

**UNIVERSIDADE DO ESTADO DE SANTA CATARINA – UDESC**  
**CENTRO DE CIÊNCIAS AGROVETERINÁRIAS – CAV**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS DO SOLO**

**LUANA MÜLLER DE SOUZA**

**MORFOFISIOLOGIA E ACÚMULO DE ZINCO EM MUDAS DE ERVA-MATE**

**LAGES, SC**

**2024**

**LUANA MÜLLER DE SOUZA**

**MORFOFISIOLOGIA E ACÚMULO DE ZINCO EM MUDAS DE ERVA-MATE**

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

Orientador: Prof. Dr. David José Miquelluti

Co-orientadores: Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Mari Lucia Campos

Prof. Dr. Marcelo Alves Moreira

**LAGES-SC**

**2024**

**Ficha catalográfica elaborada pelo programa de geração automática da  
Biblioteca Universitária Udesc,  
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)**

de Souza, Luana Müller  
MORFOFISIOLOGIA E ACÚMULO DE ZINCO EM  
MUDAS DE ERVA-MATE / Luana Müller de Souza. -- 2024.  
57 p.

Orientador: David José Miquelluti  
Coorientadora: Mari Lucia Campos  
Coorientador: Marcelo Alves Moreira  
Tese (doutorado) -- Universidade do Estado de Santa  
Catarina, Centro de Ciências Agroveterinárias, Programa de  
Pós-Graduação em Ciência do Solo, Lages, 2024.

1. Solo. 2. Plantas. 3. Chimarrão. I. Miquelluti, David José.  
II. Campos, Mari Lucia . Moreira, Marcelo Alves. III.  
Universidade do Estado de Santa Catarina, Centro de  
Ciências Agroveterinárias, Programa de Pós-Graduação em  
Ciência do Solo. IV. Título.

**LUANA MÜLLER DE SOUZA**

**MORFOFISIOLOGIA E ACÚMULO DE ZINCO EM MUDAS DE ERVA-MATE**

Tese apresentada ao Programa de Pós-graduação em Ciência do Solo da Universidade do Estado de Santa Catarina, como requisito parcial para obtenção do grau de Doutora em Ciência do Solo. Orientador: Prof. Dr. David José Miquelluti

**BANCA EXAMINADORA**

Orientador: \_\_\_\_\_

Profº Dr. David José Miquelluti  
CAV - UDESC

Membros: \_\_\_\_\_

Dra. Priscila Dors  
UNIFACVEST - LAGES

\_\_\_\_\_  
Dr. Luiz Paulo Rauber  
UNOESC – CAMPOS NOVOS

\_\_\_\_\_  
Dr. Márcio Carlos Navroski  
CAV – UDESC

\_\_\_\_\_  
Dr. Milton Cesar Coldebella  
CAV – UDESC

Lages, 25 de abril de 2024.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço a Deus pelas oportunidades, conquistas oferecidas e, as que estão por vir.

Aos meus Pais, Alfredo e Rosane, por todo esforço, amor e carinho dedicado a mim. Muitas vezes abdicando suas próprias vontades para proporcionar o melhor para as “gêmeas”. Vocês que sempre acreditaram no meu potencial, incentivaram minhas escolhas e construíram o melhor para mim. Poderia mencionar todas as palavras de afeto do mundo, mas não seriam suficientes para demonstrar o amor e gratidão que sinto por vocês. Obrigada por toda paciência, sigo em buscas dos meus sonhos e prometo ser um orgulho para vocês!

A minha irmã gêmea, Luisa, pelo apoio e incentivo durante todos esses anos. Você é essencial em minha vida.

Ao meu orientador, Prof<sup>o</sup> David José Miquelluti, pela confiança, orientação, empatia e compreensão durante as ocasiões delicadas que enfrentei ao longo desses últimos meses de doutorado. Obrigada por acreditar no meu potencial.

A minha coorientadora, Prof<sup>a</sup> Mari Lucia Campos, pela contribuição e todo suporte dado para a realização do meu trabalho no laboratório. Agradeço o acolhimento, por me ouvir e por todas as palavras de apoio e alívio ofertadas a mim em momentos que mais precisei.

Ao meu companheiro Henrique, obrigado por todo amor, carinho, companheirismo, apoio e todos os momentos especiais ao seu lado.

A todos os integrantes do laboratório de levantamento de análise ambiental por me acolherem e me darem suporte ao longo desses quatro anos.

Aos meus grandes e verdadeiros amigos que fiz ao longo dos 12 anos de CAV- UDESC; Alexandra Sá, Bruno Jan, Daniel Iochims (“Danheu”), Felipe Matheus (“Félis”), Francielle Vieira, Leonardo Kuhn (“Ome Véio”), Maurício (“Bochecha”), Ricardo Ritter, Rodrigo Buss e, minha querida amiga que fiz no doutorado, Sabrina Brito. Definitivamente vocês tiveram grande importância nessa caminhada e sempre lembrarei de vocês com muito carinho. Que nossa amizade seja eterna.

Aos amigos que fiz durante o ensino médio e que se mantém firme até hoje, Amanda, John e Viviane.

Agradeço também aos professores do Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, por todo o conhecimento transmitido e pelo comprometimento com o ensino.

A todos aqueles que de alguma forma contribuíram com minha pesquisa e com meu crescimento, gratidão!

A UDESC pela oportunidade do doutorado.

Agradeço a CAPES, pela concessão da bolsa durante os quatro anos.

## RESUMO

A erva-mate (*Ilex paraguariensis* Saint Hilaire), possui grande importância socioeconômica no Sul do Brasil, sendo consumida, principalmente, na forma de extratos como chimarrão e chás, além do uso na indústria farmacêutica, alimentícia e cosmética. No entanto, deve-se ter segurança para consumi-la devido a possíveis contaminações por elementos tóxicos e outros resíduos, uma vez que, as infusões têm a capacidade de extrair componentes solúveis em água, principalmente elementos tóxicos. A presença de elementos contaminantes tais como o zinco (Zn) ocorre, geralmente, devido a contaminação do solo por meio de fertilizantes ou águas poluídas pela ação industrial ou de mineração. Portanto, é importante que se conduzam estudos visando-se avaliar a absorção e acumulação de zinco nas diferentes partes da planta de erva-mate. O solo foi acondicionado nas unidades experimentais, constituídas por vasos com capacidade de 4,0 kg, e efetuada a aplicação dos tratamentos de Zn, na forma de cloreto de zinco ( $\text{ZnCl}_2$ ), equivalentes a 0, 300, 600, 900 e 1200  $\text{mg.kg}^{-1}$  de Zn. Foram utilizadas mudas de erva-mate (*Ilex paraguariensis*), realizado a correção e adubação conforme recomendação para a cultura. O experimento foi conduzido no delineamento inteiramente casualizado, com quatro repetições. Foram avaliados os parâmetros de crescimento e desenvolvimento foliar, índice SPAD, determinação da tolerância protoplasmática do tecido foliar, avaliação dos parâmetros fotossintéticos, análise radicular, análise elementar da parte aérea da planta e análise do teor de Zn na infusão de erva-mate. Conforme o aumento das concentrações de Zn aplicadas no solo, resultou aumento do Zn na parte aérea e inibiu o crescimento e desenvolvimento radicular. O aumento das doses de Zn aplicadas no solo, não afetou a altura das mudas, número de folhas, tolerância protoplasmática, taxa fotossintética, transpiração e no índice SPAD. Houve acumulação de Zn nas raízes, ocasionando modificação da arquitetura radicular das plantas. A erva-mate demonstra potencial de acumular e distribuir metais em suas diferentes partes. Os teores de Zn encontrados na infusão de erva-mate não atingiram valores suficientes para causar intoxicação após a ingestão de chimarrão contendo doses elevadas de Zn.

**Palavras-chave:** Solo, plantas, chimarrão.

## ABSTRACT

Yerba mate (*Ilex paraguariensis* Saint Hilaire) holds significant socioeconomic importance in Southern Brazil, primarily consumed in the form of extracts like chimarrão and teas, as well as used in the pharmaceutical, food, and cosmetic industries. However, caution must be exercised when consuming it due to potential contamination by toxic elements and other residues, as infusions have the ability to extract water-soluble components, especially toxic elements. The presence of contaminants such as zinc (Zn) usually occurs due to soil contamination from fertilizers or water polluted by industrial or mining activities. Therefore, it is important to conduct studies to assess the absorption and accumulation of zinc in different parts of the yerba mate plant. Treatments were distributed following a completely randomized design with four replications. The soil was placed in experimental units consisting of pots with a capacity of 4.0 kg, and treatments of Zn in the form of zinc chloride ( $\text{ZnCl}_2$ ) were applied at levels of 0, 300, 600, 900, and 1200 mg.kg<sup>-1</sup> of Zn. Yerba mate seedlings (*Ilex paraguariensis*) were used, with soil correction and fertilization carried out according to crop recommendations. Parameters such as growth and leaf development, SPAD index, determination of leaf tissue protoplasmic tolerance, evaluation of photosynthetic parameters, root analysis, elemental analysis of the aerial part of the plant, and analysis of Zn content in yerba mate infusion were assessed. As the concentrations of applied Zn in the soil increased, there was an increase in Zn in the aerial part and inhibition of root growth and development. The increase in Zn doses applied to the soil did not affect seedling height, number of leaves, protoplasmic tolerance, photosynthetic rate, transpiration, or SPAD index. Zinc accumulation occurred in the roots, leading to modifications in plant root architecture. Yerba mate demonstrates the potential to accumulate and distribute metals in its different parts. The levels of Zn found in yerba mate infusion did not reach values sufficient to cause intoxication after consuming chimarrão containing high doses of Zn.

**Keywords:** Soil, plants, chimarrão.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1- Clorose nas folhas mais novas por toxidez de Zn.....	27
Figura 2- Massa fresca nas doses de 0 a 1200 mg kg <sup>-1</sup> de Zn no solo. ....	28
Figura 3- Massa seca nas doses de 0 a 1200 mg kg <sup>-1</sup> de Zn no solo. ....	29
Figura 4- Porcentagem da integridade da membrana (PIA %) nas doses de 0 a 1200 mg kg <sup>-1</sup> de Zn no solo.....	30
Figura 5- Valores médios para condutância estomática nas doses de 0 a 1200 mg kg <sup>-1</sup> de Zn no solo.....	32
Figura 6- Valores médios para comprimento de raiz nas doses de 0 a 1200 mg kg <sup>-1</sup> de Zn no solo.....	33
Figura 7- Valores médios para volume de raiz nas doses de 0 a 1200 mg kg <sup>-1</sup> de Zn no solo.....	34
Figura 8- Análise visual da raiz de erva-mate no tratamento controle (A) e raiz do tratamento 1200 mg kg <sup>-1</sup> de Zn aplicado no solo (B).....	35
Figura 9- Teor de Zn na parte aérea de erva mate nas doses de 0 a 1200 mg kg <sup>-1</sup> de Zn no solo.....	37
Figura 10- Teor médio de Zn na raiz de erva-mate nas doses de 0 a 1200 mg kg <sup>-1</sup> de Zn no solo.....	39
Figura 11- Índice de translocação (%) da raiz para as folhas de erva-mate nas doses de 0 a 1200 mg kg <sup>-1</sup> de Zn no solo.....	40
Figura 12- Teores médios de Ca (A); Mg (B); Cu (C), P(D); Fe (E), Mn (F), Al (G), K (H) na parte aérea da erva mate nas doses de 0 a 1200 mg kg <sup>-1</sup> de Zn no solo. ....	41
Figura 13- Teores médios de Zn na infusão de erva-mate nas doses de 0 a 1200 mg kg <sup>-1</sup> de Zn no solo.....	42

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Atributos químicos e físicos do Cambissolo Húmico Alumínico léptico utilizado no experimento. ....	22
Tabela 2 - Valores recuperados pelo método utilizado na determinação da concentração de Zn nas amostras de tecido vegetal e raízes das plantas de erva-mate. ....	25
Tabela 3 - Valores médios para altura, número de folhas, nas doses 0 a 1200 mg kg <sup>-1</sup> de Zn no solo.....	26
Tabela 4 - Valores médios massa fresca, massa seca e porcentagem de integridade da membrana (PIA%) nas doses 0 a 1200 mg kg <sup>-1</sup> de Zn no solo.....	30
Tabela 5 - Valores médios para taxa fotossintética, condutividade estomática, transpiração e SPAD nas doses 0 a 1200 mg kg <sup>-1</sup> .....	31
Tabela 6 - Valores médios para comprimento, diâmetro e volume de raiz nas doses de 0 a 1200 mg kg <sup>-1</sup> . ....	35

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>9</b>
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>11</b>
2.1	ERVA-MATE ( <i>Ilex paraguariensis</i> A.St.-Hil.) .....	11
2.1.1	Descrição botânica do <i>Ilex paraguariensis</i> .....	11
2.1.2	Ocorrência natural da <i>Ilex paraguariensis</i> .....	12
2.1.3	Características e uso de <i>Ilex paraguariensis</i> .....	13
2.2	ACUMULAÇÃO DE METAIS EM PLANTAS .....	14
2.3	ZINCO NO SOLO .....	17
2.4	ZINCO NAS PLANTAS.....	18
2.5	ACUMULAÇÃO DE METAIS PELA ERVA-MATE .....	19
<b>3</b>	<b>MATERIAL E MÉTODOS.....</b>	<b>22</b>
3.1	ANÁLISES PRÉ-COLHEITA.....	23
3.2	ANÁLISE PÓS-COLHEITA.....	24
3.3	ANÁLISE ELEMENTAR DAS PLANTAS DE ERVA-MATE .....	24
3.4	ANÁLISE DE ZN NA INFUSÃO DA ERVA-MATE .....	26
3.5	ANÁLISE ESTATÍSTICA .....	26
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>26</b>
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO .....</b>	<b>44</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A erva-mate (*Ilex paraguariensis* St. Hil) é uma espécie florestal de grande importância social e econômica na região Sul do Brasil, ocorrendo nos estados do Paraná, Rio Grande do Sul e Santa Catarina, sendo também encontrada na Argentina, Paraguai e Uruguai.

A cultura está integrada à alimentação de muitas populações do Sul da América do Sul. As folhas e os galhos da erva-mate são triturados e consumidos de diversas formas, como no chimarrão (infusão quente), tererê (infusão fria), chás e várias bebidas de consumo habitual. Além disso, a erva-mate desempenha um papel de grande importância na indústria alimentícia, farmacêutica, cosmética e na área de medicamentos convencionais e homeopáticos, devido às suas propriedades estimulantes do sistema nervoso central, além de atuar como diurético e como agente antioxidante.

No Brasil, a produção de erva-mate é considerada uma atividade familiar, e, conseqüentemente, as técnicas e práticas de cultivo são transmitidas de uma geração para a próxima. A colheita é realizada de forma manual, envolvendo o corte dos galhos e das folhas da planta. Em seguida, o processo continua com a etapa de sapeco, secagem, moagem e peneiramento, resultando no que é conhecido como erva-mate cancheada (Vestena; Santos, 2022).

A espécie tem sido amplamente estudada, visto a variedade de produtos benéficos para a saúde humana devido sua ação antioxidante, anti-inflamatória, antimutagênica, antiobesidade, dentre outras. (Dartora *et al.*, 2013; Hoffmann, 2023). Considerando a importância da erva-mate, e o fato que as plantas são as principais fontes de metais, que podem causar prejuízos à saúde humana, torna-se imprescindível o controle de metais presente nesta espécie (Saidelles *et al.*, 2013).

A presença dos metais pesados nas plantas pode ter origem na composição mineral natural da planta, bem como na contaminação dos solos e da água devido ao uso de fertilizantes, pesticidas, emissões de veículos, combustão de carvão e óleo, atividades de mineração, fundição, refinamento e incineração de resíduos urbanos e industriais (Poletti *et al.*, 2014).

Os metais pesados tendem a acumular-se em diversos tecidos das plantas e assim, acabam introduzidos na cadeia alimentar. Por essa razão, é importante

conduzir-se estudos que avaliem a presença e a biodisponibilidade deles na erva-mate após esta ser submetida ao processo de infusão

Alguns metais são considerados essenciais para o desenvolvimento das plantas, animais e humanos, enquanto outros podem ser potencialmente tóxicos, além de gerarem impactos químicos e biológicos aos seres vivos. Dentre os metais pesados o cádmio (Cd), chumbo (Pb), cobre (Cu), cromo (Cr), níquel (Ni) e zinco (Zn), são exemplos que impactam negativamente plantas e seres vivos (Almeida, 2012).

O zinco (Zn), por sua vez, é um micronutriente essencial para o desenvolvimento das plantas, no entanto, sua presença em níveis excessivos no solo pode ter efeitos prejudiciais no metabolismo e no crescimento das espécies vegetais. Concentrações de zinco acima de  $400 \text{ mg kg}^{-1}$  podem ser prejudiciais para o crescimento e o desenvolvimento das plantas (Kaur *et al.*, 2021).

O acúmulo excessivo de zinco nas plantas eleva a síntese de proteínas e enzimas responsáveis pela defesa contra danos oxidativos. Isso também causa alterações no transporte de elétrons durante o processo de fotossíntese, danifica as estruturas das raízes, levando à redução na absorção de água e minerais do solo. Como consequência, ocorre a diminuição no crescimento das plantas, queda na produtividade e, em certos casos, pode até levar à morte da planta.

