorção radicular. Esses fatores justificam o maior acúmulo de N nas videiras cultivadas nesse tipo de solo em comparação ao Neossolo, caracterizado por menor retenção de nutrientes e maior suscetibilidade à lixiviação. Considerando que o N é elemento essencial para a síntese de proteínas, enzimas e pigmentos fotossintéticos, sua adequada disponibilidade pode ter mitigado, ao menos parcialmente, os efeitos adversos do estresse provocado pelos metais pesados, contribuindo para a manutenção da funcionalidade fisiológica das videiras.

De forma análoga, os teores de K nas plantas de videira foram significativamente superiores no Latossolo, o que pode ser atribuído à maior capacidade desse solo em reter cátions. O K, enquanto cátion monovalente (K^+), está sujeito a perdas por lixiviação, sobretudo em solos com baixa CTC, como é característico dos Neossolos (Marschner, 2012; Fageria, et al. 2010). Entretanto, no Latossolo, a combinação do elevado teor de argila com a alta CTC promoveu uma retenção mais eficiente do K^+ , assegurando sua disponibilidade às plantas.

Tal comportamento encontra respaldo nos resultados de Huang et al. (2018), que observaram maior disponibilidade de K em solos argilosos de vinhedos, bem como nos achados de Singh et al. (2021), os quais demonstraram que solos com maior proporção de partículas finas oferecem maior proteção contra a lixiviação de K, favorecendo a nutrição potássica das plantas. A absorção eficiente de K está diretamente relacionada à regulação estomática, à manutenção da turgescência celular e à ativação de enzimas essenciais, elementos fundamentais para o crescimento vegetal e para a tolerância ao estresse causado por metais pesados.

6.5 CONCLUSÃO

Este estudo demonstra que o tipo de solo é um fator determinante na resposta fisiológica e nutricional de videiras jovens expostas à contaminação por Cu e Zn. No Neossolo, a baixa CTC e a textura arenosa favoreceram o acúmulo de metais nas raízes, restringindo o crescimento radicular e estimulando mecanismos de tolerância, como o aumento na síntese de pigmentos fotossintéticos. Já no Latossolo, o maior teor de argila e a elevada capacidade tampão promoveram melhor absorção de N e K, maior translocação dos metais para a parte aérea e atenuação do estresse fisiológico. Esses resultados reforçam a importância de práticas agrícolas que aliem o

uso racional de insumos à correção do pH e ao incremento de matéria orgânica, estratégias essenciais para reduzir os impactos da contaminação por metais pesados

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Esta tese teve como objetivo compreender os efeitos morfofisiológicos da contaminação por Cu e Zn em videiras e aveia-preta cultivadas em dois solos contrastantes do Sul do Brasil. Os resultados evidenciaram que as características físico-químicas dos solos influenciam diretamente a disponibilidade dos metais e as respostas das plantas.

O Neossolo, com textura arenosa e menor teor de matéria orgânica, favoreceu a biodisponibilidade de Cu e Zn, resultando em maior acúmulo radicular e redução do crescimento, embora com compensações na parte aérea, como maior produção de pigmentos. Em contrapartida, o Latossolo atenuou os efeitos tóxicos, promovendo melhor desenvolvimento radicular, maior absorção de nutrientes e respostas fisiológicas mais equilibradas. As respostas observadas dependem não apenas da concentração dos metais, mas também da interação entre Cu, Zn e as propriedades edáficas. A videira mostrou maior sensibilidade ao acúmulo de metais nas raízes, enquanto a aveia-preta manteve estabilidade nutricional, especialmente no Latossolo, indicando seu potencial como planta de cobertura e agente fitorremediador.

