

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

ANNANDA GABRIELY MOURA DE SOUZA

CRESCIMENTO DE GRAMA MISSIONEIRA GIGANTE (*Axonopus catharinensis*) EM SOLO CONTENDO DOSES CRESCENTES DE COBRE

**LAGES
2024**

ANNANDA GABRIELY MOURA DE SOUZA

CRESCIMENTO DE GRAMA MISSIONEIRA GIGANTE (*Axonopus catharinensis*) EM SOLO CONTENDO DOSES CRESCENTES DE COBRE

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do título de mestre em Ciências Ambientais pelo Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais do Centro de Ciências Agroveterinárias – CAV, da Universidade do Estado de Santa Catarina – UDESC.
Orientadora: Profª. Drª. Mari Lucia Campos
Coorientador: Dr. David José Miquelluti

LAGES

2024

ANNANDA GABRIELY MOURA DE SOUZA

CRESCIMENTO DE GRAMA MISSIONEIRA GIGANTE (*Axonopus catharinensis*) EM SOLO CONTENDO DOSES CRESCENTES DE COBRE

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do título de mestre em Ciências Ambientais pelo Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais do Centro de Ciências Agroveterinárias – CAV, da Universidade do Estado de Santa Catarina – UDESC.
Orientadora: Prof^a. Dr^a. Mari Lucia Campos
Coorientador: Dr. David José Miquelluti

BANCA EXAMINADORA:

Orientadora: _____

Prof^a. Dr^a. Mari Lúcia Campos
(UDESC – Lages)

Membro interno: _____

Prof. Dr. Luiz Paulo Rauber
(UDESC – Lages)

Membro externo: _____

Dr. Eduardo da Silva Daniel
(EPAGRI)

Dedico este trabalho a meus pais Vânia Maria Moura de Souza e Antonio Maria de Souza, e ao meu companheiro Jonathan Carvalho Batista por sempre incentivarem e apoiarem meus estudos.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus e a todos que estiveram envolvidos nesta jornada acadêmica e contribuíram de alguma forma para ela.

Agradeço a minha orientadora Dr^a Mari Lucia Campos, pela sua paciência, pelos seus ensinamentos acadêmicos, pelos puxões de orelha, conselhos e por seu cuidado para comigo nos meus momentos mais difíceis, esta mulher além de uma ótima professora foi como uma mãe para mim.

Aos meus pais Vânia e Antonio, e irmãs Camilla e Isadora, sou eternamente grata pelo apoio, pelas orações e pelo incentivo aos meus estudos.

Ao meu companheiro Jonathan, agradeço por todo apoio e amor, por acreditar no meu potencial quando nem mesmo eu acreditei, pelo suporte incondicional e por estar do meu lado nas pequenas e grandes conquistas.

Aos meus colegas do mestrado, agradeço pelos momentos de lazer e compartilhamento de experiências. As minhas amigas do laboratório LLAA Luana, Natacha, Beatriz, Betel, Isa, Carol e Dani, sou muito grata a tudo que me ensinaram e pela grande amizade que levarei sempre comigo.

As minhas amigas de graduação e mestrado Jaqueline e Samille, sou grata pelo apoio e grande amizade, pois juntas conquistamos muitas coisas.

Sou grata a minha grande amiga Ana Paula, que mesmo distante sempre esteve presente me incentivando e torcendo por mim.

Agradeço aos professores pelos ensinamentos ao longo da pós-graduação, a UDESC pela oportunidade de ensino de qualidade e a bolsa de estudos proporcionado pela FAPESC, PROMOP e PRAFE pelo auxílio financeiro.

E por fim, sou grata a mim, pela coragem de embarcar nessa jornada de conhecimento e autodescobertas, por não desistir mesmo nos momentos mais difíceis e assim poder comemorar e me orgulhar por esta conquista.

“Quando acordei hoje de manhã, eu sabia quem eu era, mas acho que já mudei muitas vezes desde então.”