Considerando que metais como o Zn estão presentes na erva-mate, é imprescindível o controle de qualidade das plantas. A ingestão em doses inadequadas de zinco afeta uma parcela significativa da população global (Silva, 2016). O excesso de zinco pode causar a supressão da resposta imunológica, a diminuição dos níveis de lipoproteína de alta densidade e a redução das concentrações de cobre.

Portanto, torna-se essencial implementar práticas agrícolas que assegurem o manejo adequado desse micronutriente. Isso se torna ainda mais crucial quando consideramos que o Zn tende a se acumular em diversos tecidos das plantas e dessa forma, entrar na cadeia alimentar.

Com base nesses fatos, são necessários estudos que investiguem a capacidade da erva-mate de absorver zinco do solo, translocar para a parte aérea e transferi-lo para a infusão. Por sua vez, a biodisponibilidade na infusão faz com que o elemento seja facilmente absorvido pelo corpo humano.

O objetivo do presente estudo foi relacionar o acúmulo de Zn nas plantas em relação as doses de Zn aplicadas ao solo e quantificar o seu efeito sobre o metabolismo e crescimento de plantas de *Ilex paraguariensis* St.Hil (Erva-mate).

## REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 ERVA-MATE (*Ilex paraguariensis* A.St.-Hil.)

#### 2.1.1 Descrição botânica do *Ilex paraguariensis*

A erva-mate (*Ilex paraguariensis*) (Aquifoliaceae) varia entre pequenas arvoretas a árvores perenifólias. A altura dessa espécie é variável; em cultivo, geralmente varia de 3 a 5 metros, mas em seu ambiente natural, pode alcançar até 30 metros de altura e um diâmetro à altura do peito (DAP) de 100 cm quando adulta (Carvalho, 2003).

Conforme Carvalho (2003), as folhas são simples e alternadas, normalmente sem pelos e frequentemente apresentam estípulas, sendo de textura subcoriácea a coriácea. O limbo, que às vezes possui um pequeno ponto saliente, pode ter uma forma obovada, obtusa ou até mesmo arredondada. Suas dimensões típicas variam de 5,0 a 10,0 cm de comprimento por 3,0 a 4,0 cm de largura, embora, em condições de sub-bosque no interior das matas, essas folhas possam atingir até 18,0 cm de comprimento e 5,0 cm de largura.

Entretanto, Faccin (2014) confirmou que existe diferença no tamanho das folhas, essas tendem a ser maiores quando encontradas no interior das matas em comparação com aquelas cultivadas sob exposição direta ao sol.

Embora as flores sejam hermafroditas, a *I. paraguariensis* é classificada como uma espécie dioica, uma vez que apenas as estruturas reprodutivas de um único sexo estão ativas em cada indivíduo (Ferla *et al.*, 2018).

De acordo com Daniel (2009), nas flores masculinas, conhecidas como flores estaminadas, as anteras são notavelmente maiores, bem desenvolvidas e férteis, enquanto o carpelo, que é a estrutura feminina da flor, se atrofia e aborta rapidamente após a fecundação.

Por outro lado, nas flores femininas (conhecidas como flores pistiladas ou carpeladas), o ovário é bem desenvolvido e posicionado de forma superior, com um tamanho médio de 14 mm, nele contém quatro óvulos e é acompanhado por um estilete curto, cujo estigma é amplo, com cerca de 1 mm de largura (Pires *et al.*, 2014).

A erva-mate apresenta floração explosiva, com as plantas estaminadas iniciando o processo de antese pouco antes das plantas pistiladas. Isso resulta em certa dificuldade na polinização natural (Carvalho, 2003).

O fruto, do tipo baga e formato esférico, adquire uma tonalidade roxa escura e uma polpa mucilaginosa quando amadurece, tem uma forma esférica, com uma camada carnosa de mesocarpo e um endocarpo que é duro e lenhoso. Quanto às sementes, elas possuem um diâmetro que varia de 4 a 6 mm e têm uma superfície lisa. Apresentam em média até 4 sementes, as quais apresentam uma coloração que vai de castanho claro a escuro, são muito duras, pequenas e têm uma forma que pode variar (Carvalho, 2003; Pires *et al.*, 2014; Ferla *et al.*, 2018).

### **2.1.2 Ocorrência natural da *Ilex paraguariensis***

A erva-mate é uma espécie perenifólia, classificada como ciófito, o que significa que é intolerante ao sol e requer sombra para seu estabelecimento e crescimento. Ela é considerada uma espécie secundária tardia ou de estágio clímax. Além disso, a planta aceita o sombreamento em qualquer estágio de seu desenvolvimento, tornando-se mais tolerante à luz quando atinge a fase adulta (Ferla *et al.*, 2018).

Devido a essas características, a erva mate é uma espécie da Floresta Ombrófila Mista Montana, também conhecida como Floresta com Araucária, onde ocorre em associações claramente desenvolvidas com o pinheiro-do-paraná (*Araucaria angustifolia*). Além disso, ela adentra a região da Floresta Estacional Semidecidual no noroeste do Paraná e no sul de Mato Grosso do Sul (Carvalho, 2003; Pires *et al.*, 2014; Ferla *et al.*, 2018).

A distribuição natural da erva-mate abrange uma extensa área, entre 450.000 e 540.000 km<sup>2</sup> no continente sul-americano, sendo encontrada nos países da Argentina, Paraguai e Brasil (Daniel, 2009; Ferla *et al.*, 2018), entretanto, mais de 80% do total situa-se no bioma brasileiro Mata Atlântica (Chechi; Schultz, 2016).

A distribuição da erva-mate também está relacionada à altitude, sendo mais comum em áreas situadas a uma altitude entre 400 e 800 metros acima do nível do mar (Gerhardt, 2013).

A espécie desenvolve-se em climas predominantemente pluviais temperados. Nessas áreas, as chuvas são distribuídas de forma equilibrada ao longo do ano, com níveis pluviométricos variando de 1250 a 2500 mm anuais, e não há falta de água.

Essas condições climáticas têm desempenhado um papel fundamental no êxito do cultivo da erva-mate no sul do Brasil e, possivelmente, nos países vizinhos (Daniel, 2009).

### 2.1.3 Características e uso de *Ilex paraguariensis*

A erva-mate (*Ilex paraguariensis*, St. Hill.), pertence à família Aquifoliaceae, é uma espécie arbórea nativa da Região Sul do Brasil, presente nos estados do Paraná, Santa Catarina e Rio Grande do Sul, além do Mato Grosso do Sul, São Paulo, Minas Gerais e Rio de Janeiro; frequentemente também é consumida na Argentina, Paraguai e Uruguai (Albas *et al.*, 2014). No Brasil, corresponde a quase 5% do território e atinge 450.000 km<sup>2</sup> de área cultivada (Embrapa, 2014).

De acordo com o último censo do IBGE (2021), o Brasil é o principal produtor da espécie, alcançando nesse ano uma produção total de, aproximadamente, 506 mil toneladas. O Paraná lidera o ranking, no país, superando 442 mil toneladas do produto, seguido pelo estado de Santa Catarina com produção superior a 37 mil toneladas e por último, Rio Grande do Sul com uma produção de aproximadamente 26 mil toneladas.

Conforme Machado *et al.* (2020), o estado do Paraná detém cerca de 87% da produção total do Brasil, e os municípios do estado que se destacam são: São Mateus do Sul, Cruz Machado e Bituruna. No estado de Santa Catarina, Chapecó ganha destaque com maior produção, e no Rio Grande do Sul, a cidade de Fontoura Xavier.

Com as folhas secas e processadas de *I. paraguariensis*, é preparada uma infusão, chamada de chimarrão. Após a expansão da produção industrial de erva-mate, a bebida resultante ganhou diferentes denominações: "chimarrão" no sul do Brasil, "mate" na Argentina e Uruguai, e "tererê" no Paraguai, o qual, diferentemente do chimarrão, é preparada com água fria durante o verão. Além disso, a bebida pode ser consumida em forma de chá mate ou mate solúvel (Ferla *et al.*, 2018).

A infusão, originou-se a partir de um chá consumido por comunidades étnicas que habitavam na América do Sul. Resultou numa bebida que desempenha um papel social e até mesmo ritualístico em diversas sociedades contemporâneas do sul da América (Ferla *et al.*, 2018).

Considerado alimento básico pelos índios Guaranis, a *I. paraguariensis* também foi empregada pelos Tupis do Mato Grosso do Sul e pelos povos andinos que caminhavam milhares de quilômetros para se abastecer de erva-mate (Embrapa, 2014).

Os jesuítas foram os responsáveis pelo cultivo racional, iniciando-o em 1610. As missões representaram um importante papel na comercialização da erva-mate até o final do século XVII, quando os jesuítas foram expulsos do Brasil. A vinda dos colonizadores portugueses e espanhóis para o continente americano contribuiu para a difusão do hábito de beber a infusão das folhas de *I. paraguariensis*, pois os próprios colonizadores passaram a divulgar seus benefícios e, em pouco tempo, espalhou-se por toda região sul do continente americano (Ferla *et al.*, 2018).

Além das bebidas, a erva-mate também têm importância na indústria farmacêutica, devido às suas propriedades terapêuticas, como antiinflamatório, antirreumático, tônico e diurético (Valduga *et al.*, 1997; Barros *et al.*, 2000; Albas *et al.*, 2014) e área cosmética (Da Rosa; De Souza, 2019).

A espécie tem sido estudada no mundo todo, devido ao potencial de utilização de seus derivados, os quais possuem ações benéficas à saúde humana. Atualmente, extratos de *I. paraguariensis* são utilizados como complemento a tratamentos medicinais, devido à diversidade de compostos fitoquímicos presentes em sua composição e suas propriedades farmacológicas (Cardozo *et al.*, 2021).

Estima-se que a extensão das áreas destinadas ao cultivo e exploração da erva-mate no Brasil, gire em torno de 700 mil hectares, distribuídas em cerca de 180 mil propriedades localizadas em aproximadamente 480 municípios. A região Sul do País é a maior produtora de erva-mate e corresponde por cerca de 97% da produção nacional (Embrapa, 2023).

## 2.2 ACUMULAÇÃO DE METAIS EM PLANTAS

Pode-se definir metais pesados como um grupo de elementos químicos com elevada massa atômica ( $63,546$  e  $207,2 \text{ g mol}^{-1}$ ) número atômico e massa específica (em torno de  $3,5$  a  $7,0 \text{ g cm}^{-3}$ ) elementos que tenham capacidade de formar sais e que, em solução aquosa, colore a água, tenham capacidade de formar sulfetos e hidróxidos insolúveis em água, e capazes de causar toxicidade aos organismos vivos mesmo quando estão presentes em baixas quantidades (LIMA; MERÇON, 2011).

São considerados como metais pesados os elementos químicos, chumbo (Pb), cádmio (Cd), níquel (Ni), cobalto (Co), ferro (Fe), zinco (Zn), crômio (Cr), arsênio (As), prata (Ag) (Gonçalves, 2002). Sendo que alguns destes metais são considerados micronutrientes essenciais à sobrevivência das plantas, tais como: cobalto (Co), cobre (Cu), manganês (Mn), níquel (Ni) e zinco (Zn). Os metais em excesso podem causar toxicidade as plantas (Marschner 1995; Amado; Chaves Filho, 2015).

Os metais pesados ocorrem naturalmente no solo, no entanto, devido às ações antrópicas, seus níveis têm aumentado, contribuindo para o crescimento da poluição de solos, águas e a atmosfera (Lamego; Vidal, 2007; Souza *et al.*, 2018). Em solos não contaminados, esses metais são encontrados na forma de minerais primários ligados aos óxidos e permanecem imóveis. Enquanto, em solos contaminados, esses metais estão, principalmente, na forma móvel.

A toxicidade de um metal está ligada à sua biodisponibilidade, ou seja, depende da sua capacidade de ser transferido de um compartimento do solo para o organismo vivo.

A biodisponibilidade está relacionada aos fatores físicos e químicos do solo (textura do solo, potencial redox e ação dos exsudatos das raízes, pH, matéria orgânica, argilominerais) e aos fatores biológicos (bioacumulação e solubilização). Portanto, o aumento das atividades antrópicas como, industrialização, mineração, queima de combustíveis fósseis, uso inadequado de fertilizantes etc., são as principais fontes que contribuem para a poluição em ambientes terrestres (Campos, 2010; Souza *et al.*, 2018).

A disponibilidade dos metais, para as plantas, é o fator que determina a concentração e o acúmulo destes pelos tecidos vegetais, e está ligada aos processos de absorção e dessorção pelos componentes do solo (Luo *et al.*, 2018).

Espécies que são tolerantes, de forma geral, acumulam maiores concentrações de metais nas raízes. As plantas absorvem o elemento mas limitam sua translocação, o que prejudica o crescimento, a distribuição e o ciclo biológico das espécies (Chaves; Mesquita, 2010).

Há uma série de processos que envolvem o acúmulo dos metais pesados em plantas, dentre eles, a mobilização, absorção pelas raízes, transporte da raiz até a parte aérea, compartimento celular e sequestro (Yan *et al.*, 2020). O processo de mobilização de metais no solo pertence a liberação no solo tornando-se disponíveis para contaminação no solo. Logo após a mobilização, os metais pesados são

absorvidos pelas raízes das plantas. Uma vez absorvidos, são transportados para a parte aérea e armazenados em diferentes compartimentos celulares e, assim, imobilizados dentro da planta. A imobilização ajuda proteger e diminuir a disponibilidade toxicidade dos metais pesados.

As espécies vegetais se comportam de diferentes maneiras em relação às formas de absorção, distribuição e acúmulo de metais e dessa forma, podem ocorrer variações (até mesmo entre variedades de uma mesma espécie) quando estas são sujeitas às mesmas condições de contaminação semelhantes (Estrela *et al.*, 2018).

Independentemente de sua origem, os metais podem acumular-se nas plantas, em todos os seus tecidos e assim serem distribuídos pela cadeia alimentar, gerando poluentes ambientais significativos; dessa forma, tornou-se um problema de crescente importância e uma ameaça à saúde humana (Souza *et al.*, 2018; Suman *et al.*, 2018). A transferência de elementos para a cadeia alimentar depende diretamente da sua disponibilidade no solo e indiretamente por meio da sua absorção pelas plantas e posterior distribuição para o meio (Luo *et al.*, 2018).

Qualquer forma de vida pode ser afetada quando metais estão presentes no ambiente, isto depende da sua disponibilidade, dose e constituição química. Apesar disso, algumas espécies vegetais desenvolvem mecanismos de tolerância a toxidez provocada por esses elementos, como, por exemplo, imobilizar íons metálicos. Algumas delas, os acumulam nas raízes, folhas e caules.

Conforme Amado e Chaves Filho (2015), o acúmulo, de metais pesados, passa a ser proporcional ao aumento das doses aplicadas e com as condições em que o solo se encontra. Ainda conforme Amado e Chaves Filho (2015), de acordo com as condições em que o solo se encontra, é possível o aumento da solubilidade e disponibilidade dos metais para as raízes, ocasionando num aumento da chance de ocorrência de toxidez, não somente em plantas, mas também em animais e seres humanos.

A exposição a níveis elevados de metais pesados afeta negativamente parâmetros cruciais das interações entre as plantas e a água. E os metais pesados diminuem a distribuição de biomassa destinada às raízes (Bazihizina *et al.*, 2014).

As existências de mecanismos de tolerância sugerem a utilização dessas plantas em participar nos programas de fitorremediação. Plantas com tolerância aos metais pesados caracterizam-se por sua habilidade de crescer em ambientes com

altos níveis deste elemento, sem exibir danos como clorose, necrose ou inibição do crescimento (Aguiar, 2022).

Diferente dos poluentes orgânicos, os quais podem ser degradados parcial ou totalmente por meio da ação de microrganismos ou plantas, os metais pesados não são degradáveis e dessa forma tornam-se uma ameaça para o meio ambiente (Suman *et al.*, 2018).

## 2.3 ZINCO NO SOLO

O Zinco (Zn) ocorre naturalmente nos solos, sendo considerado um elemento essencial para o desenvolvimento das plantas participando, em diversas vias metabólicas (Kaur; Garg, 2021); além disso, é um componente estrutural de diversas proteínas.

Nos solos, a principal origem do Zn é aquela resultante do processo de intemperismo da rocha. Formas secundárias de Zn no solo surgem por meio de processos atmosféricos (exemplo: vulcões, incêndios florestais e poeiras) e processos bióticos como decomposição e lixiviação (Broadley *et al.*, 2007). As atividades agrícolas, o uso de fertilizantes orgânicos e inorgânicos, a aplicação intensiva de pesticidas e a utilização de águas contaminadas constituem-se nas principais fontes antrópicas de metais (Yang *et al.*, 2018).

Conforme Alloway (2008), fontes artificiais de Zn no solo são, queima de combustíveis fósseis, fertilizantes ricos em materiais orgânicos, calagem, aplicação de fungicidas, coberturas de borracha, superfícies revestidas com zinco.