Ainda assim, persistem lacunas relevantes que devem ser abordadas em investigações futuras. Entre elas, destaca-se a necessidade de avaliar os efeitos da contaminação por Cu e Zn em condições de campo, considerando a variabilidade ambiental e a interação com a microbiota edáfica. Também se faz importante a realização de estudos de longa duração, contemplando múltiplos ciclos de cultivo e o uso de espécies agrícolas em sucessão às plantas testadas. Além disso, é fundamental investigar o comportamento dos metais em diferentes profundidades do solo, com ênfase em sua mobilidade vertical e no risco de contaminação de águas subterrâneas. Por fim, merece atenção a eficácia de práticas de manejo, como a adição de matéria orgânica, a aplicação de corretivos e o uso de consórcios vegetais, na mitigação dos efeitos fitotóxicos dos metais pesados.

Em suma, os resultados desta tese oferecem uma base científica sólida para o entendimento da dinâmica solo-planta em áreas contaminadas por metais, contribuindo para a formulação de estratégias mais sustentáveis na viticultura e no manejo de solos degradados. A continuidade das investigações, com ampliação dos enfoques e escalas, será fundamental para promover sistemas agrícolas resilientes, produtivos e ambientalmente seguros.

REFERÊNCIAS

- ABICHEQUE, M.; BOHNEN, H. Copper and zinc adsorption as a function of pH and organic carbon and clay contents of surface soil horizons in Rio Grande do Sul. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 22, p. 43–50, 1998.
- ABREU, C. A. de; ABREU, M. F.; BERTON, R. S. Análise química de solo para metais pesados. In: *Tópicos em Ciência do Solo*, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, v.2, p. 645-692, 2002.
- ALLOWAY, B. J. Heavy metals in soils: trace metals and metalloids in soils and their bioavailability. 3. ed. Dordrecht: Springer, 2013.
- AMBROSINI, V. G. et al. Impacto do excesso de cobre e zinco no solo sobre videiras e plantas de cobertura. In: MELO, G. W. B. et al. *Calagem, adubação e contaminação em solos cultivados com videiras*. Bento Gonçalves: Embrapa Uva e Vinho, 2016. p. 91–110.
- AMBROSINI, V. G. et al. Reduction of copper phytotoxicity by liming: a study of the root anatomy of young vines (*Vitis labrusca* L.). *Plant Physiology and Biochemistry*, v. 96, p. 270-280, 2015.
- ANDRADE, S. A. L.; SILVEIRA, A. P. D.; MAZZAFERA, P. Arbuscular mycorrhiza alters metal uptake and the physiological response of *Coffea arabica* seedlings to increasing Zn and Cu concentrations in soil. *The Science of the Total Environment*, v. 408, N. 22, p. 5381-5391, 2010.
- ARAÚJO, W. S.; AMARAL SOBRINHO, N. M. B.; MAZUR, N.; GOMES, P. C. Relação entre adsorção de metais pesados e atributos químicos e físicos de classes de solo do Brasil. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.26, p.17-27, 2002.
- ARDUINI, I.; GODBOLD, D. L.; ONNIS, A. Influence of copper on root growth and morphology of *Pinus pinea* L. and *Pinus pinaster* Ait. seedlings. *Tree Physiology*, v. 15, p. 411–415, 1995.
- ARIAS, M.; PÉREZ-NOVO, C.; LÓPEZ, E.; SOTO, B. Competitive adsorption and desorption of copper and zinc in acid soils. *Geoderma*, Amsterdam, v. 133, n. 3–4, p. 151–159, 2006.
- ARIAS, M.; PÉREZ-NOVO, C.; OSORIO, F.; LÓPEZ, E.; SOTO, B. Adsorption and desorption of copper and zinc in the surface layer of acid soils. *Journal of Colloid and Interface Science*, 288:21–29, 2005.
- BEHTASH, F. et al. Zinc application mitigates copper toxicity by regulating Cu uptake, activity of antioxidant enzymes, and improving physiological characteristics in summer squash. *Antioxidants (Basel)*, v. 11, n. 9, p. 1688, 2022.
- BENEDET, L. et al. Copper and zinc in rhizosphere soil and toxicity potential in white oats (*Avena sativa*) grown in soil with long-term pig manure application. *Water, Air, and Soil Pollution*, v. 230, p. 209, 2019.