Alice no País das Maravilhas – Lewis Carroll (1865).

RESUMO

As gramíneas apresentam rápido crescimento, alta capacidade de perfilhamento e cobertura do solo, além da grande produção de biomassa. O conjunto destes atributos faz com que as gramíneas sejam apropriadas para a recuperação das áreas degradadas. Todavia, pouco se sabe a respeito do desempenho de gramíneas nativas, como a Gramma Missionária Gigante (*Axonopus catharinensis* Valls), em solos contaminados com elementos-traço. O objetivo do projeto foi avaliar o crescimento da grama missionária gigante em solos contendo doses crescentes de cobre e seu potencial de acúmulo de cobre nas raízes e parte aérea. Para tanto foi conduzido em casa de vegetação um experimento com grama missionária gigante cultivada em vasos com solo contaminado por doses crescentes de CuSO₄ em delineamento inteiramente casualizado. Foram avaliados, *in vivo*, o índice SPAD, após a colheita foram determinados o teor de CuSO₄ nas raízes e parte aérea. Os teores de CuSO₄ na parte aérea e raiz foram utilizados para calcular os fatores de translocação e bioconcentração do CuSO₄ nas plantas. Os dados foram tabulados e submetidos à análise de variância e de regressão, a 5% de significância, e à análise multivariada através do teste dos componentes principais (PCA) utilizando o software Minitab. A grama missionária gigante apresenta desempenho como fitoestabilizadora, uma vez que acumula altas quantidades de cobre nas raízes, sendo promissora para projetos de recuperação de áreas contaminadas com metal.

Palavras-chave: *Axonopus catharinensis* Valls; elementos-traço; fitorremediação, poluição do solo.

ABSTRACT

Grasses have rapid growth, high tillering capacity and soil coverage, in addition to high biomass production. All of these attributes make grasses suitable for the recovery of degraded areas. However, little is known about the performance of native grasses, such as Giant Mission Grass (*Axonopus catharinensis Valls*), in soils contaminated with trace elements. The objective of the project was to evaluate the growth of giant missionary grass in soils containing increasing doses of copper and its potential for copper accumulation in the roots and shoots. To this end, an experiment was conducted in a greenhouse with giant missionary grass grown in pots with soil contaminated by increasing doses of CuSO₄ in a completely randomized design. The SPAD index was evaluated in vivo and, after harvest, the CuSO₄ content in the roots and shoots was determined. The CuSO₄ contents in the shoot and root were used to calculate the translocation and bioconcentration factors of CuSO₄ in plants. The data were tabulated and subjected to analysis of variance and regression, at 5% significance, and to multivariate analysis using the principal components test (PCA) using Minitab software. Giant missionary grass performs as a phytostabilizer, as it accumulates high amounts of copper in the roots, making it promising for reclaim projects in areas contaminated with metal.

Keywords: *Axonopus catharinensis Valls*; copper; soil assessment; mineral nutrition.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Incubação do solo com calcário realizado através do método de calagem (A). Incubação do solo com sulfato de cobre: (CuSO₄) (B, C, D).

Figura 2 – Vasos dos tratamentos T1 ao T4 contendo as doses de cobre 0, 60, 120, 160 mg kg⁻¹ (A). Vasos dos tratamentos T5 ao T7 contendo as doses de cobre 200, 240 e 300 mg kg⁻¹ (B).

Figura 3 – Componentes observados na autoanálise da matriz de correlação.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Valores médios de índice SPAD, número de perfilhos, peso fresco e seco da parte área, teor médio e acúmulo de cobre na parte aérea de grama missioneira gigante cultivada em solo contaminado com doses crescentes de cobre.

Tabela 2 – Autoanálise da matriz de correlação.

Tabela 3 – Autovetores das variáveis dos componentes 1 e 2.

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Teores médios de cobre na raiz da grama missioneira gigante cultivada em solos contaminados com doses crescentes de cobre.