A concentração de Zn nos solos é controlada pelos processos de adsorção e dessorção, sendo adsorvido principalmente pela fração mineral (Souza; Chaves; Fernandes, 2006; Romualdo, 2008; Akay; Doulati, 2012). Os principais fatores que afetam as reações de adsorção e, portanto, a disponibilidade de Zn no solo são: características químicas (como pH, capacidade de troca catiônica, teor de matéria orgânica) e características mineralógicas (incluindo teor de argila, presença de óxidos e hidróxidos de alumínio e ferro) (Santos *et al.*, 2021).

A disponibilidade do Zn também é afetada pelo tipo do solo, teor de umidade, índices de difusão e fluxo de massa, as taxas de intemperismo, vida microbiana do solo e a capacidade de absorção pelas plantas (Broadley *et al.*, 2007).

A distribuição do Zn no solo ocorre em três frações principais: (i) Zn solúvel em água (incluindo  $\text{Zn}^{2+}$  e frações orgânicas solúveis); (ii) Zn adsorvido e trocável na fração coloidal (associado a partículas de argila, compostos húmicos e hidróxidos de Al e Fe); e (iii) complexos e minerais insolúveis de Zn (Broadley *et al.*, 2007).

Nos sedimentos argilosos, a concentração de Zn varia de 80 a 120 ppm, já em arenitos e rochas carboníferas a sua concentração varia de 10 a 30 ppm. Esse elemento é prontamente adsorvido por componentes minerais orgânicos e acumula-se nos horizontes superficiais. De forma geral, a concentração média de Zn nos solos é de 64 ppm, e cerca de 60% da distribuição do Zn encontra-se na fração argila (Kabata-Pendias & Pendias, 2010).

O zinco é um micronutriente que pode restringir a produtividade das culturas e sua forma predominante é encontrada na solução dos solos como cátion  $\text{Zn}^{2+}$ , a qual desloca-se através do solo por difusão, ou seja, seguindo o gradiente de concentração (Malavolta, 2006).

## 2.4 ZINCO NAS PLANTAS

O Zn é um micronutriente essencial para todos os sistemas biológicos e está presente nas plantas na forma de íons livres como parte de complexos que se ligam a diferentes compostos de baixo peso molecular, também pode ser integrado como constituinte de proteínas e outras macromoléculas (Kabata-Pendias; Pendias, 2010)

Alguns autores classificam o Zn como altamente móvel, enquanto outros o consideram com mobilidade intermediária. Observa-se que em situações em que as plantas estão expostas a níveis abundantes de zinco, diversas espécies têm a capacidade de transferir quantidades significativas desse metal dos tecidos foliares mais velhos para os órgãos reprodutivos. No entanto, quando enfrentam deficiência de zinco, essas mesmas espécies demonstram uma mobilização reduzida ou até nula desse elemento a partir das folhas mais velhas, nesse contexto, é possível afirmar que o Zn esteja concentrado nas folhas mais velhas (Kabata-Pendias; Pendias, 2010).

Na planta, o Zn desempenha um papel importante na fotossíntese, síntese proteica, atividades enzimáticas, estabilização da estrutura de RNA e do DNA, na manutenção da atividade das enzimas sintetizadoras de DNA e no controle da

atividade das enzimas degradadoras de RNA, e assim, controla a expressão gênica (Brown *et al.*, 1993).

A deficiência de Zn pode acarretar a diminuição da qualidade e produtividade das culturas, enfraquecer a resistência a doenças e deteriorar a qualidade nutricional. Isso pode levar a uma redução significativa na síntese proteica, em virtude de sua relação com a atividade da RNAase. Além disso, pode resultar em atraso e restrição no crescimento, surgimento de folhas pequenas e malformadas, entrenós de tamanho reduzido e desenvolvimento de folhas em disposição de roseta. A ocorrência de clorose internerval, devido ao papel do Zn na formação da clorofila, assim como necrose no meristema apical da raiz, também são efeitos associados à deficiência de Zn (Marenco; Lopes, 2009; Broadley *et al.*, 2007).

No entanto, o Zn é altamente fitotóxico e o limite de toxicidade depende das espécies e genótipos da planta, bem como da fase de crescimento. De maneira geral, os níveis tóxicos variam de 100 a 500 ppm (Kabata-Pendias; Pendias, 2010).

A maioria das espécies e variações genéticas de plantas exibe capacidade de suportar níveis elevados de Zn. Sintomas frequentes de toxicidade de Zn incluem clorose, especialmente em folhas jovens, e inibição no crescimento das plantas, redução da biomassa das raízes, necrose das raízes quando em contato com o solo, morte da plântula e inibição do desenvolvimento vegetal (Li *et al.*, 2012).

Tratando-se das propriedades fisiológicas, altas concentrações de Zn podem provocar danos e perturbações em diversos processos celulares, como a taxa de transpiração, a taxa fotossintética e a condutância estomática em plantas, uma vez que o Zn é capaz de deslocar elementos com características similares (Kaur *et al.*, 2021).

## 2.5 ACUMULAÇÃO DE METAIS PELA ERVA-MATE

A composição da erva-mate tem sido estudada amplamente pela literatura ao longo dos anos, utilizando diversas abordagens. Além da análise da concentração total e extração através de água quente, também tem sido estudada a bioacessibilidade de micronutrientes e contaminantes inorgânicos, bem como, o impacto das variáveis agrônômicas no perfil mineral (Neves *et al.*, 2022).

As folhas são a parte mais pesquisada e exploradas da planta de erva-mate, enquanto os frutos têm sido objeto de estudos limitados e não são utilizados na

produção de produtos destinados ao consumo humano ou animal (Barbosa *et al.*, 2015).

Os principais metais presentes na erva-mate são: cálcio (Ca), cobre (Cu), ferro (Fe), potássio (K), magnésio (Mg), manganês (Mn), sódio (Na) e zinco (Zn). Esses elementos têm importância do ponto de vista nutricional para diversos organismos vivos, sendo benéficos à saúde dos seres humanos, quando em concentrações adequadas. Estudos demonstram que os teores, desses elementos, no produto, apresentam diferenças expressivas em relação a matéria prima. Isso sugere que podem existir fontes de contaminação durante o processo industrial (Ducat; Quináia, 2009).

A erva-mate possui habilidade para acumular diversos elementos, incluindo o Al (alumínio), Fe, Ni (níquel), Mn e Zn, conforme relatado por Heinrichs e Malavolta (2001), Oliva *et al.* (2014), Reissmann *et al.* (1999) e Valduga *et al.* (2019).

Os elementos Cu, Fe, Ni e Zn são micronutrientes essenciais às plantas, no entanto, em altas concentrações são tóxicos aos humanos, causando distúrbios neurológicos e, comportamentais (Saidelles *et al.*, 2010).

Conforme Jacques *et al.* (2007), para que a erva-me absorva os metais presentes no meio dependerá de vários condicionantes, portanto, a constituição do solo e as condições agronômicas são de extrema importância para que se possa garantir a qualidade dos derivados da erva-mate.

Além disso, estudos recentes avaliando níveis foliares de Mn, Ni e Zn registraram que o cultivo de plantas de erva-mate não apresentou diminuição de crescimento com o enriquecimento do solo por minerais, mesmo que ocorra grandes variações nas concentrações de micronutrientes presentes nas folhas de erva-mate (Magri *et al.*, 2021; Ulbrich *et al.*, 2023).

Há indicação que alguns metais como Cr (cromo), Cu, Fe, Mn, Se (selênio) e Zn, presentes na erva-mate, em concentrações elevadas podem representar um risco para a saúde humana. Isso inclui a diminuição da capacidade de oxigenação do sangue, o que pode afetar negativamente órgãos como os rins e o fígado (Milani *et al.*, 2019).

A quantidade de metais presentes na erva-mate varia de acordo com a idade do indivíduo. Plantas mais velhas possuem maior quantidade de metais, pois ao longo dos anos, acumulam-se nas folhas e ramos. Outros fatores, são as modificações na

composição mineral do solo, por meio das ações antrópicas, onde as mudas foram cultivadas (Ducat; Quináia, 2009).

As condições de cultivo da erva-mate podem impactar as quantidades de metais pesados encontradas em suas folhas, uma vez que essa planta é cultivada em extensas áreas com solos originados de diversos materiais parentais e apresentando diferentes níveis de intemperismo (Magri *et al.*, 2021)

No caso do zinco, a concentração crítica em folhas de espécies florestais varia de 15 a 30 mg kg<sup>-1</sup> e de acordo com a idade da planta, o excesso pode afetar a concentração de outros nutrientes, especialmente o cobre, ferro e fósforo, (Oliva *et al.*, 2014).

Conforme destacado por Ulbrich *et al.* (2023), a interação de fatores abióticos, que incluem alta acidez, diferentes materiais de origem e variações climáticas, juntamente com os fatores genéticos da espécie, sugerem que a erva-mate apresenta uma propensão para acumular metais. A soma desses fatores pode ser responsável pelas elevadas concentrações foliares de micronutrientes, como por exemplo o Zn.

O comportamento térmico das folhas de erva-mate, bem como sua caracterização física e química são capazes de proporcionar informações de interesse sobre a qualidade das plantas durante as etapas de processamento nas indústrias. O processamento industrial tem influência direta nos conteúdos de determinados compostos presentes na *Ilex paraguariensis* (Jacques *et al.*, 2007).

Além dos estudos sobre nutrição da planta de erva-mate, também é importante o conhecimento sobre os elementos químicos que são consumidos pelo homem durante a ingestão do chimarrão (Heinrichs; Malavolta, 2001).

De acordo com o Instituto de Medicina - Consumo dietético de referência (DRIs) (2006), a ingestão diária recomendada de Zn para crianças é de 3 e 5 mg/dia, homens 15 mg/dia, mulheres 12 mg/dia, grávidas e lactantes a recomendação é entre 11 e 13 mg/dia. O limite recomendado de ingestão de Zn para adultos é de 40 mg/dia. Ingestões variando entre 100 e 150 mg por dia têm o potencial de afetar o metabolismo do Cu (cobre), enquanto a ingestão em níveis elevados (entre 200 e 800 mg/dia) pode levar a toxicidade crônica, resultando em uma diminuição da absorção de Cu e, por consequência, ocasionando danos neurológicos (Mcclave *et al.*, 2016).

Apesar da incorporação de elementos essenciais e seus efeitos positivos, a ingestão de erva-mate pode acarretar potenciais riscos à saúde dos consumidores. A absorção e subsequente acúmulo de metais pesados e não essenciais por parte da

planta, provenientes do solo, demandam uma análise e avaliação de riscos para garantir a segurança alimentar (Copello *et al.*, 2011)

Sendo assim, o consumo frequente do chimarrão pode causar uma grande preocupação com relação aos impactos que possam surgir ao corpo humano, especialmente aos efeitos decorrentes da presença de metais.

### 3 MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi conduzindo em casa de vegetação, pertencente ao departamento de Solos e Recursos Naturais, Centro de Ciências Agroveterinárias da Universidade do Estado de Santa Catarina (UDESC/CAV), no município de Lages, SC, entre 27°47' S e 50°18' W, a 911 metros de altitude. Segundo a classificação de Köeppen, o clima local é do tipo Cfb (temperado- mesotérmico úmido e verão ameno), com temperatura média anual de 15,5°C e precipitação média anual variando entre 1300 e 1500 mm (Epagri, 2003).

O solo utilizado no experimento classifica-se como um Cambissolo Húmico Alumínico léptico (Embrapa, 2018). Foi coletado na camada de 0-20 cm, em uma área experimental da Universidade do Estado de Santa Catarina, localizada na cidade de Lages (SC),

Após a secagem do solo ao ar livre, destorroamento, homogeneização e peneiramento, em malha de 2 mm, foram coletados amostras para as análises de caracterização química, que foram realizadas no laboratório de Análise Química de Solo e Calcário do Departamento de Solos e Recursos Naturais do CAV/UDESC. A caracterização química do solo foi realizada de acordo com Tedesco *et al.* (1995) e a granulometria do solo foi realizada pelo método da pipeta (Gee; Bauder, 1986). Os resultados dos atributos físicos e químicos do solo estão descritos na Tabela 1.

Para implantação dos experimentos o solo foi umedecido até alcançar 70% da capacidade de campo, monitorada por pesagem, e corrigido para valor de pH 5,5, com a aplicação de 15 t ha<sup>-1</sup> de calcário dolomítico, PRNT 88%, conforme indicado pela Comissão de Química e Fertilidade do Solo (Comissão de Química e Fertilidade Do Solo – RS/SC, 2016). O solo permaneceu incubado até a estabilização do pH 5,5.

Tabela 1 - Atributos químicos e físicos do Cambissolo Húmico Alumínico léptico utilizado no experimento.

pH SMP	CTC pH7	CTC efetiva	Al	Ca	Mg	Fe	K	Mn	P	Zn	Argila	M.O	V	m
Cmolc dm <sup>-3</sup>											%			
4,5	28,7	7,7	3,6	2,4	1,6	160	159	5,9	7,5	37,7	380	30	14,1	47,5

Fonte: Elaborada pela autora (2022).

O solo foi então acondicionado nas unidades experimentais, as quais foram constituídas por vasos com capacidade de 4,0 kg, e efetuada a aplicação dos tratamentos de Zn, na forma de cloreto de zinco ( $\text{ZnCl}_2$ ), equivalentes a 0, 300, 600, 900 e 1200 mg kg<sup>-1</sup> de Zn. O tempo de incubação com os tratamentos de Zn foi determinado pela estabilização do valor de pH 5,5.

O transplante das mudas ocorreu em 23 de dezembro de 2021. Foram utilizadas mudas de erva-mate (*Ilex paraguariensis*), provenientes de doação da empresa Apremavi em parceria com a Klabin, ligada ao projeto Matas Legais. As plantas foram colhidas três meses após o plantio. No dia do transplante foi procedida a adubação utilizando-se 22 kg ha<sup>-1</sup> de N, 111 kg ha<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> e 19 kg ha<sup>-1</sup> de K<sub>2</sub>O, de acordo com o recomendado para a cultura da erva mate (Comissão de Química e Fertilidade do Solo – RS/SC, 2016). O experimento foi conduzido no delineamento inteiramente casualizado, com quatro repetições, totalizando 20 unidades experimentais.

### 3.1 ANÁLISES PRÉ-COLHEITA

A partir do momento em que o solo atingiu pH constante, indicando a estabilidade, nos vasos, foi iniciada a mensuração dos parâmetros de crescimento das plantas, especificamente, a altura de planta e a contagem do número de folhas.

Também foi avaliado o teor de clorofila das folhas (índice SPAD), utilizando-se o clorofilômetro SPAD 502 (Konica Minolta®). Para as medições foram consideradas duas posições na planta, sendo elas, a parte central e a parte superior da planta.

A taxa fotossintética foi medida utilizando-se o analisador de gás por infravermelho portátil (Infra-Red Gas Analyser – IRGA) equipado com uma câmara foliar com fonte de LED (LI-6400XT Portable Photosynthesis and Fluorescence System; LICOR, Lincoln, EUA). A medição ocorreu nas folhas mais desenvolvidas, sendo avaliada uma folha em cada unidade experimental. Foi fixada a luminosidade por meio de uma unidade emissora de luz acoplada à câmara foliar. As leituras

ocorreram no período do dia em que houve menor oscilação de temperatura e luz solar constante.

Para determinação da tolerância protoplasmática do tecido foliar, foi realizada a coleta de um disco foliar na posição mediana da planta. Os discos foram colocados em tubos de ensaio com 30 mL de água destilada, imersos durante 24 horas. Após este período, mediu-se a condutividade livre (CL), por meio de um condutivímetro de bancada (Gehaka CG 1400). Em seguida, as amostras foram levadas ao banho maria a 100°C durante 1 hora, em seguida mediu-se a condutividade total (CT). A partir dessas duas medições (CL e CT), calculou-se a porcentagem de integridade da membrana (PIA), determinado pela equação (1).

$$PIA = 1 - \frac{CL}{CT} \times 100 \quad (1)$$

Onde PIA é a porcentagem de integridade absoluta da membrana; CL é a condutividade livre; CT é a condutividade total.

### 3.2 ANÁLISE PÓS-COLHEITA

Ao final do experimento colheu-se o material vegetal. Logo em seguida separou-se em raízes, caules e folhas. os quais foram pesados para obter-se a massa fresca. As folhas e caules foram conduzidos à estufa com circulação forçada de ar a 60 °C ± 2 °C, após secagem foi obtida a massa seca.

As raízes foram lavadas, com água destilada, retirando-se o excesso de umidade e posteriormente armazenadas em solução de álcool 50%, para avaliação dos parâmetros radiculares como, volume, diâmetro médio e comprimento radicular. As raízes foram distribuídas de forma homogênea em uma cuba de vidro, preenchida com água destilada, sem que ocorresse sobreposição. Foram submetidas a digitalização em scanner profissional. As imagens obtidas foram processadas por meio do programa computacional WinRhizo (Regent Instruments, Sainte-Foy, QC, Canadá).

### 3.3 ANÁLISE ELEMENTAR DAS PLANTAS DE ERVA-MATE

Para a extração do alumínio (Al), cálcio (Ca), cobre (Cu), ferro (Fe), potássio (K), magnésio (Mg), manganês (Mn), fósforo (P) e zinco (Zn), na parte aérea e raízes, o material vegetal foi moído em moinho tipo Willey, DeLeo modelo A- EDB-5 11. A seguir foi realizada a digestão ácida conforme o método 3050 B (USEPA, 1996). A quantificação do Al, Ca, Fe, Mg, Mn e P foi realizada em espectrometria de emissão atômica com plasma acoplado por indução (ICP-OES) (Optima® 8300, Perkin Elmer, USA) e do K por fotometria de chama (Digimed DM-63 ®). O teor de Cu e Zn foi quantificado em espectrofotômetro de absorção atômica com atomização em chama ar acetileno (EAA Perkin Elmer 200 ®).