BRADL, H. B. Adsorption of heavy metal ions on soils and soils constituents. *Journal of Colloid and Interface Science*, 277:1–18, 2004.

BRASIL. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE. Produção agrícola municipal: culturas permanentes e temporárias. Rio de Janeiro: IBGE, 2023. Disponível em: <https://sidra.ibge.gov.br>. Acesso em: 2 jul. 2025.

BRASIL. Ministério da Agricultura e Pecuária. Valor Bruto da Produção – Lavouras e Pecuária – Brasil – Janeiro/2025. Brasília: MAPA/SPA/DAEP/CGPOP, 2025. Disponível em: <https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/politica-agricola/todas-publicacoes-de-politica-agricola/agropecuaria-brasileira-em-numeros/abn-2025-01.pdf>. Acesso em: 19 jul. 2025.

BROADLEY, M. R. et al. Zinc in plants. *New Phytologist*, v. 173, n. 4, p. 677–702, 2007.

BRUN, L. A.; MAILLET, J.; HINSINGER, P.; PÉPIN, M. Evaluation of copper availability to plants in copper-contaminated vineyard soils. *Environmental Pollution*, vol. 111, Issue 2, p. 293-302, 2001.

BRUNETTO, G. et al. Copper accumulation in vineyard soils: rhizosphere processes and agronomic practices to limit its toxicity. *Chemosphere*, v. 162, p. 293–307, 2016.

BRUNETTO, G. et al. Frações de cobre e zinco em solos de vinhedos no Meio Oeste de Santa Catarina. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 18, n. 8, 2014.

CAMBROLLÉ, J.; GARCÍA, J. L.; FIGUEROA, M. E.; CANTOS, M. Evaluating wild grapevine tolerance to copper toxicity. *Chemosphere*, v. 120, p. 171-178, Feb. 2015.

CAMBROLLÉ, J.; GARCIA, J. L.; OCETE, R.; FIGUEROA, M. E.; CANTOS, M. Growth and photosynthetic responses to copper in wild grapevine. *Chemosphere*, v. 93, n. 2, p. 294-301, 2013.

CANTONI, F. et al. Vermicompost in the phytoremediation of copper by black oats (*Avena strigosa* Schreb., 1771) in sandy vineyard soil: nutrient and heavy metal contents at flowering. *Fronteiras: Environmental and Marine Science*, v. 14, n. 2, p. 185–202, 2025.

CASSOL, L. C.; CERETTA, C. A.; SANTOS, D. R. dos. Plantas de cobertura e sua influência na qualidade do solo em vinhedos. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 44, e0190181, 2020.

CHAVARRIA, G.; SANTOS, H. P. dos; SÔNEGO, O. R.; MARODIN, G. A. B.; BERGAMASCHI, H.; CARDOSO, L. S. Incidência de doenças e necessidade de controle em cultivo protegido de videira. *Revista Brasileira de Fruticultura*, v. 29, n. 3, p. 477–482, 2007.

CHEN, P. Y.; LEE, Y. I.; CHEN, B. C.; JUANG, K. W. Effects of calcium on rhizotoxicity and the accumulation and translocation of copper by grapevines. *Plant Physiology and Biochemistry*, v. 73, p. 375-382, 2013.

CHEN, W.; YANG, X.; HE, Z.; FENG, Y.; HU, F. Differential changes in photosynthetic capacity, 77 K chlorophyll fluorescence and chloroplast ultrastructure between Zn-efficient and Zn-inefficient rice genotypes (*Oryza sativa*) under low zinc stress. *Physiologia Plantarum*, v. 132, n. 1, p. 89-101, Jan. 2008.

CLEMENS, S. Metal homeostasis in plants: regulatory mechanisms and potential for biofortification. *Plant, Cell & Environment*, v. 42, p. 2849–2860, 2019.