Gráfico 2 – Fator de translocação do cobre em plantas de grama missioneira cultivadas em solos contaminados com doses crescentes de cobre.

Gráfico 3 – Fator de bioconcentração de cobre em grama missioneira gigante cultivada em solo contaminado com doses crescentes de cobre.

LISTA DE ABREVIATURAS

CAV – Ciências Agroveterinárias

CONAMA – Conselho Nacional de Meio Ambiente

EPAGRI – Empresa de Pesquisa Agropecuária e Extensão Rural de Santa Catarina

FB – Fator de bioconcentração

FT – Fator de translocação

MOS – Matéria orgânica do solo

MS – Massa seca

NIST – National Institute of Standards and Technology

NPK – Nitrogênio, fósforo e potássio

P – Fósforo

PA – Parte área

PCA – Principal component analysis

pH – Potencial hidrogeniônico

PPGCAMB – Programa de pós-graduação em Ciências Ambientais

SMP – Método Shoemaker, Maclean e Pratt

UDESC – Universidade do Estado de Santa Catarina

USEPA – United States Environmental Protection Agency

LISTA DE ELEMENTOS E SUBSTÂNCIAS QUÍMICAS

Al – Alumínio
Ca – Cálcio
Cd – Cádmio
Cu – Cobre
 CuSO_4 – Sulfato de Cobre
Fe – Ferro
K – Potássio
Mg – Magnésio
Mn – Manganês
Pb - Chumbo
Zn – Zinco

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO -----	16
2 OBJETIVO -----	18
2.1 Geral -----	18
2.2 Específicos -----	18
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA -----	19
3.1 Cobre no solo -----	19
3.2 Cobre nas plantas -----	20
3.3 Fitorremediação -----	22
3.4 Gramíneas -----	23
3.5 <i>Axonopus cathartensis Valls</i> -----	24
4 MATERIAL E MÉTODOS -----	26
4.1 Local de estudo e delineamento experimental -----	26
4.2 Solo e Contaminação -----	26
4.3 Plantas -----	27
4.4 Avaliações <i>In Vivo</i> -----	27
4.4 Avaliações pós-colheita -----	29
4.5 Fator de translocação e bioconcentração de cobre -----	29
4.6 Análise de dados -----	30
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO -----	31
6 CONCLUSÃO -----	36
7 CONSIDERAÇÕES FINAIS -----	36
REFERÊNCIAS -----	37

APRESENTAÇÃO

A construção dessa dissertação iniciou a partir de uma investigação a respeito de uma gramínea nativa da região de Santa Catarina e sua utilidade como ferramenta de fitorremediação. Esta seria a primeira vez que trabalharia em conjunto com plantas e solo, já que na graduação do curso de Biologia trabalhei grande parte com temas educacionais e animais. Ao longo da minha formação na graduação sempre busquei compreender o que era a biologia, como estava inserida na minha vida e como poderia ensiná-la para as outras pessoas. Na minha trajetória na pós-graduação consegui ampliar os horizontes e me aprofundar em diferentes assuntos, trabalhar com o solo e planta foi desafiador, precisei aprender muitas coisas, tive muitos questionamentos, enfrentei muitos desafios e algumas coisas não ocorreram como o esperado, mas não as enxergo como uma falha, além disso a orientação que recebi foram de suma importância para a construção dessa dissertação, experimentos e resultados obtidos. Tive muitos momentos desafiadores como quando precisei refazer todo o processo de adaptação e transplantação das gramíneas, repetir experimentos e análises, dificuldades para desenvolver a parte escrita em alguns momentos, horas e horas de estudos e problemas pessoais, físicos e psicológicos que afetaram o andamento da pesquisa. Foram muitos altos e baixos, mas que valeram a pena e que me fortaleceram para que esta dissertação ficasse pronta e que os resultados fossem apresentados. Através desse curto relato sobre a trajetória de construção da minha pesquisa, quero dizer que o meio acadêmico é desafiador, desenvolver e completar uma pesquisa é trabalhosa e muitas vezes difícil, mas não impossível e como meus amigos do laboratório e minha orientadora sempre diz “um resultado é sempre um resultado, seja bom ou ruim”.