Para controle de qualidade do método e do procedimento de quantificação foram utilizadas oito provas em branco em todas as avaliações para a determinação do limite de detecção do instrumento e material de referência padrão do Instituto Nacional de Padrões e Tecnologia (NIST - SRM Pine Needles 1575 a).

Os valores recuperados da amostra referência encontram-se na Tabela 2.

Tabela 2 - Valores recuperados pelo método utilizado na determinação da concentração de Zn nas amostras de tecido vegetal e raízes das plantas de erva-mate.

Amostra	Elemento	Valor certificado (mg kg <sup>-1</sup> )	Valor recuperado (mg kg <sup>-1</sup> )	Recuperação (%)
Pine Needles 1575a	Zn	60,3	47,0	77,90
	Fe	200	236,0	118,00
	Cu	3	2,6	87,30
	Mn	675	345,3	51,1

Fonte: Elaborada pela autora (2023).

Com as concentrações de Zn nas raízes e parte aérea foram calculados os fatores de translocação (IT) para o Zn entre essas estruturas, de acordo com a equação (2).

$$IT = \frac{\text{Concentração de Zn parte aérea (mg kg}^{-1}\text{)}}{\text{Concentração de Zn raízes (mg kg}^{-1}\text{)}} \quad (2)$$

### 3.4 ANÁLISE DE ZN NA INFUSÃO DA ERVA-MATE

A análise de Zn na infusão foi efetuada conforme o protocolo de Anderson (1999). Para tanto, 1,0 g de folha mais caule de erva-mate moída foi acondicionado em erlenmeyer e adicionados 50 mL de água deionizada na temperatura de 70 °C, simulando a temperatura do chimarrão. O período de infusão foi de 15 minutos. Em seguida, as amostras foram filtradas e adicionadas três gotas de ácido nítrico para a conservação. A quantificação do Zn foi efetuada em espectrofotômetro de absorção atômica com atomização em chama ar acetileno (EAA Perkin Elmer 200 ®).

### 3.5 ANÁLISE ESTATÍSTICA

Os resultados foram submetidos a análise de variância e de regressão polinomial de acordo com o delineamento experimental e o protocolo de amostragem adotado. A normalidade dos dados foi testada pelo teste de Shapiro-Wilk e homogeneidade da variância por meio do teste de Levene. As análises foram realizadas por meio do software R 4.0.2 (R Development Core Team, 2022). Para todos os testes efetuados considerou-se nível mínimo de significância de 5%.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Observou-se uma diminuição no incremento em altura de 40% na média da maior dose de Zn no solo ( $1200 \text{ mg kg}^{-1}$ ) comparativamente à média das plantas que não receberam tratamento com Zn. Para a dose de  $600 \text{ mg kg}^{-1}$ , a redução foi de 60%. Mesmo com a diminuição dos valores, não houve diferenças no incremento médio em altura de plantas (cm) e número de folhas (Tabela 3).

Tabela 3 - Valores médios para altura, número de folhas, nas doses 0 a  $1200 \text{ mg kg}^{-1}$  de Zn no solo.

Tratamento	Incremento médio em altura (cm)	Número de Folhas
0	21,7	8
300	13,7	8

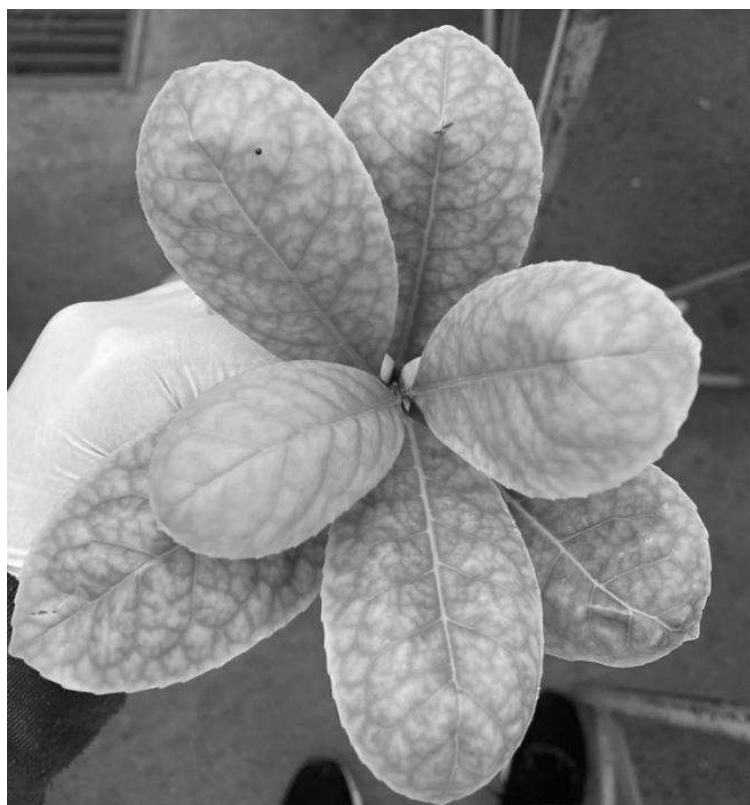
600	8,5	6
900	17,5	7
1200	13,0	6
p valor	0,211	0,338

Fonte: Elaborada pela autora (2023).

Estes achados podem estar relacionados à capacidade que as plantas possuem em responder as ações dos fatores bióticos e abióticos, os quais conduzem o metabolismo e seu desenvolvimento, indicando tolerância ao excesso de Zn (Taiz *et al.*, 2017). Entretanto, Chaves *et al.* (2010) obteve resultados contrários, demonstrando que a altura das plantas de pinhão-manso diminui conforme as diferentes doses aplicadas em relação a testemunha. Isso deve-se a redução do índice mitótico, desencadeado pela inibição da síntese do DNA (Balafrej *et al.*, 2020).

Ao longo do período de avaliação, as folhas apresentaram clorose nas folhas mais novas e abscisão foliar (Figura 1).

Figura 1- Clorose nas folhas mais novas por toxidez de Zn.

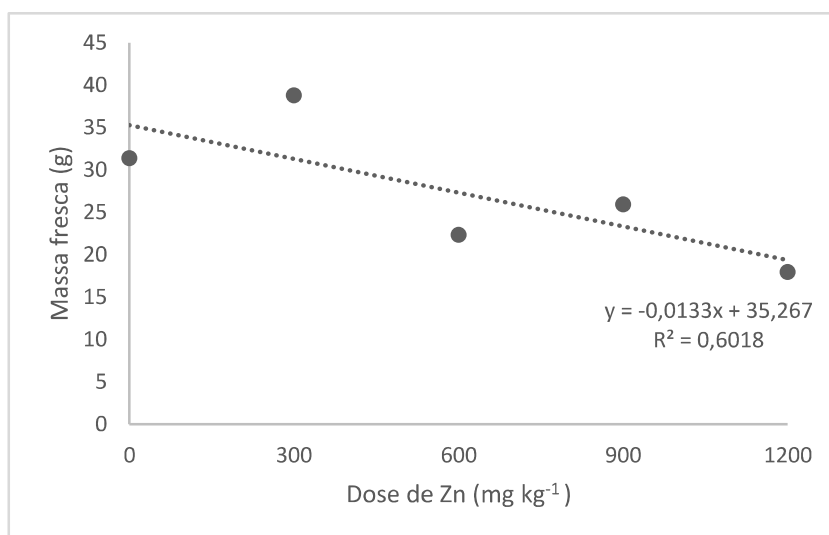


Fonte: Elaborada pela autora (2023).

A clorose, provavelmente, foi induzida pela deficiência de Fe, a qual pode ter sido induzida pela competição entre este elemento nas maiores doses de Zn. A deficiência de Fe juntamente com o excesso de Zn pode ter reduzido a síntese de clorofila e degradação do cloroplasto, bem como, interferência na absorção de P, Mg e Mn (Broadley *et al.*, 2007). Clorose, principalmente em folhas jovens e diminuição do crescimento são sintomas mais comuns de intoxicação por Zn, causando deficiência de Fe (Kabata-Pendias, 2010), devido sua capacidade de interferência na absorção de Fe, P, Mg e Mn (Jain *et al.*, 2010; Jain *et al.*, 2013).

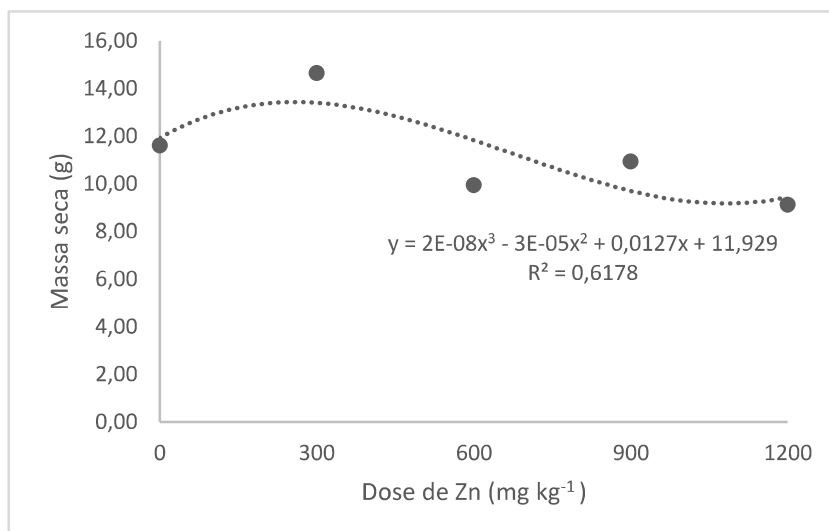
A diminuição na massa fresca (59,30%) e massa seca (31,4%) (Tabela 3), pode ser atribuída à menor produção de fotoassimilados, em decorrência de distúrbios no metabolismo da água e minerais, nutrição vegetal e redução das taxas fotossintéticas (Kaznina, 2017; Gelsleichter, 2020), causando a diminuição do crescimento e desenvolvimento das plantas. Houve diferença entre os tratamentos e a equação que melhor descreveu o comportamento da produção de massa fresca e massa seca apresentaram uma curva de resposta cuja equação de regressão descreve uma função linear e polinomial cúbica, respectivamente (ver Figura 3 e Figura 4).

Figura 2- Massa fresca nas doses de 0 a 1200 mg kg<sup>-1</sup> de Zn no solo.



Fonte: Elaborada pela autora (2023).

Figura 3- Massa seca nas doses de 0 a 1200 mg kg<sup>-1</sup> de Zn no solo.



Fonte: Elaborada pela autora (2023).

Chaves *et al.* (2010) avaliando crescimento, distribuição e acúmulo de Cu e Zn em plantas de pinhão-manso, também identificaram a redução da massa seca das plantas em função das doses crescentes de Zn, corroborando com os resultados desta pesquisa. A diminuição na produção de matéria seca em plantas expostas a níveis elevados de Zn no solo tem como consequência o acúmulo de obstruções que contêm Zn no xilema, dificultando assim o fluxo ascendente da seiva bruta.

Estes resultados também podem estar relacionados à atividade tóxica que o Zn desempenha no DNA das células de plantas menos tolerantes ao metal (Gichner *et al.*, 2006; Silva *et al.* (2015), provocando alterações nas propriedades da membrana, influenciando a função dos transportadores de membrana e dos canais iônicos (Ambrosini *et al.*, 2016).

Houve redução de 59,3% de massa fresca e 31,4% da massa seca (ver Tabela 4). De forma geral, a diminuição na produção de biomassa é uma resposta comum das plantas à toxicidade de metais pesados. A inibição do alongamento e da divisão celular causada pelos metais pesados pode ser uma explicação para o declínio na produção de biomassa (Jain *et al.*, 2010).

No entanto, esta explicação pode ser contradita pelos resultados de tolerância protoplasmática (Tabela 4). Houve diferença na percentagem de integridade da membrana entre as doses de Zn aplicadas ao solo. Os resultados para porcentagem

de integridade da membrana (PIA%) apresentaram uma curva de resposta cuja equação de regressão descreve uma função polinomial quadrática (Figura 5).

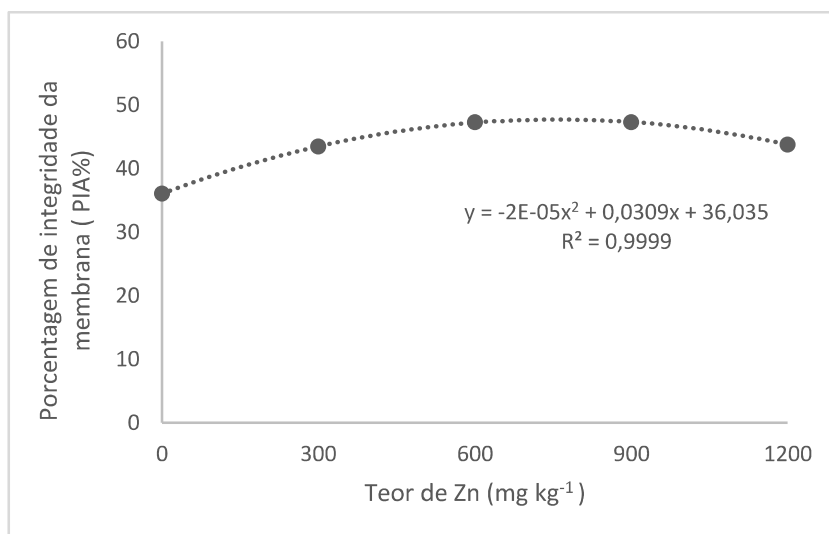
Tabela 4 - Valores médios massa fresca, massa seca e porcentagem de integridade da membrana (PIA%) nas doses 0 a 1200 mg kg<sup>-1</sup> de Zn no solo.

Tratamento	Massa fresca (g)	Massa seca (g)	PIA (%)
0	31,4	11,6	36,0
300	38,8	14,6	43,4
600	22,3	9,9	47,2
900	25,9	10,9	47,2
1200	17,9	9,1	43,7
p valor	0,000	0,004	0,000

Fonte: Elaborada pela autora (2023).

A porcentagem de integridade da membrana (PIA %) variou entre 36,06% para a dose zero e 47,25% para a dose de 600 mg kg<sup>-1</sup>, aumentando paralelamente às doses de Zn no solo, indicando, neste caso, maior tolerância e menor dano as folhas conforme tem-se o aumento das doses de Zn aplicadas ao solo.

Figura 4- Porcentagem da integridade da membrana (PIA %) nas doses de 0 a 1200 mg kg<sup>-1</sup> de Zn no solo.



Fonte: Elaborada pela autora (2023).

Houve uma redução dos valores da taxa fotossintética, da condutância estomática, da transpiração e do índice SPAD nas maiores doses de Zn adicionadas ao solo (Tabela 5).

Os parâmetros de taxa fotossintética e transpiração não mostraram diferença estatística para as diferentes doses analisadas, mesmo com a redução dos valores. A ausência de efeito sugere uma possível compartimentalização do Zn nas células da folha, prevenindo danos aos processos fisiológicos.

Tabela 5 - Valores médios para taxa fotossintética, condutividade estomática, transpiração e SPAD nas doses 0 a 1200 mg kg<sup>-1</sup>.

Tratamento	Taxa Fotossintética (μmol CO <sub>2</sub> m <sup>-2</sup> s <sup>-1</sup> )	Condutividade estomática (mmol H <sub>2</sub> O m <sup>-2</sup> s <sup>-1</sup> )	Transpiração (mmol H <sub>2</sub> O m <sup>-2</sup> s <sup>-1</sup> )	SPAD
0	5,601	0,095	1,232	55,7
300	6,617	0,105	1,641	60,3
600	2,668	0,029	0,606	40,2
900	4,412	0,052	1,116	41,3
1200	3,401	0,040	0,888	49,4
p valor	0,061	0,019	0,173	0,157

Elaborada pela autora (2023).

O Zn desempenha um papel na fotossíntese ao ativar a enzima carboxilase pirúvica (PEPcase). No entanto, um excesso desse elemento no solo pode inibir o processo fotossintético. Isso ocorre devido à redução da atividade da Rubisco, causada pela competição do Zn com o Mg no sítio de ativação dessa enzima. Sabe-se que a principal base da toxicidade do Zn na fotossíntese parece ser na perturbação da nutrição mineral (Fe, Mn, Mg) e, conseqüentemente, nas respostas decorrentes (KAUR *et al.*, 2021).

Além disso, a atividade do fotossistema II (PS II) e a fotofosforilação é reduzida devido ao deslocamento do Mg pelo excesso de Zn na membrana do tilacóide (Moreira *et al.*, 2021), causando distúrbios na estrutura do complexo central do PSII e

interagindo com o lado doador do PSII, deslocando o Fe e assim diminui a eficiência da conversão de energia fotossintética (Kaur *et al.*, 2021).