CLEMENS, S. Toxic metal accumulation, responses to exposure and mechanisms of tolerance in plants. *Biochimie*, v. 88, n. 11, p. 1707–1719, 2006.

CQFS-RS/SC - Comissão de Química e Fertilidade do Solo Rio Grande do Sul e Santa Catarina. Manual de Calagem e Adubação para os estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina. 11a ed. 2016, 376 p.

CROUÉ, J. P.; BENEDETTI, M. F.; VIOLLEAU, D.; LEENHEER, J. A. Characterization and copper binding of humic and nonhumic organic matter isolated from the south platte river: Evidence for the presence of nitrogenous binding site. *Environmental Science & Technology*, v.37, p.328- 336, 2003.

DALCORSO, G. et al. Nutrient metal elements in plants. *Metallomics*, v. 6, p. 1770–1788, 2014.

DANIEL, O. et al. Relationship between absolute and relative content of chlorophyll in leaves of osier. *Ciência Florestal*, v. 26, p. 211–222, 2016.

DE MATOS, A. T.; FONTES, M. P.; DA COSTA, L. M.; MARTINEZ, M. A. Mobility of heavy metals as related to soil chemical and mineralogical characteristics of Brazilian soils. *Environmental Pollution, Oxford*, v. 111, n. 3, p. 429–435, 2001. DOI: 10.1016/s0269-7491(00)00088-9. PMID: 11202747.

EICK, M. J.; PEAK, J. D. Sorption of cations onto clay minerals. In: HILLEL, D. (ed.). *Encyclopedia of Soils in the Environment*. Amsterdam: Elsevier, 2019.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. Manual de métodos de análise de solo. 2. ed. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2017. 574 p. ISBN 978-85-7035-939-3.

ENOPIRA. História do vinho no Brasil. Disponível em: <https://enopira.com.br/historia-do-vinho-no-brasil>. Acesso em: 19 jul. 2025.

FADIGAS, F. de S.; AMARAL-SOBRINHO, N. M. B. do; MAZUR, N.; ANJOS, L. H. C. dos.; FREIXO, A. A. Concentrações naturais de metais pesados em algumas classes de solos brasileiros. *Bragantia*, Campinas, v. 61, n. 2, 151-159, 2002.

FAGERIA, N. K. et al. Potassium soil test calibration for lowland rice on an Inceptisol. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, v. 41, p. 2595–2601, 2010.

FAGERIA, N. K.; BALIGAR, V. C. Enhancing nitrogen use efficiency in crop plants. *Advances in Agronomy*, v. 88, p. 97–185, 2005.

FERREIRA, D. F. Sisvar: a computer statistical analysis system. *Ciência e Agrotecnologia*, v. 35, p. 1039–1042, 2011.

FERREIRA, G. W. et al. Heavy metal-based fungicides alter the chemical fractions of Cu, Zn, and Mn in vineyards in Southern Brazil. *Agronomy*, v. 14, p. 969, 2024.

FERREIRA, G.W.; BORDALLO, S.U.; MEYER, E.; DUARTE, Z.V.S.; SCHMITT, J.K.; GARLET, L.P.; KOKKONEN DA SILVA, A.A.; MOURA-BUENO, J.M.; BASTOS DE MELO, G.W.; Brunetto, G.; et al. Heavy Metal-Based Fungicides Alter the Chemical Fractions of Cu, Zn, and Mn in Vineyards in Southern Brazil. *Agronomy* 2024, 14, 969. <https://doi.org/10.3390/agronomy14050969>.

FERREIRA, M. M. M.; FERREIRA, G. B.; FONTES, P. C. R.; DANTAS, J. P. Índice SPAD e teor de clorofila no limbo foliar do tomateiro em função de doses de nitrogênio e da adubação orgânica, em duas épocas de cultivo. *Revista Ceres*, 53: 83-92, 2006.