1 INTRODUÇÃO

O desenvolvimento agrícola tem ligação direta com os problemas ambientais, isso porque tanto a geração quanto o descarte de resíduos contendo elementos tóxicos acabam contribuindo para a contaminação do solo, principalmente quando há práticas agrícolas inadequadas no uso de fertilizantes, fungicidas e corretivos, levando ao excesso de elementos-traço acumulados no solo (Fonseca; Joris, 2012).

Com o aumento das atividades industriais e de mineração, muitos metais pesados são utilizados e liberados no ambiente em forma de resíduos. Em razão disso, o solo acaba retendo esses poluentes, gerando um aumento no teor de metais resultando em problemas ambientais (Madeira et al., 2021).

O estado de Santa Catarina possui grande volume de atividades dentro da viticultura, mineração e suinocultura, gerando áreas contaminadas com cobre, tais como a aplicação de fungicidas, como a calda bordalesa, a liberação de resíduos de mineração e a produção de resíduos orgânicos como o esterco animal (Gasparin, 2023).

Em concentrações adequadas, o cobre tem função importante no crescimento das plantas, por ser um micronutriente, porém em excesso pode interferir negativamente em todas as fases do ciclo de vida das plantas (Zórtea et al., 2016).

Assim, uma das ferramentas indicadas na recuperação de áreas contaminadas com elementos-traço é a fitorremediação, que utiliza plantas tolerantes, já que estas possuem a capacidade de remover do solo ou acumular estes poluentes em seus tecidos (Midhat et al., 2019).

Além disso, as plantas melhoram a fertilidade do solo visto que elevam a quantidade de matéria orgânica no solo. Desta maneira, as espécies gramíneas têm destaque na fitorremediação, tendo em vista seu rápido crescimento, grande sistema radicular e elevada produção de massa seca (Rosniecek et al., 2020).

Em vista disso, alguns estudos científicos têm avaliado a germinação, o crescimento e desenvolvimento de espécies de gramíneas (Borges et al., 2016; Silveira et al., 2016; Daniel, 2018; Daniel et al., 2018a; Daniel et al., 2018b, Vassão, 2019; Rosniecek, et al., 2020; Santos et al., 2021).

Considerando o exposto, o presente estudo pretende avaliar o crescimento e a capacidade de acumular cobre em uma espécie de pastagem perene nativa da região

sul, a Grama Missionária Gigante (*Axonopus catharinensis* Valls), espécie difundida pela EPAGRI (Hanisch et al., 2022), e assim definir se essa possui potencial para fitorremediação como extratora de cobre. Logo, a hipótese assumida é que a gramínea forrageira *Axonopus catharinensis* Valls é fitoacumuladora de cobre, sendo uma espécie promissora para compor projetos de recuperação de áreas contaminadas com cobre no estado de Santa Catarina.

2 OBJETIVOS

2.1 Geral:

Avaliar *Axonopus catharinensis* Valls é uma gramínea promissora para fitoacumulação de cobre em solos contaminados pelo elemento-traço.

2.2 Específicos:

- a) Analisar o crescimento da grama missioneira gigante cultivada em solo contaminado com doses crescentes de cobre.
- b) Investigar o acúmulo de cobre em plantas de missioneira gigante cultivadas em solo contaminado com doses crescentes de cobre.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 COBRE NO SOLO

Identificado em 1930, o cobre é um dos elementos-traço mais abundantes da crosta terrestre com 60 mg kg^{-1} , ocupando o 25º lugar. Possui o símbolo Cu, pertence ao grupo IB da tabela periódica, número atômico 29 e massa atômica 63,5 (Pelozato, 2008).

Está amplamente distribuído na forma de sulfetos, cloretos, arsenitos e carbonatos na natureza, além disso pode ser encontrado em diversos compostos orgânicos e sais minerais na forma elementar e metálica (Pedrozzo; Lima, 2001).