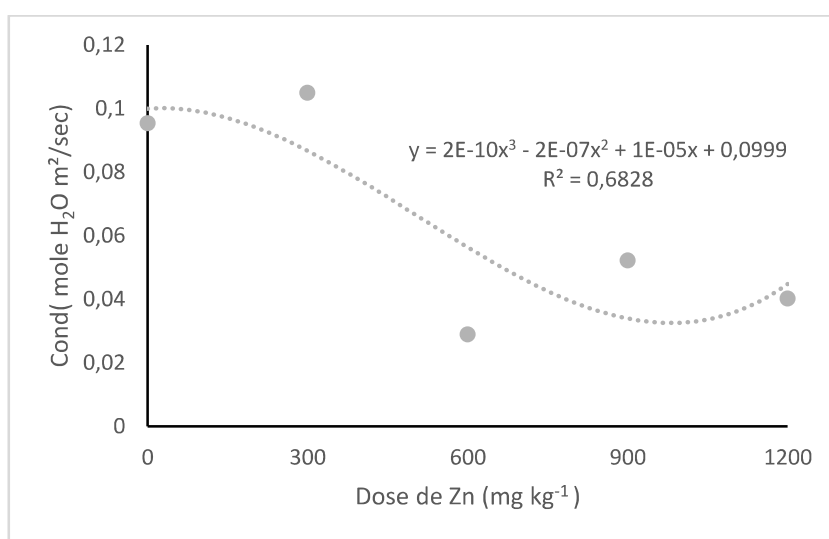
A redução da taxa fotossintética pode estar relacionada ao estresse oxidativo resultante do aumento das doses de Zn aplicadas ao solo (Tabela 5), mesmo com a redução dos valores não houve diferença significativa.

A diminuição da taxa fotossintética provoca a formação de espécies reativas de oxigênio (ROS), podendo resultar em peroxidação lipídica, comprometimento de proteínas, inativação de enzimas e danos ao DNA (Balafrej *et al.*, 2020). Importa destacar que a taxa de fotossíntese das plantas está fortemente correlacionada com a assimilação líquida de CO<sub>2</sub> (Moreira *et al.*, 2021).

Em relação a condutância estomática, os valores variaram de 0,10 a 0,03 mmol H<sub>2</sub>O m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup> com o aumento das doses de Zn aplicadas no solo, e teve como curva resposta uma equação cúbica (Figura 5). A condutância estomática é uma medida da abertura dos estômatos e indica a capacidade das folhas de realizar trocas gasosas (vapor d'água e CO<sub>2</sub>) com o meio.

Trapp *et al.* (2021) observou que os valores da taxa fotossintética foram maiores nas folhas superiores. Entretanto, a condutância estomática teve uma redução de 40% conforme aumento das doses de Zn aplicadas ao solo.

Figura 5- Valores médios para condutância estomática nas doses de 0 a 1200 mg kg<sup>-1</sup> de Zn no solo.



Fonte: Elaborada pela autora (2023).

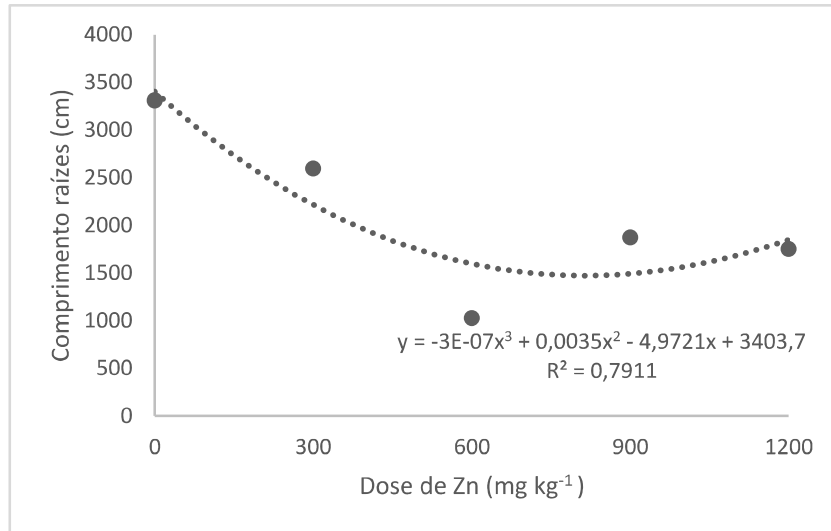
Portanto, uma diminuição nesta variável, resulta no maior fechamento dos estômatos, acarretando a diminuição da transpiração, aumentando a resistência do vegetal (Hasanuzzaman *et al.*, 2013; Taiz; Zeiger, 2013). Conforme Kaur *et al.* (2021), em concentrações elevadas de Zn, observou-se uma redução na condutância estomática e uma diminuição na taxa fotossintética, acarretando a diminuição da biomassa vegetal.

Portanto, as alterações no aparato fotossintético, na pigmentação e no rendimento do sistema PSII, devido ao excesso de Zn, são as principais razões das mudanças na assimilação de CO<sub>2</sub>, evidenciando a sensibilidade das plantas a esse metal e seu impacto direto na eficiência da fotossíntese e no balanço de carbono (MOREIRA *et al.*, 2021). Evidências apontam para a inexistência de um único alvo específico de toxicidade de Zn na fotossíntese; ao invés disso, parece que um conjunto de eventos pode ser desencadeado pelo excesso desse elemento (Kaur *et al.*, 2021).

O mesmo comportamento foi observado para o índice SPAD, caracterizando um potencial tolerância relacionada ao teor de clorofila com o aumento das doses de Zn aplicadas ao solo.

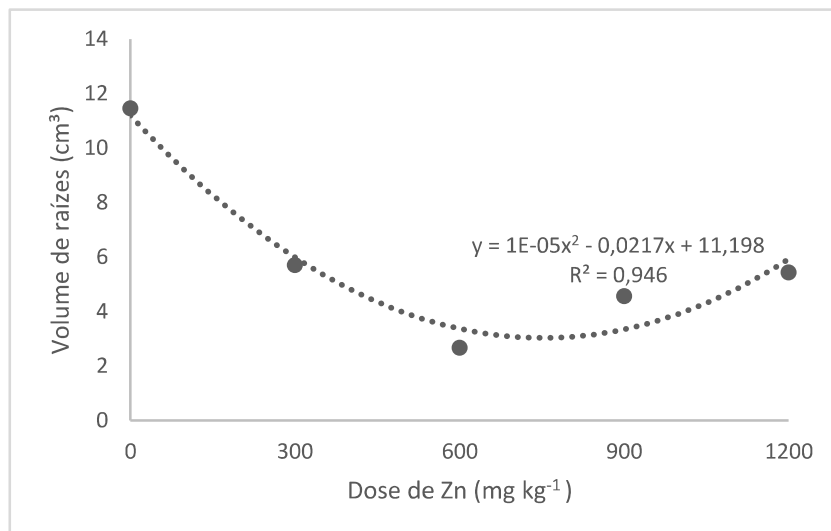
Houve diminuição do comprimento e volume de raízes nas maiores doses de Zn no solo (Tabela 6; Figura 7). Ocorreu aproximadamente 23% de redução do volume das raízes conforme o aumento das doses de Zn no solo. Os resultados médios de comprimento de raiz apresentaram uma curva de resposta cuja equação de regressão descreve uma função polinomial cúbica, já para o volume médio de raiz (Figura 8), a curva resposta cuja equação de regressão descreve uma função polinomial quadrática.

Figura 6- Valores médios para comprimento de raiz nas doses de 0 a 1200 mg kg<sup>-1</sup> de Zn no solo.



Fonte: Elaborada pela autora (2023).

Figura 7- Valores médios para volume de raiz nas doses de 0 a 1200 mg kg<sup>-1</sup> de Zn no solo.



Fonte: Elaborada pela autora (2023).

O comprimento das raízes reduziu 31%, conforme o aumento das doses de Zn no solo, em relação a dose zero, e é representado pela curva de resposta cuja equação de regressão descreve uma função polinomial quadrática. O comprimento das raízes é um parâmetro que influencia a capacidade da planta em absorver compostos do seu ambiente.

O diâmetro de raízes não apresentou resultados significativos. Estudos indicam que a perda de viabilidade celular nas raízes tratadas com Zn aumentou significativamente. Portanto, a redução no crescimento radicular pode ser atribuída à perda de viabilidade celular nas extremidades das raízes (Li *et al.*, 2012).

Tabela 6 - Valores médios para comprimento, diâmetro e volume de raiz nas doses de 0 a 1200 mg kg<sup>-1</sup>.

Tratamento	Comprimento (cm)	Diâmetro (mm)	Volume (cm <sup>3</sup> )
0	3308,54	0,66	11,40
300	2595,65	0,58	7,03
600	1025,73	0,58	2,67
900	1872,77	0,55	4,56
1200	1752,78	0,58	4,57
p valor	0,001	0,058	0,00

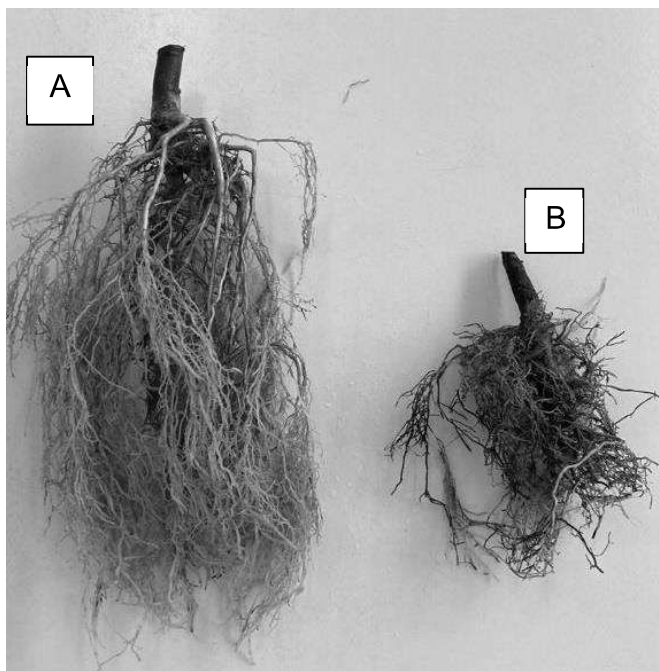
Fonte: Elaborada pela autora (2023).

Silva *et al.* (2015), observou em mudas de espécies do gênero *Eucalyptus* e *Corymbia* a redução de 30, 32 e 93% no volume radicular conforme as doses de Zn aplicadas no solo. A interferência das diferentes doses de Zn aplicadas no solo associado ao índice de translocação do Zn, implicam de forma diferenciada a inibição do desenvolvimento do volume radicular. Além disso, distúrbio nos processos fisiológicos afetam a mitose propiciando a morte celular das raízes, resultando na redução do desenvolvimento radicular.

Trapp *et al.* (2021) trabalhando com *Pfaffia glomerata* observou a redução do desenvolvimento radicular, onde o comprimento e volume radicular diminuíram à medida que as concentrações de Zn aumentavam no solo. Esses achados corroboram com os resultados encontrados nesta pesquisa.

A toxicidade por metais pesados inibe tanto a divisão celular quanto o alongamento das raízes das plantas, resultando no encurtamento do comprimento total das raízes (Figura 9).

Figura 8- Análise visual da raiz de erva-mate no tratamento controle (A) e raiz do tratamento 1200 mg kg<sup>-1</sup> de Zn aplicado no solo (B).



Fonte: Elaborada pela autora (2023).

Como consequência, os processos de absorção de água e nutrientes são severamente limitados, o que pode levar a uma redução no crescimento dos brotos. Além disso, a presença dos metais pesados nas raízes é tóxica pois está associada ao prolongamento do ciclo celular (Emamverdian *et al.*, 2015).

Sugere-se que altas concentrações de Zn nas raízes indicam a habilidade da planta extrair o Zn do solo e acumular no sistema radicular (Daniel, 2018). Conforme Kabata-Pendias (2010), concentrações mais elevadas de Zn são comumente detectadas nas raízes, especialmente quando as plantas são cultivadas em solos abundantes desse metal.

O armazenamento de Zn nos vacúolos radiculares é empregado como um mecanismo de exclusão do Zn da parte aérea, quando há um influxo excessivo desse metal nas raízes ou um fornecimento excessivo no solo (Stanton *et al.*, 2022).

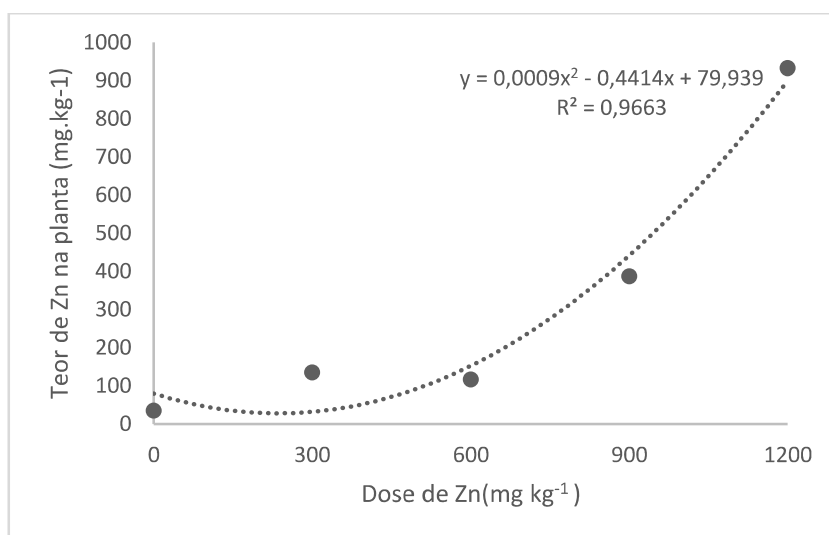
Entretanto, como efeito tóxico, neste trabalho o Zn ocasionou modificação na arquitetura radicular, o que foi refletido na redução da massa seca da parte aérea nas maiores concentrações de Zn no solo (Marques *et al.*, 2018; Balafrej *et al.*, 2020).

As raízes, normalmente, contêm mais Zn do que a parte aérea, logo quando se tem um cenário de excesso de Zn, este elemento pode ser translocado das raízes para o topo, acumulando-se nos cloroplastos, nos vacúolos e nas membranas celulares (Kabata-Pendias, 2010). Quando ocorre acumulação de Zn pelas raízes

pode haver redução do crescimento das plantas pela menor capacidade de absorção de água e outros nutrientes (Vaillant *et al.*, 2005; Pereira *et al.*, 2013).

Os teores de Zn na parte aérea variaram de 34,43 a 933,43 mg kg<sup>-1</sup>, com o aumento da dose de Zn aplicada ao solo (Figura 9). Esse fato é um indicativo que a erva-mate apresenta potencial como espécie capaz de acumular e distribuir de Zn, pois esse resultado aliado à redução da matéria seca, está relacionado ao acréscimo e acúmulo de Zn pelo tecido foliar. (Silva *et al.*, 2015).

Figura 9- Teor de Zn na parte aérea de erva mate nas doses de 0 a 1200 mg kg<sup>-1</sup> de Zn no solo.



Fonte: Elaborada pela autora (2023).

Pressupõe-se que o acúmulo de Zn em tipos específicos de células, como os tricomas, funcione como um mecanismo de desintoxicação e armazenamento em situações de excesso de crescimento de Zn, sendo o acúmulo desse metal nos tecidos aéreos também associado à defesa contra a herbivoria. A importação de Zn para os compartimentos subcelulares também representa uma estratégia crucial de desintoxicação. (Stanton *et al.*, 2022).

De maneira geral, as mudas de erva-mate apresentaram maior redução de matéria seca na dose de 1200 mg kg<sup>-1</sup>, sugerindo uma possível intolerância ao Zn. Entretanto, não se observou redução na altura das mudas, o que pode estar relacionado ao aspecto nutricional resultante das atividades fisiológicas estimuladas pelo Zn (Silva *et al.*, 2015).

Ulbrich *et al.* (2023), trabalhando com doses de 0 a 40 mg kg<sup>-1</sup> de Zn em erva-mate em diferentes tipos de solo, encontrou resultados diferentes, com as plantas tendo folhas saudáveis e crescimento normal. As concentrações foliares de Zn variavam de 539 a 1127, 674 mg kg<sup>-1</sup> para plantas cultivadas em solos originários de basalto, riodacito e arenito. Esse comportamento pode ser explicado pela presença natural de Zn no material original do solo (Althaus *et al.*, 2018).

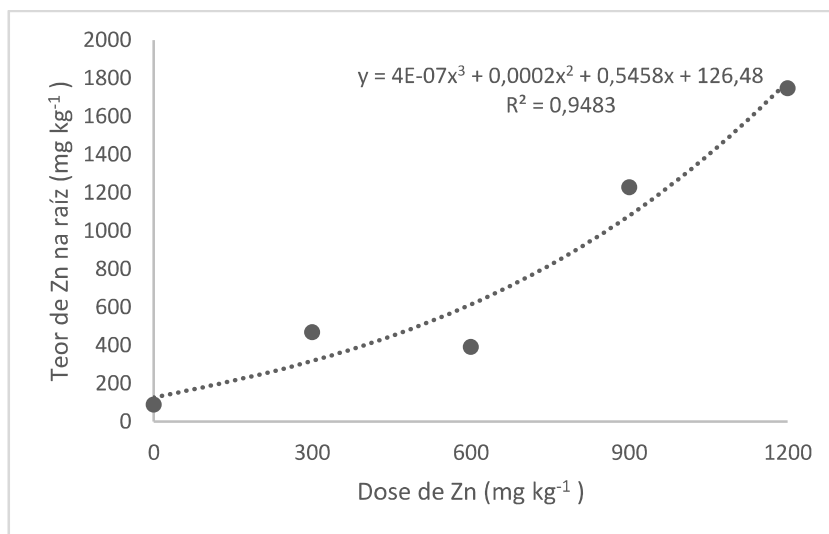
Ainda conforme Ulbrich *et al.* (2023), as concentrações foliares de 1127 mg kg<sup>-1</sup> foram semelhantes às aquelas encontradas neste trabalho; esta descoberta é particularmente relevante, dado que os níveis de Zn na erva-mate são naturalmente elevados, mas nenhum sintoma de toxicidade de Zn foi observado.