FLORES, J. P. et al. Uso de plantas de cobertura em vinhedos da Serra Gaúcha: impactos físicos e biológicos no solo. *Revista de Ciências Agrárias*, v. 46, n. 2, p. 356–364, 2023.

GEISSELER, D.; MILLER, K.; SANTIAGO, S.; ABOU NAJM, M. The multi-faceted relationship between nitrogen mineralization and soil texture. *Soil Science Society of America Journal, Madison*, v. 88, p. 1792–1807, jul. 2024. DOI: 10.1002/saj2.20728.

GIL, P. T.; FONTES, P. C. R.; CECON, P. R.; FERREIRA, F. A. Índice SPAD para o diagnóstico do estado de nitrogênio e para o prognóstico da produtividade de batata. *Horticultura Brasileira*, 20: 611-615, 2002.

GILL, S.; TUTEJA, N. Reactive oxygen species and antioxidant machinery in abiotic stress tolerance in crop plants. *Plant Physiol. Biochem.* 48, 909–930, 2010.

GIROTTTO, E.; CERETTA, C. A.; ROSSATO, L. V. et al. Biochemical changes in black oat (*Avena strigosa* Schreb) cultivated in vineyard soils contaminated with copper. *Plant Physiology and Biochemistry*, v. 103, p. 199–207, 2016.

GIROTTTO, E.; CERETTA, C. A.; ROSSATO, L. V.; FARIAS, J. G.; TIECHER, T. L.; DE CONTI, L.; SCHMATZ, R.; BRUNETTO, G.; SCHETINGER, M. R. C.; NICOLOSO, F. T. Triggered antioxidant defense mechanism in maize grown in soil with accumulation of Cu and Zn due to intensive application of pig slurry. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, v. 93, p. 145-155, July 2013.

GIROTTTO, E.; CERETTA, C.A.; BRUNETTO, G.; MIOTTO, A.; TIECHER, T.L.; DE CONTI, L.; LOURENZI, C.R.; LORENSINI, F.; GUBIANI, P.I.; DA SILVA, L.S.;

NICOLOSO, F.T. Copper availability assessment of Cu-contaminated vineyard soils using black oat cultivation and chemical extractants. *Environmental, Monitoring and Assessment*, v.186, p.9051-9063, 2014.

GIROTTTO, E.; CERETTA, C.A.; BRUNETTO, G.; SANTOS, D.R.; SILVA, L.S.; LOURENZI, C.R.; LORENSINI, F.; VIEIRA, R.C.B; SCHMATZ, R. Acúmulo e formas de cobre e zinco no solo após aplicações sucessivas de dejetos líquidos de suínos. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.34, p.955-965, 2010.

GRATÃO, P. L.; POLLE, A.; LEA, P. J.; AZEVEDO, R. A. Making the life of heavy metal-stressed plants a little easier. *Functional Plant Biology*, v. 32, n. 6, p. 481- 494, 2005.

GUIMARÃES, P. R.; AMBROSINI, V. G.; MIOTTO, A.; CERETTA, C. A.; SIMÃO, D. G.; BRUNETTO, G. Black oat (*Avena strigosa* Schreb.) growth and root anatomical changes in sandy soil with different copper and phosphorus concentrations. *Water, Air, & Soil Pollution*, v. 227, n. 192, p. 1-10, 2016.

HALLIWELL, B. GUTTERIDGE, J.M.C. Free radicals in biology and medicine. 4th Edition, Oxford University Press, New York, 2007.

HANSCH, R.; MENDEL, R. R. Physiological functions of mineral micronutrients (Cu, Zn, Mn, Fe, Ni, Mo, B, Cl). *Current Opinion in Plant Biology*, v.12, p. 259-266, 2009.

HASANUZZAMAN, M. et al. Reactive oxygen species and antioxidant defense in plants under abiotic stress: revisiting the crucial role of a universal defense regulator. *Antioxidants*, v. 9, n. 8, p. 681, 2020.