Presente no solo na forma Cu^+ (cuprosa), Cu^{2+} (cúprica) e na forma metálica em alguns minerais, apresentando pH com maior disponibilidade entre as faixas 5,0 e 6,5 (Faria, 2019).

É um micronutriente pouco móvel no solo em vista da sua adsorção em coloides orgânicos e inorgânicos, podendo ficar retido por ácidos húmicos e fúlvicos quando presente na matéria orgânica, formando complexos que possuem um papel importante na fitodisponibilidade deste micronutriente (De Souza, 2012). Também, em solos ricos em matéria orgânica há maior associação de Cu^{+2} com material orgânico, uma vez que a matéria orgânica e a argila são componentes que auxiliam na retenção do cobre no solo (Pelozato, 2008).

O cobre tem uma redução na disponibilidade no solo em razão da alta interação que possui com a matéria orgânica e da adsorção na fase mineral do solo (Oliveira, 2019). Além disso, o Cu e o Zn em solos não contaminados são encontrados em grandes quantidades ligados a frações inorgânicas, sendo preso por ligações químicas e físicas (Girotto et al., 2010).

O aumento do cobre nos solos agrícolas advém de diversas fontes como, por exemplo, resíduos industriais, lodo de esgoto, defensivos agrícolas, fertilizantes e pode ser encontrado também em atividades de siderúrgicas e áreas de mineração (Kabata-Pendias, 2010).

A primeira utilização do sulfato de cobre (CuSO_4) como defensivo agrícola ocorreu na França na região de Bourdeaux em 1885, descoberta por Pierre Marie Alexis Millardet, um botânico francês, através de observações percebeu que o sulfato

de cobre era muito eficaz combatendo o míldio – *Plasmora viticola* (Mackie; Müller; Kandeler, 2012).

A Calda Bordalesa [CuSO₄.5H₂O + Ca(OH₂)] é constituída pela mistura da cal virgem e sulfato de cobre, é bastante utilizado como fungicida e bactericida dentro da vitivinicultura de forma preventiva no controle de doenças e propagação de pragas (Mazaro et al., 2013; Cipoleta;Silva;Lopes-Assad, 2019).

A grande incidência de doenças em videiras ocorre devido a umidade favorecido pelas chuvas da primavera e verão, variação de temperatura entre 20 °C e 25 °C, o que gera condições propícias aos esporos do míldio que podem germinar em temperaturas de 6 °C a 25 °C (Bueno et al., 2022).

O míldio (*Plasmora viticola*) é uma das doenças fúngicas que mais ocorrem nas videiras, afetando praticamente todo o seu ciclo produtivo causando destruição parcial ou total dos frutos, causando prejuízos a vitivinicultura (Menegaes, 2015).

Devido a isso, a calda bordalesa é aplicada aproximadamente dez vezes por ano, assim parte do produto que é pulverizado nas folhas se deposita no solo, o que gera o acúmulo do cobre nas camadas mais superficiais, causando toxidez nas plantas de cobertura (Gonçalves et al., 2020; Sonoda et al. 2019).

O teor do cobre pode afetar o processo de vinificação e qualidade da fermentação do vinho, isso porque concentrações superiores a 20 mg/L inibem o crescimento da *Saccharomyces cerevisiae* causando o retardamento da fermentação e redução na produção de álcool, além de ser prejudicial para o consumo (Sun et al., 2018).

Diversos estudos utilizam a aplicação de calcário e vermicompostagem como estratégias para minimizar a fitotoxicidade do cobre em videiras e no solo (Trentin et al., 2019), além disso, o uso das plantas de cobertura pode ser uma alternativa na redução de altos teores de cobre no solo (Ortega et al., 2022).

3.2 COBRE NAS PLANTAS

O cobre é encontrado no solo e em organismos vivos em baixas concentrações (< 0,1%) e alguns deles estão presentes em diversos processos do desenvolvimento dos seres vivos, sendo assim essenciais (Rosini, 2020).