Avaliando a capacidade de hiperacumulação de Mn em erva-mate, Magri *et al.* (2020) encontraram concentração elevada nas folhas, de 540 mg kg<sup>-1</sup>, em solos não calcários, 13.452 mg kg<sup>-1</sup> para o solo basáltico e 12.127 mg kg<sup>-1</sup> para o solo arenítico, demonstrando que a espécie apresenta características de plantas hiperacumuladoras de Mn. Ainda segundo o autor, os sintomas de toxicidade tendem a desaparecer com o envelhecimento das folhas.

Tito *et al.* (2016), avaliando acúmulo e translocação de Cu e Zn em *Crambe abyssinica*, encontrou valores inferiores para concentração foliar. A partir de doses de 0 a 50 mg kg<sup>-1</sup>, *C. abyssinica* atingiu teores foliares de 36,28 a 419,75 mg kg<sup>-1</sup>. Esses teores de Zn são próximos aos valores considerados tóxicos, que variam de 100 a 500 mg kg<sup>-1</sup>, segundo Kabata-Pendias (2010).

As concentrações mais elevadas de Zn foram observadas nas raízes (Figura 10). Os resultados para teor médio de Zn na raiz de erva-mate apresentaram uma curva de resposta cuja equação de regressão descreve uma função polinomial cúbica.

Figura 10- Teor médio de Zn na raiz de erva-mate nas doses de 0 a 1200 mg kg<sup>-1</sup> de Zn no solo.

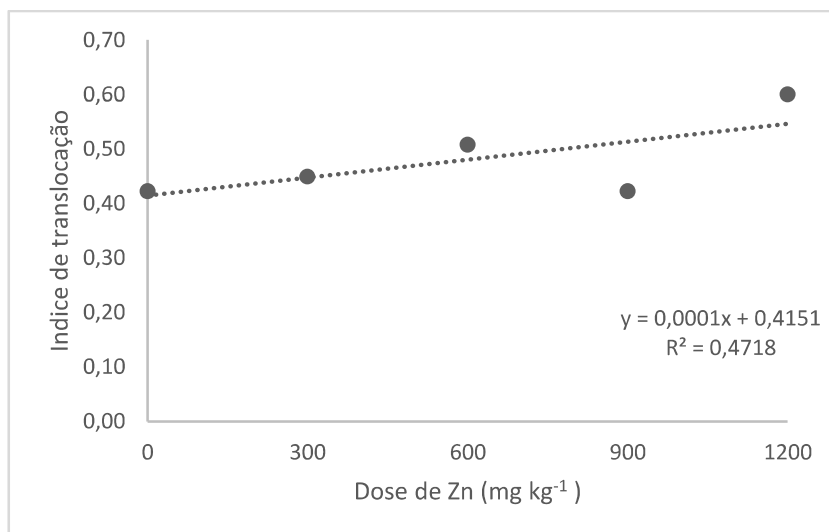


Fonte: Elaborada pela autora (2023).

Nas plantas que não receberam Zn, a concentração desse elemento na raiz foi de 89,39 mg kg<sup>-1</sup>. Na dose de 1200 mg kg<sup>-1</sup>, atingiu concentração de 1747,43 mg kg<sup>-1</sup>. Avaliando a capacidade de acumulação de Ni e Zn em erva-mate Ulbrich *et al.* (2023), encontraram efeito semelhante. Li *et al.* 2012 identificaram valores médios mais elevados de Zn nas raízes (44,0 mg kg<sup>-1</sup>) em comparação com as folhas maduras. Avaliando a translocação de Zn e crescimento radicular em milho, Rosolem e Franco (2000), também observaram aumento nos teores de Zn nas raízes foi mais evidente do que nas folhas.

O índice de translocação (IT) aumentou linearmente com a aplicação de Zn, variando de 42% nas doses de 0 e 300 mg kg<sup>-1</sup> a 60% na dose de 1200 mg kg<sup>-1</sup> (Figura 12). Os resultados para Índice de translocação da raiz para as folhas de erva-mate apresentaram uma curva de resposta cuja equação de regressão descreve uma função linear.

Figura 11- Índice de translocação (%) da raiz para as folhas de erva-mate nas doses de 0 a 1200 mg kg<sup>-1</sup> de Zn no solo.



Fonte: Elaborada pela autora (2023).

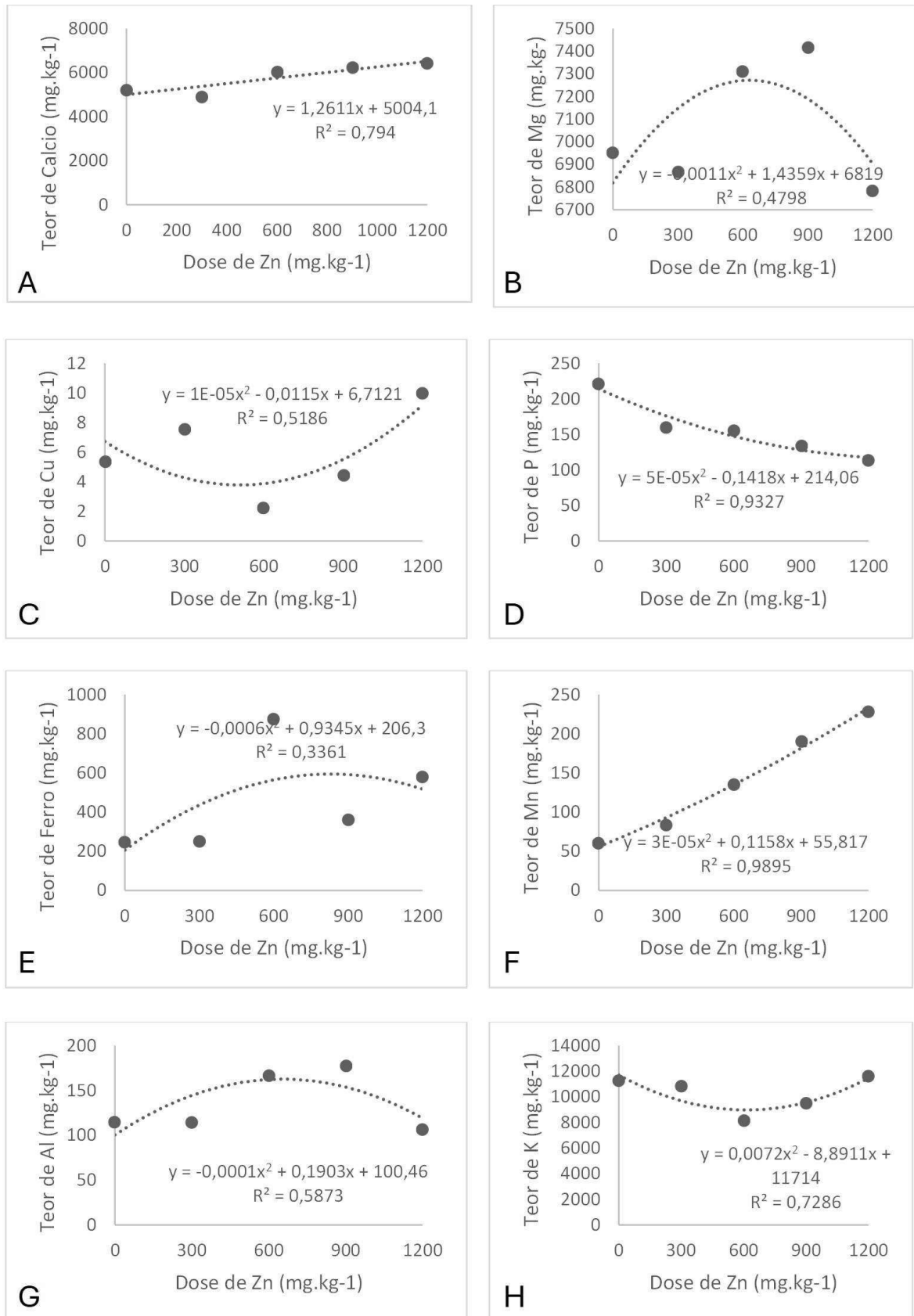
Silva *et al.* (2015) observaram um aumento no índice de translocação no *E. grandis* e *C. citriodora* e *E. saligna*, até as doses de 515,4; 549,7 e 569 mg kg<sup>-1</sup>, variando de 30% a 80%, similares, portanto, aos desse trabalho. Os autores notaram que o aumento na dose de Zn na solução resultou em um aumento da concentração de Zn nas diferentes partes da planta.

Dessa forma, índices mais elevados evidenciam a presença de mecanismos fisiológicos que possibilitam altas concentrações de metais pesados na parte aérea das plantas.

Silva (2017) trabalhando com capacidade de acúmulo de Pb em erva-mate, não observou diferença no índice de translocação com o aumento das doses aplicadas. Os valores observados ficaram entre 14,4% na dose de 10 mg kg<sup>-1</sup> a 26,21% na dose de 50 mg kg<sup>-1</sup>. Esses achados indicam um mecanismo importante de proteção para as estruturas da parte aérea e conforme teve o aumento da dose de Pb na solução, resultou um aumento na concentração de Pb nas diferentes partes da planta de erva-mate.

Os teores de Al, Fe, Ca, Cu, K, Mg, Mn, P na parte aérea da erva-mate são apresentados na Figura 13. Observou-se uma redução nos teores de Al, Fe, Mg e P na parte aérea a partir da dose de 600 mg kg<sup>-1</sup> de zinco aplicada ao solo.

Figura 12- Teores médios de Ca (A); Mg (B); Cu (C), P(D); Fe (E), Mn (F), Al (G), K (H) na parte aérea da erva mate nas doses de 0 a 1200 mg kg<sup>-1</sup> de Zn no solo.



Fonte: Elaborada pela autora (2023).

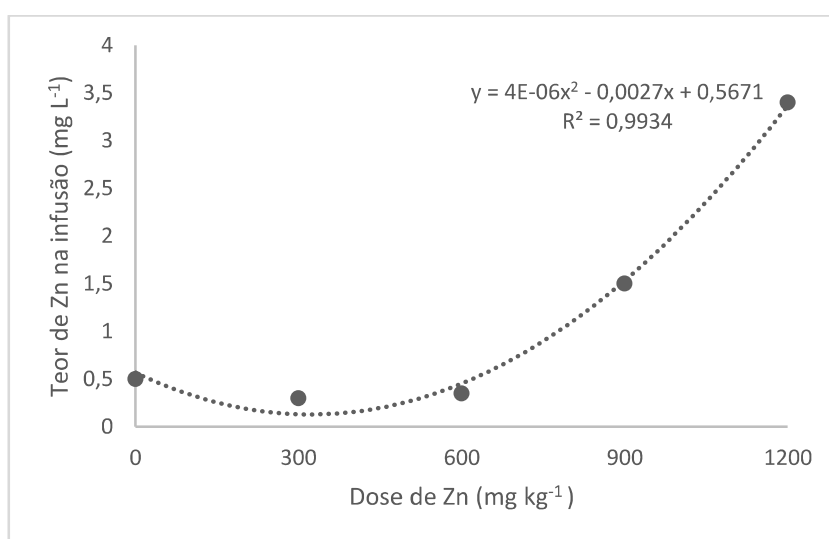
A diminuição do teor de Mg com o aumento das doses de Zn, deve-se a competição no momento da absorção do Zn entre os cátions divalentes, causando efeito antagônico (Kabata-Pendias, 2010). Já a diminuição de absorção do Al e Fe deu-se pela competição do Zn pelos mesmos sítios de ligação. Esse comportamento foi semelhante ao encontrado por Ulbrich *et al.* (2023). A redução no teor de P pode estar associada à precipitação do P no solo na forma de fosfato de Zn, resultando na imobilização desse elemento. Este comportamento também foi observado por Gelsleichter *et al.* (2021), avaliando o acúmulo de Zn por erva-mate.

Contudo, a toxicidade de Zn é frequentemente confundida com deficiências de Fe, Ca, Mg ou Mn. Portanto, a ocorrência de clorose foi atribuída ao excesso de Zn e associada a concentrações mais baixas de Fe (Magri *et al.*, 2020).

Para Ca, Cu, K e Mn aumentaram conforme teve o aumento das doses de Zn, isso pode ser considerado um efeito positivo, uma vez que esses elementos podem atingir suas necessidades diárias de maneira mais apropriada (Ulbrich *et al.*, 2023).

Os teores médios de Zn encontrados na infusão de erva-mate variaram de 0,35 mg L<sup>-1</sup> a 3,4 mg L<sup>-1</sup> e apresentou uma curva de resposta cuja equação de regressão descreve uma função polinomial quadrática (Figura 14).

Figura 13- Teores médios de Zn na infusão de erva-mate nas doses de 0 a 1200 mg kg<sup>-1</sup> de Zn no solo.



Fonte: Elaborada pela autora (2023).

Existem poucos estudos que quantificam os teores de elementos na água de infusão de erva-mate, entretanto, destaca-se especialmente o estudo desenvolvido por Heinrich e Malavolta (2001), no qual os autores observaram teores de Zn na composição comercial da erva-mate de 2,14 mg L<sup>-1</sup> a 2,38 mg L<sup>-1</sup>, esses achados corroboram com os observados no presente estudo. Dors (2017), obteve teores maiores em seu estudo, variando de 1,9 mg L<sup>-1</sup> a 9,1 mg L<sup>-1</sup>. Contudo, a autora indica que, possivelmente, as marcas comerciais analisadas neste estudo possuem teores de Zn inferiores, não coincidindo com os valores descritos na literatura para outras marcas.

Bragança *et al.* (2011), avaliando oligoelementos em diferentes marcas de chá de erva-mate, identificaram teores de Zn de 0,41 a 1,0 mg L<sup>-1</sup> na infusão. Segundo os autores o teor de metal nas infusões é influenciado por uma variedade de fatores, como o clima, práticas agrícolas, solo, água e fertilizantes.

A Organização Mundial da Saúde (OMS) define a Ingestão Diária Recomendada (IDR) para Zn de 12 mg/dia para mulheres e 15 mg/dia para homens. Considerando-se o consumo de um litro de chimarrão, resultaria em uma ingestão de 3,4 mg de Zn, essa quantidade ingerida seria abaixo da IDR.

Heinrich e Malavolta (2001) destacam que não se pode assumir que os elementos minerais estejam completamente biodisponíveis. Existem numerosos compostos orgânicos, especialmente polifenóis, cuja forma química ainda não é conhecida e provavelmente a absorção de vários elementos pelo trato digestivo está condicionada a essas formas químicas.

Pode-se depreender desses achados que a erva-mate possui grande potencial para acumular e distribuir Zn para a parte aérea, indicando que a espécie pode ser uma hiperacumuladora de Zn. Entretanto, para uma planta ser considerada hiperacumuladora é essencial a translocação para a parte aérea de um ou mais elementos inorgânicos em níveis até cem vezes maiores que outras espécies, desenvolvendo sob as mesmas condições (Gelsleichter *et al.*, 2021).

## 5 CONCLUSÃO

O aumento das concentrações de Zn aplicadas no solo resultou no aumento do Zn na parte aérea e inibiu o crescimento e desenvolvimento radicular.

O aumento das doses de Zn aplicadas no solo, não afetou a altura das mudas, número de folhas, tolerância protoplasmática, taxa fotossintética, transpiração e no índice SPAD.

Houve redução da massa seca das plantas de erva-mate, entre as doses de 600, 900 e 1200 mg kg<sup>-1</sup>, indicando a necessidade do cálculo de limite crítico de toxidez para confirmar se a espécie é uma planta hiperacumuladora de Zn, sem que ocorra prejuízos no desenvolvimento das plantas.

Os parâmetros radiculares, comprimento e volume, diminuíram conforme o aumento das concentrações de Zn, sugerindo que, possivelmente houve acumulação desse metal pelas raízes e como consequência menor translocação do Zn para as folhas.

As concentrações mais elevadas de zinco foram observadas nas raízes, seguidas pelas folhas.

Verificou-se teores de Zn na parte aérea da erva-mate com o aumento da dose de Zn aplicada ao solo. Indicando que a erva-mate apresenta potencial como espécie capaz de acumular e distribuir de Zn.

Observou-se uma redução nos teores de Al, Fe, Mg e P na parte aérea a partir da dose de 600 mg kg<sup>-1</sup> de Zn aplicada ao solo.

Os teores de Zn encontrados na infusão de erva-mate não atingiram valores suficientes para causar intoxicação após a ingestão de chimarrão contendo doses elevadas de Zn.