HEGEDÜS, A.; ERDEI, S.; HORVÁTH, G. Comparative studies of H₂O₂ detoxifying enzymes in green and greening barley seedlings under cadmium stress. *Plant Science*, v. 160, n. 6, p. 1085-1093, 2001.

HISCOX, J. D.; ISRAELSTAM, G. F. A method for the extraction of chlorophyll from leaf tissue without maceration. *Canadian Journal of Botany*, v. 57, p. 1332–1334, 1979.

HU, Z. et al. Heavy metals can affect plant morphology and limit plant growth and photosynthesis processes. *Agronomy*, Basel, v. 13, n. 10, art. 2601, 2023.

HUANG, Z. et al. Potassium dynamics and availability in vineyard soils of different textures. *Geoderma*, v. 320, p. 130–138, 2018.

IBGE. Sistema IBGE de Recuperação Automática - SIDRA. Levantamento Sistemático da Produção Agrícola. Disponível em: <https://sidra.ibge.gov.br/home/lspa/brasil>. Acesso em: 15 jan. 2020.

IVANOVA, E. M.; KHOLODOVA, V. P.; KUZNETSOV, V. V. Biological effects of high copper and zinc concentrations and their interaction in rapeseed plants. *Russian Journal of Plant Physiology*, v. 57, p. 806–814, 2010.

- KABATA-PENDIAS, A. Trace elements in soils and plants. CRC Press, Boca Ratón, Florida, 2011.
- KOMÁREK, M. et al. Contamination of vineyard soils with fungicides: a review of environmental and toxicological aspects. *Environment International*, v. 36, p. 138–151, 2010.
- KOPITTKE, P. M. et al. Toxic effects of Cu²⁺ on growth, root morphology, and root hair development of *Triticum aestivum*. *Environmental and Experimental Botany*, v. 68, n. 2, p. 209–216, 2010.
- KRAMER, U.; CLEMENS, S: Function and homeostasis of zinc, copper, and nickel in plants. *Topics Curr Genet*, v. 14, p. 215-271, 2005.
- LAVADO, R.S.; RODRÍGUEZ, M.B.; SCHEINER, J.D., et al. Heavy metals in soils of Argentina: comparison between urban and agricultural soils. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, New York, v.29, n.11- 14, p.1913-1917, 1998.
- LIU, J. et al. Interaction of Cd and five mineral nutrients for uptake and accumulation in different rice cultivars and genotypes. *Field Crops Research*, v. 83, n. 3, p. 271–283, 2013.
- LUX, A. et al. Root responses to cadmium in the rhizosphere: a review. *Journal of Experimental Botany*, v. 62, p. 21–37, 2011.
- MARSCHNER, P. Marschner's mineral nutrition of higher plants. 3. ed. London: Academic Press, 2012.
- MARTINEZ, C. A.; SORIANI, H. H.; FAVARETTO, V. F. Mecanismos de defesa das plantas a estresses. In: PRADO, R. M.; CECÍLIO FILHO, A. B.; CORREIA, M. A. R.; PUGA, A. P. (Eds.) *Nutrição de plantas: diagnose foliar em hortaliças*. Jaboticabal: FCAV/FAPESP/CAPES/Fundunesp, p.63-90, 2010.
- MCBRIDE, M. B. *Environmental Chemistry of Soils*. New York: Oxford University Press, 1994. 406 p.
- MIOTTO, A. et al. Copper uptake, accumulation and physiological changes in adult grapevines in response to excess copper in soil. *Plant and Soil*, v. 374, p. 593–610, 2014.
- MIRLEAN, N.; ROISENBERG, A.; CHIES, J.O. Metal contamination of vineyard soils in wet subtropics (southern Brazil). *Environ. Pollut.* 149, 10–17, 2007.
- MITTLER, R. Oxidative stress, antioxidants and stress tolerance. *Trends in Plant Science*, v. 7, n. 9, p. 405-410, 2002.
- MOEEN-UD-DIN, M. et al. The combined effects of copper and zinc on *Arabidopsis* involve differential regulation of chlorophyll synthesis and photosystem function. *Plant Physiology and Biochemistry*, v. 216, p. 109160, nov. 2024.