O cobre é um elemento de fácil absorção por meio da difusão (Cu²⁺ e Cu-quelato) e possui uma baixa concentração nas plantas, de acordo com a espécie

cultivada, que varia de 5 a 20 mg kg⁻¹ de matéria seca. Absorvido através de processos ativos que fazem gasto de energia e movimentados nos tecidos de acordo com a sua concentração indo das folhas velhas para as novas e órgãos reprodutores (Bedin, 2018).

O cobre está presente em diversos processos fisiológicos das plantas, atuando na síntese da lignina, rotas metabólicas de produção de compostos de resistência contra patógenos, no metabolismo de proteínas e na fotossíntese, uma vez que ele age como um micronutriente nas plantas impedindo que organismos entrem nos tecidos vegetais, aumentando a resistência foliar (Taiz; Zeiger, 2017; Oliveira, 2019).

Inicialmente o cobre é absorvido pela superfície das raízes se ligando em sua parede celular por meio de reações não-iônicas de grupos contendo peroxidases e fosfatas, e em seguida é absorvido pela planta nas células radiculares através de transporte passivo ou ativo por meio de transportadores das famílias COPT/Ctr, ZIP ou co-transportadores (Printz et al., 2016). Em seguida, o cobre é translocado para a parte área através do xilema e floema, que os transporta pela via apoplástica que acontece por espaços intercelulares e simplástica por meio da membrana plasmática (Marschner, 2012).

Apesar de essencial por ser um micronutriente, o excesso de cobre pode ser tóxico e causar estresse nas plantas, deixando-as em estado de tensão causando mudanças negativas no crescimento, desenvolvimento e produtividade (Ambrosini et al., 2016).

Além disso, esse estresse que ocorre irá depender da intensidade e duração em que a planta estará exposta ao cobre, isso pode ocorrer pela deficiência de elementos essenciais ou por toxidez de elementos essenciais e não essenciais quando se tem um alto ou baixo teor de cobre, além da sensibilidade da planta. Quando isto acontece a planta reduz seu crescimento e em situações mais severas ela entra em esgotamento e consequentemente morre (Shinozaki et al., 2015).

Quando em baixas quantidades nas plantas, causa deficiência que afetam órgãos reprodutivos e folhagens novas, mas quando em altas concentrações, se torna nocivo causando necrose, clorose e inibindo o crescimento vegetal (Costa Primo; Menezes; Sampaio, 2015). O excesso de cobre aumenta a síntese de proteínas e enzimas que fazem parte da defesa a danos oxidativos, fotoinibição e transporte de

elétrons da fotossíntese, além de danificar a estrutura da raiz reduzindo na absorção de nutrientes minerais do solo e água (Yang et al., 2011).

A toxicidade do cobre na parte aérea é evidenciada de várias maneiras, tais como a redução do comprimento das folhas e caule, diminuição da área foliar e do número de folhas e o aparecimento de cloroses. Além disso, a planta também pode apresentar necrose, engrossamento e redução do comprimento da raiz, inibição na formação de raízes secundárias e encarquilhamento, que são sintomas da fitotoxicidade (Adrees et al., 2015). Quando isso ocorre, a planta imobiliza esse excesso de cobre utilizando um mecanismo que faz o sequestro e quelação (Lange et al., 2016). Logo, as plantas devem manter um equilíbrio entre seus nutrientes e uma quantidade adequada de cobre nas células para que tenham um bom desenvolvimento (Kabata-Pendias, 2010).

Assim, mesmo o cobre sendo essencial aos seres vivos por seu papel nos processos fisiológicos e metabólicos, gera preocupações devido ao seu efeito de toxicidade quando em grande escala no meio ambiente, trazendo efeitos negativos nos animais e nas plantas (Pichhode; Nikhil, 2015).