## REFERÊNCIAS

- AGUIAR, P. W. S.de. Efeito do excesso de zinco na morfologia de *Lantana fucata* Lindl. (Verbenaceae). **Anais... SIMPÓS SUL - II Simpósio de Pós-Graduação do Sul do Brasil**, 2022, Cerro Largo. Cerro Largo: Open Journal Systems, 2022. p. 1-2.
- AKAY, A.; Doulati, B. The Effect of Soil Properties on Zn Adsorption. **J. Int. Environmental Application & Science**, vol. 7, n.1, p. 151-160, 2012.
- ALBAS, C.S. *et al.* Avaliação da genotoxicidade da *Ilex paraguariensis* (erva mate) pelo teste do micronúcleo. **Revista Brasileira de Plantas Mediciniais**, v.16, n.2, p. 345-349, 2014. Disponível em: [http://dx.doi.org/10.1590/1983-084X/12\\_058](http://dx.doi.org/10.1590/1983-084X/12_058) >.
- ALLOWAY, B. J. **Zinco em solos e nutrição de culturas**. França: Associação Internacional de Zinco Associação Internacional da Indústria de Fertilizantes, 2008. 139 p.
- ALMEIDA, R. F.de. Plantas Acumuladoras de Metais Pesados No Solo – Uma revisão. **Revista de Biotecnologia & Ciência**, v. 2, n. 1, p. 28-46, 2012.
- ALTHAUS, D. *et al.* Natural Fertility and Metals Contents in Soils of Rio Grande do Sul (Brazil). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 42, p. 1-15, 2018.
- AMADO, S.; CHAVES FILHO, J. T. Fitorremediação: uma alternativa sustentável para remediação de solos contaminados por metais pesados. **Natureza Online**, v. 4, n. 13, p. 158-164, 2015.
- AMBROSINI, V. G. *et al.* Impacto do excesso de cobre e zinco no solo sobre videiras e plantas de cobertura. In: AMBROSINI, V. G. **Impacto do excesso de cobre e zinco no solo sobre videiras e plantas de cobertura**. S.L: Embrapa Uva e Vinho, 2016. p. 91-110.
- ANDERSON, K. A. **Analytical techniques for inorganic contaminants**. Gaithersburg: AOAC International, 1999. 316p.
- ANDRADE, É. C. B. de *et al.* Avaliação do teor de cobre e zinco em carnes cruas, processadas termicamente, resfriadas e congeladas no período de um mês. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, v. 24, n. 3, p. 393-396, 2004.
- APHA - American Public Health Association. Awwa - American Water Works Association; Wef - Water Environment Federation. **Standard Methods for the examination of water and wastewater**. Baltimore: United Book Press. 2005.
- BALAFREJ, H.*et al.* Zinc Hyperaccumulation in Plants: a review. **Plants**, v. 9, n. 5, p. 562, 2020.
- BARBOSA, J. Z. *et al.* Composition, Hot-Water Solubility of Elements and Nutritional Value of Fruits and. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 39, p. 593-603, 2015.

BARROS, S. G. S. *et al.* Bebendo infusão de maté de alta temperatura em uma população de risco para carcinoma espinocelular de esôfago no sul do Brasil. **Arquivo Gastroenterol**, v.37, n.1, p.25-30, 2000.

BATISTA, M. A. *et al.* Princípios de fertilidade do solo, adubação e nutrição mineral. **Hortaliças-Fruto**, Maringá: EDUEM, p. 113-162, 2018.

BAZIHIZINA, N. *et al.* Zn<sup>2+</sup>-induced changes at the root level account for the increased tolerance of acclimated tobacco plants. **Journal Of Experimental Botany**, v. 65, n. 17, p. 4931-4942, 2014.

BRAGANÇA, Victor Luiz Cordoba *et al.* Trace Elements in Different Brands of Yerba Mate Tea. **Biological Trace Element Research**, v. 144, n. 1-3, p. 1197-1204, 13 abr. 2011. Springer Science and Business Media LLC.

BONDARIK, R.; KOVALESKI, J. L.; PILATTI, L. A. A produção de erva-mate e o início da atividade industrial no estado do Paraná. **Anais... II Encontro de Engenharia e Tecnologia dos Campos Gerais**. Ponta Grossa: UFPR, 2006.

BORGES JUNIOR, M. *et al.* Distribuição e formas de ocorrência de zinco em solos no município de Vazante - MG. **Rev. Bras. Ciênc. Solo**, v. 32, n. 5, p. 2183-2194, 2008.

BRAGANÇA, Victor Luiz Cordoba *et al.* Trace Elements in Different Brands of Yerba Mate Tea. **Biological Trace Element Research**, v. 144, n. 1-3, p. 1197-1204, 13 abr. 2011. Springer Science and Business Media LLC.

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

BROWN, PH, Cakmak, I., Zhang, Q. (1993). **Forma e Função das Plantas de Zinco**. In: Robson, AD (eds) Zinco em Solos e Plantas. Desenvolvimentos em Ciências de Plantas e Solo, vol 55. Springer, Dordrecht.

BURTNIK, O. J. **Yerba Mate**: Manual de Producción. Santo Tomé: INTA, AER, 2006.

CAMPOS, M. C. C. Atributos dos solos e riscos de lixiviação de metais pesados em solos tropicais. **Ambiência**, v. 6, n. 3, p. 547-565, 2010.

CARDOZO, A. G. L. *et al.* Yerba mate (*Ilex paraguariensis* A. St.-hil.): a comprehensive review on chemical composition, health benefits and recent advances. **Research, Society and Development**, v. 10, n. 11, p. e590101120036, 2021.

CARVALHO, P. E. R. **Espécies Arbóreas Brasileira**: erva-mate - *Ilex paraguariensis*. Brasília: Embrapa, 2003.

CARVALHO, P. E. R. *Ilex paraguariensis* Saint-Hilaire: erva-mate. In: CARVALHO, P. E. R. **Espécies florestais brasileiras**: recomendações silviculturais, potencialidades e uso da madeira. Brasília: EMBRAPA-CNPQ, EMBRAPA-SPI, 1994. p. 280-287.

CARVALHO, P. E.R. **Espécies arbóreas brasileiras**. Brasília: Embrapa Informação tecnológica, 2003.

CATAPAN, M. I. S. **Influência da temperatura, substrato e luz na germinação de sementes de *Ilex paraguariensis* St. Hil.** Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba. 109 p. 1998.

CHALUPA, V. In vitro propagation of birch (*Betula verrucosa* Ehrh). **Biologia Plantarum**, v. 23, n. 6, p. 472-474, 1981.

CHAVES, L. G.; MESQUITA, E. Acúmulo e Distribuição de Cobre e Zinco em Mamoneira Cultivar BRS Paraguaçu e Crescimento da Planta. **Engenharia Ambiental**, v. 7, n. 2015, p. 263–277, 2010.

CHAVES, L. H. G. *et al.* Crescimento, distribuição e acúmulo de cobre e zinco em plantas de pinhão-mansão. **Revista Ciência Agronômica**, v. 41, n. 2, p. 167-176, 2010.

CHECHI, L. *et al.* A produção de erva-mate: um estudo da dinâmica produtiva nos estados do Sul do Brasil. **Enciclopedia Biosfera**, v. 13, n. 23, 2016.

CONAMA - Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução Nº 420 de 28 de dezembro de 2009. **Dispõe sobre critérios e valores orientadores de qualidade do solo quanto à presença de substâncias químicas e estabelece diretrizes para o gerenciamento ambiental de áreas contaminadas por essas substâncias em decorrência de atividades antrópicas**. Diário Oficial da República Federativa do Brasil, Brasília, DF, 31 de dezembro de 2009. Disponível em <<http://www.mma.gov.br/port/conama/res/res09/res42009.pdf>>. Acesso em 09 Dez. 2020.

COPELLO, G. J. *et al.* Exhausted Yerba Mate Leaves (*Ilex paraguariensis*) as Biosorbent for the Removal of Metals from Aqueous Solutions. **Journal of the Brazilian Chemical Society**, v. 22, n. 4, p. 790-795, 2011.

CQFS - Comissão de Química e Fertilidade do Solo. **Manual de calagem e adubação para os Estados de Rio Grande do Sul e de Santa Catarina**. Viçosa, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo. 376p., 2016

DA ROSA, L.; DE SOUZA, T. S. Evolução do setor ervateiro durante o século XIX: uma análise dos avanços tecnológicos na cadeia produtiva. **História Econômica & História de Empresas**, v. 22, n. 1, 2019.

DANIEL O. **Erva-mate: sistema de produção e processamento industrial**. Dourados: UFGD/UEMS. 2009.

DANIEL, E. da S. **Aplicação de cobre, crescimento, morfogênese e nutrição mineral em gramíneas tropicais**. 2018. 109 f. Tese (Doutorado em Ciências do Solo) Universidade do Estado de Santa Catarina, Lages, 2018.

DARTORA, N. *et al.* Rhamnogalacturonan from *Ilex paraguariensis*: A potential adjuvant in sepsis treatment. **Carbohydrate Polymers**, v.92, n.2, p.1776-1782, 2013.

DAY, P. R. Particle fractionation and particle-size analysis. In: BLACK, C. A. (Ed.). **Methods of soil analysis**: physical and mineralogical properties including statistics of measurement and sampling, part 1. Madison: American Society of Agronomy, 1965. p. 545- 567.

DORS, P. **Teor de elementos em infusão de erva-mate em diferentes temperaturas**. 2017. 89 f. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) Universidade do Estado de Santa Catarina, Lages, 2017.

DUCAT, G.; QUINÁIA, S. P. Avaliação do teor de minerais da *Ilex paraguariensis* da região Centro-Oeste do Estado do Paraná. **RECEN - Revista Ciências Exatas e Naturais**, v. 6, n. 1, p. 31–42, 2009.

EMAMVERDIAN, A. *et al.* Heavy Metal Stress and Some Mechanisms of Plant Defense Response. **The Scientific World Journal**, v. 2015, p. 1-18, 2015.

EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Cultivo da Erva-mate**. 2014. Disponível em: <[https://www.spo.cnptia.embrapa.br/conteudo?p\\_p\\_id=conteudoportlet\\_WAR\\_sistemaasdeproducao6\\_1ga1ceportlet&p\\_p\\_lifecycle=0&p\\_p\\_state=normal&p\\_p\\_mode=view&p\\_p\\_col\\_id=column-1&p\\_p\\_col\\_count=1&p\\_r\\_p\\_-76293187\\_sistemaProducaoId=3601&p\\_r\\_p\\_-996514994\\_topicId=1305](https://www.spo.cnptia.embrapa.br/conteudo?p_p_id=conteudoportlet_WAR_sistemaasdeproducao6_1ga1ceportlet&p_p_lifecycle=0&p_p_state=normal&p_p_mode=view&p_p_col_id=column-1&p_p_col_count=1&p_r_p_-76293187_sistemaProducaoId=3601&p_r_p_-996514994_topicId=1305)>. Acesso em 25 jun 2022.

EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 5.ed. Brasília: Embrapa Solos, 2018. 355p.

EMBRAPA. **Cultivo da Erva-Mate**. 2023. Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/1155569/1/EmbrapaCultivoDaErva-Mate2014.pdf>. Acesso em: 21 set. 2023.

EPAGRI – Empresa de Pesquisa Agropecuária e Extensão Rural de Santa Catarina. Secretaria do Estado de Desenvolvimento Regional SDR – **Caracterização regional de Lages**. 2003. 36p.

ESTRELA, M. A. *et al.* Fitorremediação como solução para solos contaminados por metais pesados. **Revista Ceuma Perspectivas**, v. 31, p. 160-172, 2018.

EVANS, W. C. **Trease and Evan's Pharmacogony**. 14.ed. Londres: WB Saunders Company, 1998.

FACCIN C. **Variação na composição química de folhas de erva-mate (*Ilex paraguariensis*) em diferentes manejos e sua aplicabilidade em um produto alimentício**. 2014. (Dissertação de Mestrado em Biotecnologia) - Centro Universitário Univates. Lajeado, 2014.

FAO/WHO Expert Consultation on Human Vitamin and Mineral Requirements. Vitamin and mineral requirements in human nutrition: report of a joint FAO/WHO expert consultation. 2<sup>nd</sup> Ed. Bangkok: Food and Agriculture Organization of the United Nations; 2004.

FERLA, N. J. *et al.* **A cultura da erva-mate e os ácaros: situação atual e perspectivas.** Porto Alegre: Editora Evangraf, 2018.

FERREIRA, A. G *et al.* Proporção de sexo e polinização em *Ilex paraguariensis* St. Hil. **Brasil Florestal**, n. 53, p. 29-33, 1983

GAN, R. *et al.* Health Benefits of Bioactive Compounds from the Genus *Ilex*, a Source of Traditional Caffeinated Beverages. **Nutrients**, v. 10, n. 11, p. 1682, 2018.

GEE, G.; BAUDER, J. **Particle size analysis.** In: KLUTE, A. (Ed.). *Methods of Soil Analysis*. 2. ed. Madison: American Society of Agronomy, v. 1, p. 383–411, 1986.

GELSLEICHTER, S. D. **Absorção de zinco pela erva-mate (*Ilex paraguariensis*).** 2020. 36 f. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo), Universidade do Estado de Santa Catarina, Lages, 2020.

GELSLEICHTER, S. D. *et al.* Diagnose nutricional e índices fotossintéticos de erva-mate sob diferentes níveis de adubação com zinco. **Nativa**, v. 9, n. 5, p. 494-499, 2021.

GERHARDT, M. **História Ambiental da Erva-Mate.** 2013, 290 f. Tese (Doutorado em História) - Programa de Pós-Graduação em História, Centro de Filosofias e Ciências Humanas, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2013.

GICHNER, T. *et al.* Toxicity and DNA damage in tobacco and potato plants growing on soil polluted with heavy metals. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, v. 65, n. 3, p. 420-426, 2006.

GONÇALVES J. R. *et al.* Levels of nutrients and heavy metals in tarragon plants under different fertilizers. **Revista Ciência Agronômica**, v. 46, n. 2, p. 233–240, 2015.

GONÇALVES JUNIOR, A.C.; PESSOA, A.C.S. Fitodisponibilidade de Cádmio, Chumbo e Crômio, em soja cultivada em argilossolo vermelho eutrófico a partir de adubos comerciais. **Scientia Agrária**, v.3, n.1-2, p.19-23, 2002.

HASANUZZAMAN, M. *et al.* Adverse Effects of Cadmium on Plants and Possible Mitigation of Cadmium-Induced Phytotoxicity. In: HASANUZZAMAN, M.; FUJITA, M. **Cadmium: Characteristics, Sources of Exposure, Health and Environmental Effects.** Nova York: Nova Science Publishers, 2013.

HEINRICHS, R.; MALAVOLTA, Eurípedes. Composição mineral do produto comercial da erva-mate (*Ilex paraguariensis* St. Hil.). **Cienc. Rural**, Santa Maria, v. 31, n. 5, p. 781-785, 2001.

HENRIQUE. F. A. *et al.* Análise de mercado da erva-mate (*Ilex paraguariensis* St.Hill.)no Brasil. **Anais...** Congresso Brasileiro de Engenharia e Produção. Ponta Grossa: APREPRO. 2014.

HOFFMANN, D. M. **Determinação de cafeína, teobromina e ácido clorogênico em erva-mate por HPLC-DAD e UHPLC-MS/MS.** 2023. 35 f. TCC (Graduaçãoe em Química -Bacharelado), Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2023.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA, Sistema IBGE de Recuperação Automática – SIDRA. **Produção da extração vegetal e da silvicultura de 2021**. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/pr/pesquisa/16/12705?localidade1=42&localidade2=43&tipo=grafico> . Acesso em: 22 de agosto de 2023.

INSTITUTE OF MEDICINE. Dietary reference intakes; the essential guide to nutriente requirements. Washington (DC): National Academy Press; 2006.

JACQUES, R. A. *et al.* Influence of Agronomic Variables on the Macronutrient and Micronutrient Contents and Thermal Behavior of Mate Tea Leaves (*Ilex paraguariensis*). **Journal Of Agricultural And Food Chemistry**, v. 55, n. 18, p. 7510-7516, 2007.

JAIN, A. *et al.* Effects of Deficiency and Excess of Zinc on Morphophysiological Traits and Spatiotemporal Regulation of Zinc-Responsive Genes Reveal Incidence of Cross Talk between Micro- and Macronutrients. **Environmental Science & Technology**, v. 47, n. 10, p. 5327-5335, 2013.

JAIN, R. *et al.* Impact of excess zinc on growth parameters, cell division, nutrient accumulation, photosynthetic pigments and oxidative stress of sugarcane (*Saccharum spp.*). **Acta Physiologiae Plantarum**, v. 32, n. 5, p. 979-986, 2010.

JONES JR, J. B.; WOLF, B.; MILLS, H. A. **Plant Analysis Handbook**, Georgia, 1991.

KABATA-PENDIAS, A. **Trace Elements in Soils and Plants**. Boca Raton: CRC Press, p. 1-548, 2010.

KACHINSK, W. D.; VIDIGAL, J. C. B.; ÁVILA, F. W. Zinco no solo, na planta e a saúde humana: uma revisão. **Research, Society and Development**, v. 9, n. 7, p. 1-29, 2020.

KAUR, H. *et al.* Zinc toxicity in plants: a review. **Planta**, v. 253, n. 6, p. 1-28, 2021.