- MORAIS, G. P. Fracionamento e quantificação de limites críticos de transferência de cobre e zinco para a solução de solos com diferentes teores de argila e matéria orgânica. 2020. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Santa Catarina, 2020.
- NAGAJYOTI, P. C.; LEE, K. D.; SREEKANTH, S. V. M. Heavy metals, occurrence and toxicity for plants: a review. *Environmental Pollution*, v.8, p.199-216, 2010.
- NASCIMENTO, C. W. A.; FONTES, R. L. F. Correlação entre características de latossolos de Minas Gerais e parâmetros de equações de adsorção de cobre e zinco. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 28, n. 6, p. 965–971, dez. 2004.
- PARADELO, R.; MOLDES, A. B.; RODRÍGUEZ, M.; BARRAL, M. T. Relationship between heavy metals and phytotoxicity in compost. *Ciencia e Tecnologia de Alimentos*, v. 6, p. 143–151, 2008.
- PEDRON, F. A. et al. Condutividade e retenção de água em Neossolos e saprolitos derivados de arenito. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 35, n. 2, p. 365–377, 2011.
- PIETRZAK, U.; MCPHAIL, D. C. Copper accumulation, distribution and fractionation in vineyard soils of Victoria, Australia. *Geoderma*, 122:151–66, 2004.
- PINTO, F. A. F. et al. Controle químico do míldio da videira em região de elevada altitude de Santa Catarina. *Revista Brasileira de Viticultura e Enologia*, São Joaquim (SC), EPAGRI/UFSC, n. 14, p. 38–46, 2022.
- PINTO, F. A. Fatores de bioconcentração e disponibilidade de bário, cádmio, cobre, níquel e zinco em solos e em culturas de interesse agrônômico. 2016. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2016.
- PROTAS, J. F. da S.; LAZZAROTTO, J. J.; MACHADO, C. A. E. Panorama da vitivinicultura brasileira em 2022. Comunicado Técnico n. 233, Embrapa Uva e Vinho, Bento Gonçalves, RS, set. 2024.
- PROVENZANO, M. R.; EL BILALI, H.; SIMEONE, V.; BASER, N.; MONDELLI, D.; CESARI, G. Copper contents in grapes and wines from a Mediterranean organic vineyard. *Food Chem*, 122, pp. 1338-1343, 2010.
- SANTANA, N. A.; FERREIRA, P. A. A.; SORIANI, H. H.; BRUNETTO, G.; NICOLOSO, F. T.; ANTONIOLLI, Z. I.; JACQUES, R. J. S. Interaction between arbuscular mycorrhizal fungi and vermicompost on copper phytoremediation in a sandy soil. *Applied Soil Ecology*, v. 96, p. 172-182, 2015.
- SHARMA, P.; DUBEY, R. S. Lead toxicity in plants. *Brazilian Journal of Plant Physiology*, v. 17, n. 1, p. 35–52, 2005.
- SILVA, L. et al. Fractionation of heavy metals in yellow latosol cultivated with vegetables. *Semina: Ciências Agrárias*, v. 39, n. 5, p. 1921–1936, 2018.

SINGH, V. K. et al. Timing potassium applications to synchronize with plant demand. In: MURRELL, T. S. et al. Improving potassium recommendations for agricultural crops. Cham: Springer, 2021. p. 215–237.

SOCIEDADE BRASILEIRA DE CIÊNCIA DO SOLO – NÚCLEO REGIONAL SUL. Manual de calagem e adubação para os Estados do Rio Grande do Sul e de Santa Catarina. 10. ed. Porto Alegre: SBCS – Núcleo Regional Sul, 2016. 376 p. ISBN 978-85-66301-80-9.