Nesse sentido, alguns estudos realizados com gramíneas em solos contendo cobre para avaliar seu crescimento, tolerância e outros fatores são muito difundidos, como por exemplo o estudo realizado por Rosniecek et al. (2020) para avaliar a germinação e a tolerância de espécies de forrageira (*Brachiaria humidicola* cv Tupi, *Panicum maximum* cultivares Aruana e Tanzânia) na presença de Cu, Cd e Pb mostrou que o cobre inibiu a germinação e emissão das raízes e parte aérea da *Panicum maximum*, assim como afetou o índice de vigor das demais forrageiras.

O trabalho realizado por Borges et al. (2016) avaliou a germinação e desenvolvimento das gramíneas *Brachiaria Brizantha* e *Brachiaria decumbens* na presença de Cu, Cd e Pb, assim como os teores desses elementos no tecido vegetal, mostrando que o cobre foi o maior causador de efeitos tóxicos nas forrageiras e que os maiores teores de cobre e Cd estavam presentes nas raízes das plantas.

3.3 FITORREMEDIAÇÃO

A fitorremediação é uma técnica que se baseia no uso de plantas para estabilizar, remover ou amenizar poluentes presentes na água e no solo. É mais sustentável e de baixo custo, sendo uma alternativa mais viável para a remediação de

ambientes contaminados por metais pesados (Estrela; Chaves; Silva, 2018; Silva, 2012).

O processo realizado pelas plantas altera a forma química e física dos poluentes, convertendo-os em elementos, depois absorvidos e retidos nas plantas. Dessa forma, eles são degradados ou acumulados em seus tecidos vegetais (Marcatto; Souza; Fontanetti, 2020).

Além disso, essa técnica é bastante indicada como tratamento inicial devido ao seu custo-benefício, sustentabilidade, não requerer grandes estruturas e utilizar uma tecnologia relativamente simples (Oliveira; Oliveira, 2021).

Dito isto, essa técnica de remediação de solos traz diversos benefícios, visto que muitas espécies de plantas possuem a capacidade de acumular inúmeros poluentes em seus tecidos (Wang et al., 2017). A fitorremediação apresenta baixo custo e rápido tempo de remediação, o que pode ser benéfico para aplicação quando comparado aos métodos convencionais de remediação. Embora a fitorremediação nem sempre gere retornos financeiros, esta técnica garante sustentabilidade na reabilitação ambiental (Silva et al., 2023).

Algumas técnicas que mais se destacam são a fitovolatização, a qual a planta absorve poluentes através do xilema, transformando o contaminante e deixando menos tóxico para em seguida liberá-los na atmosfera (Awa; Hadibarata, 2020);

A fitoextração acontece quando a planta absorve contaminantes através das raízes, transportando e acumulando em seus tecidos acima do solo (folhas). E a fitoestabilização consiste na acumulação dos metais nas raízes das plantas, reduzindo a biodisponibilidade dos poluentes limitando a mobilidade dos metais no solo (Silva, 2015).

3.4 GRAMÍNEAS

As gramíneas vêm da família Gramineae e compreendem cerca de 650 gêneros e 10.000 espécies distribuídas pelo mundo. Elas possuem sistema radicular fasciculado, algumas tem rizomas e/ou estolões, sua produção de sementes pode ser tanto assexuada quanto sexuada, além disso algumas gramíneas não formam sementes e sim segmentos dos colmos (Pereira, 2006).

Ademais, elas são um grupo evoluído e diversificado, com ótimo desempenho fotossintético em várias condições que as fazem apropriadas para a recomposição de áreas degradadas, auxiliando na revitalização, recuperação e proteção do solo apresentando crescimento acelerado, grande capacidade de perfilhamento, alta produção de biomassa, sistema radicular realizando suporte mecânico para o solo (Daniel, 2018).

Elas são bastante recomendadas em processos de recuperação de áreas degradadas, devido ao seu desempenho na cobertura do solo. Uma espécie bastante utilizada são as braquiárias por serem perenes, terem boa adaptabilidade, resistência, boa produção de biomassa e rápido crescimento (Silveira et al., 2016).