KAZNINA, N. M. Effect of Zinc Deficiency and Excess on the Growth and Photosynthesis of Winter Wheat. **Journal Of Stress Physiology & Biochemistry**, v. 13, n. 4, p. 88-94, 2017.

LAMEGO, F. P.; VIDAL, R. A. Fitorremediação: plantas como agentes de despoluição? **Revista de Ecotoxicologia e Meio Ambiente**, v. 17, p. 9-18, 2007.

LI, W. *et al.* Occurrence, accumulation, and risk assessment of trace metals in tea (*Camellia sinensis*): a national reconnaissance. **Science of the total environment**, v. 792, p. 148354, 2021.

LI, X. *et al.* Zinc induced phytotoxicity mechanism involved in root growth of *Triticum aestivum* L. **Ecotoxicology And Environmental Safety**, v. 86, p. 198-203, 2012.

LIEBSCH, D.; MIKICH, S. Fenologia reprodutiva de espécies vegetais da Floresta Ombrófila Mista do Paraná, Brasil. **Revista Brasileira de Botânica**, v. 32, n. 2, p. 375-391, 2009.

LIMA, V. F.; MERÇON, F. Metais Pesados no Ensino de Química. **Química Nova na Escola**, v. 33, n. 4, p. 199-205, 2011.

LIN, Y.; AARTS, M. G. M. The molecular mechanism of zinc and cadmium stress response in plants. **Cellular And Molecular Life Sciences**, v. 69, n. 19, p. 3187-3206, 2012.

LUO, L. *et al.* Phytoavailability, bioaccumulation, and human health risks of metal(loid) elements in an agroecosystem near a lead-zinc mine. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 25, n. 24, p. 24111-24124, 2018.

MACCARI JUNIOR, A.; MAZUCHOWSKI, K. Z. **Produtos alternativos e desenvolvimento da tecnologia industrial na cadeia produtiva e erva-mate.** Câmara Setorial Produtiva da Erva-Mate do Paraná. Curitiba: MCT/CNPq/PADCT, 2000.

MACHADO, L. N. *et al.* Análise de resíduos de produtos fitossanitários em erva-mate (*Ilex paraguariensis*) proveniente de áreas de sistema agroflorestal do Planalto Norte Catarinense. **Revista de La Facultad de Agronomía**, v. 119, n. 1, p. 1-8, 2020.

MAGRI, E. *et al.* Cadmium and lead concentrations in yerba mate leaves from agroforestry and plantation systems: an international survey in south america. **Journal of Food Composition and Analysis**, v. 96, p. 103702, 2021.

MAGRI, E. *et al.* Manganese hyperaccumulation capacity of *Ilex paraguariensis* A. St. Hil. and occurrence of interveinal chlorosis induced by transient toxicity. **Ecotoxicology And Environmental Safety**, v. 203, p. 1-8, 2020.

MALAVOLTA, Eurípedes. **Manual de Nutrição Mineral de Plantas.** São Paulo: Agronomica Ceres, 2006. 631 p.

MARENCO, R. A.; LOPES, N. F. **Fisiologia vegetal: fotossíntese, respiração, relações hídricas e nutrição mineral.** 3ªed. Editora UFV, Viçosa. 486p.

MARQUES, A. P. G. C.; RANGEL, A. O. S. S.; CASTRO, P. M. L. Remediation of Heavy Metal Contaminated Soils: phytoremediation as a potentially promising clean-up technology. **Critical Reviews in Environmental Science and Technology**, v. 39, n. 8, p. 622-654, 2009.

MARQUES, D. M. *et al.* Copper Toxicity on Photosynthetic Responses and Root Morphology of *Hymenaea courbaril* L. (Caesalpinioideae). **Water, Air, & Soil Pollution**, v. 229, n. 5, p. 1-14, 2018.

MARQUES, T. C. L. L. de S. e M.; MOREIRA, F. M. de S.; SIQUEIRA, J. O. Crescimento e teor de metais de mudas de espécies arbóreas cultivadas em solo contaminado com metais pesados. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 35, n. 1, p. 121-132, 2000.

MARSCHNER, H. Introduction, Definition, and Classification of Mineral Nutrients. In: MARSCHNER, H, **Mineral nutrition of higher plants.** Toronto: Academic Press, 1995. p. 04-05.

MARSCHNER, H. **Mineral Nutrition of Higher Plants**. London: Academic Press, 1986.

MARTINS-RAMOS, D. *et al.* Florística de Floresta Ombrófila Mista Altomontana e de Campos em Urupema, Santa Catarina, Brasil. **Revista Brasileira Biociências**, v. 9, n. 2, p. 156-166, 2011.

MAZUCHOWSKI, J. Z.; RUCKER, N. G. A. **Diagnóstico e alternativas para a erva-mate (*Ilex paraguariensis*)**. Curitiba: Secretaria de Estado da Agricultura e do Abastecimento, Departamento de Economia Rural, 1993.

MCCLAVE, S. A. *et al.* Guidelines for the Provision and Assessment of Nutrition Support Therapy in the Adult Critically Ill Patient. **Journal Of Parenteral And Enteral Nutrition**, v. 40, n. 2, p. 159-211, 2016.

MENDES, A. M. S.; SILVA, D. J.; PINTO FILHO, J. L. de. Acúmulo de metais pesados no solo e nas plantas após o uso de um resíduo de mineração como fertilizante para culturas anuais. **Anais... Reunião Brasileira de Fertilidade do Solo e Nutrição De Plantas**. Viçosa, MG: SBCS, 2010.

MEYERS, L. D.; HELLWIG, J. P.; OTTEN, J. J. **Dietary Reference Intakes: The Essential Guide to Nutrient Requirements**. Washington: The National Academies Press. 2006.

MILANI, R. F. *et al.* Investigation of twelve trace elements in herbal tea commercialized in Brazil. **Journal Of Trace Elements In Medicine And Biology**, v. 52, p. 111-117, 2019.

MOREIRA, Vanessa Ohana Gomes *et al.* Doses de zinco e de boro e efeitos nas trocas gasosas durante a fase vegetativa do milho. **Revista em Agronegócio e Meio Ambiente**, v. 14, n. 3, p. 1-14, 28 jun. 2021.

NEVES, M. M. *et al.* Application of Hot Water Extraction Techniques and the Principal Component Analysis to Study the Influence of Cultivation of Commercial Yerba Mate Samples on Their Mineral Profiles. **Food Analytical Methods**, v. 15, n. 11, p. 2940-2950, 2022.

NOGUEIRA, G. A. dos S. Trocas Gasosas, **Crescimento e Comportamento Bioquímico em Plantas Jovens de Paricá (*Schizolobium Amazonicum* Huber ex Ducke) em diferentes Concentrações de Cádmio**. 2018. 70 f. Tese (Doutorado em Ciências Florestais) - Universidade Federal Rural da Amazônia, Belém, 2018.

OLIVA, E. V. *et al.* Composição nutricional de procedências e progênies de erva-mate (*Ilex paraguariensis* St. Hil.) cultivadas em latossolo vermelho distrófico. **Ciência Florestal**, v. 24, n. 4, p. 793-805, 2014.

OLIVEIRA, Y. M. M.; ROTTA, E. Área de distribuição natural da erva-mate. **Anais... X Seminário sobre atualidades e perspectivas florestais: silvicultura da erva-mate**. Embrapa, Curitiba: Centro Nacional de Pesquisa de Florestas, p. 17-36. 1985.

PANDOLFO, C. M. *et al.* Resposta da erva-mate (*Ilex paraguariensis* St. Hil.) À adubação mineral e orgânica em um latossolo vermelho aluminoférrico. **Ciência Floresta**, v. 13, n. 2, p. 37-45, 2003.

PASSINATO, R. **Aspectos etnoentomológicos, socioeconômicos e ecológicos relacionados à cultura da erva-mate (*Ilex paraguariensis*) no município de Salto do Lontra, Paraná, Brasil.** Dissertação (Mestrado em Ecologia de Agroecossistemas) – Universidade de São Paulo, Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz. 112 p. 2003.

PEREIRA, A. A.; BORGES, J. D.; LEANDRO, W. M. Metais pesados e micronutrientes no solo e em folhas de *Brachiaria decumbens* às margens de rodovias. **Bioscience Journal**, v. 26, n. 3, p. 347-357, 2010.

PEREIRA, A. C. C. *et al.* Comportamento da *Cordia africana* Lam. cultivada em solo contaminado por metais pesados e tratado com materiais amenizantes. **Ciência Florestal**, v.23, p.329-336, 2013.

PEREIRA, B.F.F. *et al.* Cadmium availability and accumulation by lettuce and rice. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 35, p. 645-654, 2011

PIRES E. Z. *et al.* Biologia reprodutiva de erva-Mate (*Ilex paraguariensis* A. St. Hil.) em remanescente de Floresta Ombrófila Mista Altomontana. **Revista de Ciências Agroveterinárias**, v. 13, p. 171–180. 2014.

PIRES, D. A.de C. K. *et al.* A Erva-Mate no Planalto Norte Catarinense: os compostos bioativos como variável na determinação das especificidades necessárias ao reconhecimento como indicação geográfica. **Drd - Desenvolvimento Regional em Debate**, v. 6, n. 2, p. 207-227, 22 jul. 2016.

POLETTI, G. D. *et al.* Determinação de cádmio e chumbo em solos usados em plantações de erva-mate sem e com diferentes tipos de manejo na região Sul do país. **Revista Destaques Acadêmicos**, v. 6, n. 4, p. 59-65, 2014.

R CORE TEAM. **R: A language and environment for statistical computing.** R Foundation for Statistical Computing, Vienna, 2019.

REISSMANN, C. B.; RADOMSKI, M. I.; QUADROS, R. M. B. de. Chemical composition of *Ilex paraguariensis* St. Hil. under different management conditions in seven localities of Paraná State. **Brazilian Archives Of Biology And Technology**, v. 42, n. 2, 1999.

REITZ, R.; KLEIN, R. M.; REIS, A. **Projeto Madeira do Rio Grande do Sul.** Porto Alegre: Herbário Barbosa Rodrigues. 525p. 1988.

Romualdo, Liliane Maria. **Modos de aplicação de zinco no crescimento inicial de plantas de milho e de sorgo em casa de vegetação.** Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, 2008

ROSOLEM, C. A.; FRANCO, G. R. Translocação de zinco e crescimento radicular em milho. **R. Bras. Ci. Solo**, v. 24, n. 1, p. 807-814, 2000.

SAIDELLES, A. P. F. R. *et al.* Analysis of metals in commercial samples of erva-mate from South of Brazil. **Alim. Nutr. Braz. J. Food Nutr.** v. 21, n. 2, p. 259-265, 2010.

SAIDELLES, A.P.F., *et al.* Determinação de Cu, Ni e Zn por Icp-MS e infusões da erva-mate comercializadas nas regiões do Sul do Brasil. **Alim. Nutr. Braz. J. Food Nutr.** v. 24, n. 3, p. 283-289, 2013.

SANTIN, D.; BENEDETTI, L.; REISSMAN, C. B. Nutrição e recomendação de adubação e calcário para cultura da erva-mate. In: WENDLING, I.; SANTIN, D. **Propagação e nutrição de erva-mate**. Brasília: EMBRAPA, 2015.

SANTOS, F. D. dos *et al.* Fatores que afetam a disponibilidade de micronutrientes no solo. **Revista Tecno-Lógica**, v. 25, n. 2, p. 272-278, 2021.

SILVA, A. de S. da. **Capacidade de acúmulo de chumbo por *Ilex paraguariensis*** St. Hil. 2017. 69 f. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) - Universidade do Estado de Santa Catarina, Lages, 2017.

SILVA, A. de S. da *et al.* Physiological response of mate herb cultivated in lead contaminated soil: effects of exposure to the trace element. **Ciência e Técnica Vitivinícola**, v. 34, n. 3, p. 125-145, jan. 2019.

SILVA, L. T. M. de S. *et al.* Poluição do solo por metais pesados: uma revisão de literatura. **Anais... I CONIMAS e III CONIDIS**. Campina Grande: Realize Editora, 2019.

SILVA, R. F. da *et al.* Acumulação e translocação de zinco em mudas de espécies do gênero *Eucalyptus* e *Corymbia*. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 19, n. 11, p. 1114-1120, 2015.

SILVA, R. F. da *et al.* Crescimento e tolerância de mudas de *Enterolobium contortisiliquum* Vell. cultivadas em solo contaminado com zinco. **Ciência Florestal**, v. 28, n. 3, p. 979-986, 2018.

SILVA, S. M. da. **A ingestão em doses inadequadas de zinco afeta uma parcela significativa da população global**. 2016. 56 f. Dissertação (Mestrado em Nutrição), Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2016.

SOUTO, V. O. de; ALMEIDA, R. Silva de. **Características gerais, compostos bioativos e aplicação da erva-mate (*Ilex paraguariensis* A. St. Hill.): uma breve revisão**. Seridó: Agron Food Academy 2021.

SOUZA, A. K. R. *et al.* Poluição do ambiente por metais pesados e utilização de vegetais como bioindicadores. **Acta Biomedica Brasiliensia**, v. 9, n. 3, p. 95-106, 2018.

SOUZA, V. L. *et al.* Altered physiology, cell structure, and gene expression of *Theobroma cacao* seedlings subjected to Cu toxicity. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 21, n. 2, p. 1217-1230, 2013.

SOUZA, R.s.; CHAVES, L.H.G.; FERNANDES, J.D.. Adsorção de zinco e sua relação com características de solos do Estado da Paraíba. **Revista Brasileira de**

**Ciências Agrárias - Brazilian Journal Of Agricultural Sciences**, v. 1, n. 1, p. 1-6, 14 dez. 2006.

STANTON, C. *et al.* Zinc in plants: integrating homeostasis and biofortification. **Molecular Plant**, v. 15, n. 1, p. 65-85, 2022.

SUMAN, J. *et al.* Phytoextraction of Heavy Metals: a promising tool for clean-up of polluted environment? **Frontiers In Plant Science**, v. 9, n. 1, p. 1-35, 2018.

TAIZ, L. *et al.* **Fisiologia e desenvolvimento vegetal**. Porto Alegre. Artmed Editora, 2017.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Fisiologia vegetal**. Porto Alegre: Artmed. 2013.

TEDESCO, M. J. *et al.* **Análise de solo, plantas e outros materiais**. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul 1995. 118 p.

TITO, G. A. *et al.* Acúmulo e translocação de cobre e zinco em plantas de *Crambe abyssinica*. **Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável**, v. 11, n. 4, p. 12, 2016.

TRAPP, K. C. *et al.* Photosynthetic and growth parameters of *Pfaffia glomerata* in zinc dose cultivation. **Acta Biológica Catarinense**, v. 4, n. 8, p. 1-10, 2021.

ULBRICH, N. C. M. *et al.* Accumulation Capacity of Nickel and Zinc in Yerba Mate Cultivated in Soils with Contrasting Parent Materials. **Biological Trace Element Research**, p. 1-13, 2023.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY - USEPA. Method 3051A (SW-846): **Microwave Assisted Acid Digestion of Sediments, Sludges, and Oils, Revision 1**. Washington: United States Environmental Protection Agency, 2007.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY - USEPA. **The technical support document for land application of sewage sludge**. Washington: Office of Water, EPA 822/R-93- 001a and 001b, 1992.

VAILLANT, N. *et al.* Comparative study of responses in four *Datura* species to a zinc stress. **Chemosphere**, v. 59, n. 7, p. 1005-1013, 2005.

VALDUGA, A. T. *et al.* Analysis of the Presence of Toxic Metals in Yerba Mate Samples: a case study from south brazil. **Water, Air, & Soil Pollution**, v. 230, n. 7, 2019.

VALDUGA, E. *et al.* Caracterização química da folha de *Ilex paraguariensis* St. Hil. (erva-mate) e de outras espécies utilizadas na adulteração do mate. **Boletim do Centro de Pesquisa de Processamento de Alimentos**, v. 15, n. 1, p. 25-36, 1997.

VASQUEZ-TELLO, A.Y. *et al.* Electrolyte and Pi leakages and soluble sugar content as physiological tests for screening resistance to water stress in *Phaseolus* and *Vigna* species. **Journal of Experimental Botany**, v.41, p.827-832, 1990.

VESTENA, L. R.; SANTOS, E. R. Dinâmica têmporo-espacial da territorialização de produção da erva-mate (*Ilex paraguariensis*) no Brasil de 2008 a 2018. *Revista Franco-Brasileira de Geografia*, v. 55, e45469, 2022.

Zabini, A. V., Martinez, H. E. P., Finger, F. L., & Silva, C. A. (2007). Concentração de micronutrientes e características bioquímicas de progênies de cafeeiros (*Coffea arabica* L.) eficientes no uso de zinco. **Bioscience Journal**, 23(4), 95-103

YAN, A. *et al.* Phytoremediation: A Promising Approach for Revegetation of Heavy Metal-Polluted Land. **Frontiers In Plant Science**, v. 11, n. 1, p. 1-15, 2020.

YANG, Q.; LI, Z.; LU, X.; DUAN, Q.; HUANG, L.; BI, J. A review of soil heavy metal pollution from industrial and agricultural regions in China: pollution and risk assessment. **Science of the total environment**, v. 642, p. 690-700, 2018.