SOUZA, M.L.P.; ANDREOLI, C.V.; AMARAL, M.B., et al. Levantamento preliminar dos teores de metais pesados em alguns solos do Paraná. Revista Sanare, Curitiba, v.5, n.5, p.68-75, 1996.

STRAWN, D. G.; BAKER, L. L. Molecular characterization of copper in soils using X-ray absorption spectroscopy. Environmental Pollution, 157, 2813–2821, 2009.

TANGAHU, B. V. et al. A review on heavy metals (As, Pb, and Hg) uptake by plants through phytoremediation. International Journal of Chemical Engineering, v. 2011, art. 939161, 2011.

TEDESCO, M. J. et al. Análise de solo, plantas e outros materiais. 2. ed. Porto Alegre: Departamento de Solos, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1995.

TIECHER, T. L. et al. Effects of zinc addition to a copper-contaminated vineyard soil on sorption of Zn by soil and plant physiological responses. Ecotoxicology and Environmental Safety, v. 129, p. 109–119, 2016a.

TIECHER, T. L. et al. The interaction of high copper and zinc doses in acid soil changes the physiological state and development of the root system in young grapevines (*Vitis vinifera*). Ecotoxicology and Environmental Safety, v. 147, p. 620–629, 2018.

TIECHER, T. L.; TIECHER, T.; CERETTA, C. A.; FERREIRA, P. A. A.; NICOLOSO, F. T.; SORIANI, H. H.; TASSINARI, A.; PARANHOS, J. T.; DE CONTI, L.; BRUNETTO, G. Physiological and nutritional status of black oat (*Avena strigosa* Schreb.) grown in soil with interaction of high doses of copper and zinc. Plant Physiology and Biochemistry, v. 106, p. 253-263, 2016b.

TIECHER, T. L.; TIECHER, T.; CERETTA, C. A.; FERREIRA, P. A. A.; NICOLOSO, F. T.; SORIANI, H. H.; DE CONTI, L.; KULMANN, M. S. S.; SCHNEIDER, R. O.; BRUNETTO G. Tolerance and translocation of heavy metals in young grapevine (*Vitis vinifera*) grown in sandy acidic soil with interaction of high doses of copper and zinc. Scientia Horticulturae, vol. 222, 2017, 203-212.

TIECHER, T.L.; CERETTA, C.A.; COMIN, J.J.; GIROTTO, E.; MIOTTO, A.; MORAES, M.P. de; BENEDET, L.; FERREIRA, P.A.A.; LORENZI, C.R.; COUTO, R. da R.; BRUNETTO, G. Forms and accumulation of copper and zinc in a Sandy Typic Hapludalf soil after long-term application of pig slurry and deep litter. Revista Brasileira de Ciência do Solo, v.37, p.812-824, 2013.

VO, T. T. T.; PENG, T. Y.; NGUYEN, T. H.; et al. The crosstalk between copper-induced oxidative stress and cuproptosis: a novel potential anticancer paradigm. *Cell Communication and Signaling*, v. 22, p. 353, 2024.

WELLBURN, A. R. The spectral determination of chlorophyll a and chlorophyll b, as well as total carotenoids, using various solvents with spectrophotometers of different resolution. *Journal of Plant Physiology*, v. 144, p. 307–313, 1994.

YADAV, S. K. Heavy metals toxicity in plants: an overview on the role of glutathione and phytochelatins in heavy metal stress tolerance of plants. *South African Journal of Botany*, v. 76, p. 167–179, 2010.

YRUELA, I. Copper in plants: acquisition, transport and interactions. *Functional Plant Biology*, v. 32, n. 11, p. 409–430, 2005.

ZHAO, K. et al. Accumulation and distribution of heavy metals in soil–rice systems: a review. *Environmental Pollution*, v. 266, p. 115290, 2020.

ZHOU, X. et al. Molecular mechanisms of plant responses to copper: copper ions affect root meristem cell viability, mitotic activity and root development. *International Journal of Molecular Sciences*, v. 25, n. 13, p. 6993, 2023.