Plantas que tem essa capacidade de manter o equilíbrio bem desenvolvida são as gramíneas, exercendo um papel importante na recuperação e proteção do solo, pois produzem estolões e rizomas, além de possuírem um sistema radicular fasciculado que as permite ter um rápido crescimento, alta capacidade de perfilhamento, boa cobertura do solo e grande produção de biomassa, porém algumas espécies podem responder de formas diferentes de acordo com o seu grau de sensibilidade a elementos-traço, principalmente o cobre mesmo em condições idênticas (Daniel, 2018).

Há diversos estudos utilizando gramíneas em solos contaminados por elementos-traço, como o realizado por Daniel (2018) para avaliar os efeitos da toxicidade do cobre em gramíneas forrageiras das espécies *Brachiaria brizantha*, *Brachiaria humidicola*, *Axonopus catharinensis*, *Hemarthria altissima*, *Paspalum notatum*, plantas de *Cynodon dactylon* e plantas de *Panicum maximum*; assim como o realizado por Borges et al., (2016) para verificar os efeitos do cobre no solo em espécies de *Brachiaria brizantha* e *Brachiaria decumbens*, e também por Vassão (2019), utilizando gramíneas Poaceae para avaliar seu potencial fitorremediador em solos contaminados por herbicidas.

3.5 *Axonopus catharinensis* Valls

Em 1986 numa coleta de germoplasma, foi identificada pela EPAGRI – Empresa de Pesquisa Agropecuária e Extensão Rural de Santa Catarina, em Itajaí, uma gramínea: a grama missioneira-gigante que tem por nome científico *Axonopus catharinensis* Valls (Dal Pizzol, 2016). Uma espécie nativa da região sul do Brasil que

apresenta grande adaptação em sistemas de produção intensiva nas regiões subtropicais (Hanisch, et. al., 2016).

Essa espécie é um híbrido triploide advinda do cruzamento natural de duas variedades nomeadas de *Axonopus Scoparius* (gramão) e a *Axonopus Jesuiticus* (grama missioneira) (Miranda et al., 2012) é uma forrageira perene tropical que possui boa adaptação, produtividade e persistência nos ambientes sombreados, além de boa capacidade de associação a leguminosas (Krahl, et. al., 2021).

A missioneira gigante tem a presença de estolões e alta predominância de folhas, alta palatabilidade, grande resistência à cigarrinha-das-pastagens (*Deois flavopicta*) e adaptação a níveis moderados em sistemas de sombreamento, além de suportar temperaturas mais frias (Hanisch et al., 2022; Krahl et al., 2021).

Essa forrageira possui ótimo potencial produtivo, boa concentração de produção no outono-inverno, tolerante ao frio, resistente a pragas como a cigarrinha-das-pastagens, variabilidade de hábito de crescimento, acúmulo de matéria seca, é uma planta estolonífera e de alocação significativa de estolões e matéria seca em raízes (Hanisch et al., 2012; Chiaradia; Miranda; Fedatto, 2013; Krahl, 2020).

Em adição a isso, é bastante utilizada em sistemas silvipastoris por ser bem aceita pelos animais, pelo seu desempenho produtivo em ambientes sombreados, além de boa adaptabilidade em sistemas de intensivos de produção nas regiões subtropicais (Hanisch, et al., 2016; Sbrissia et al., 2017).

Estudos sobre exposição ao Cd (Daniel, et al. 2018a) e ao Cu (Daniel, 2018) em solução nutritiva indicaram que a grama missioneira gigante possui potencial para uso em projetos de fitorremediação de solos de áreas contaminadas com os metais citados. Esses autores observaram que a exposição ao Cd e ao Cu altera a morfogênese vegetal sem que haja redução da produção de massa seca da parte aérea, sendo que a planta pode ser indicada para estudos relacionados à acumulação de Cd e Cu.