



UNIVERSIDADE FEDERAL DO ACRE
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA,
INOVAÇÃO E TECNOLOGIA PARA A AMAZÔNIA - CITA



**CRESCIMENTO DO AÇAÍ SOLTEIRO (*Euterpe precatoria*
Mart.) EM SUBSTRATOS COM DIFERENTES NÍVEIS DE
CÁDMIO E MATÉRIA ORGÂNICA**

THIAGO ALVES DA SILVA

RIO BRANCO, AC
Fevereiro/2022

THIAGO ALVES DA SILVA

**CRESCIMENTO DO AÇAÍ SOLTEIRO (*Euterpe precatoria*
Mart.) EM SUBSTRATOS COM DIFERENTES NÍVEIS DE
CÁDMIO E MATÉRIA ORGÂNICA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Ciência, Inovação e Tecnologia para a Amazônia, da Universidade Federal do Acre, como requisito parcial para obtenção do grau de **Mestre em Ciência, Inovação e Tecnologia para a Amazônia**.

Orientadora: Dra. BERENICE KUSSUMOTO DE ALCÂNTARA DA SILVA

RIO BRANCO, AC
Fevereiro/2022

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Central da UFAC

S586m Silva, Thiago Alves da, 1994 -

Crescimento do açáí solteiro (*Euterpe precatoria* Mart.) em substratos com diferentes níveis de cádmio e matéria orgânica / Thiago Alves da Silva; orientador: Dr^a. Berenice Kussumoto de Alcântara da Silva. – 2023.

56 f.: il.; 30 cm.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Acre, Programa de Pós-graduação em Ciência Inovação e Tecnologia para a Amazônia, Rio Branco, 2023. Inclui referências bibliográficas.

1. Fitorremediação. 2. Palmeiras. 3. Metais pesados. I. Silva, Berenice Kussumoto de Alcântara da (orientador). II. Título.

CDD: 509

Bibliotecária: Nádia Batista Vieira CRB-11º/882.

UNIVERSIDADE FEDERAL DO ACRE
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA, INOVAÇÃO E TECNOLOGIA
PARA A AMAZÔNIA - CITA

**CRESCIMENTO DO AÇAÍ SOLTEIRO (*Euterpe precatoria*
Mart.) EM SUBSTRATOS COM DIFERENTES NÍVEIS DE
CÁDMIO E MATÉRIA ORGÂNICA**

THIAGO ALVES DA SILVA

DISSERTAÇÃO APROVADA EM: 28 DE FEVEREIRO DE 2023

Documento assinado digitalmente
 BERENICE KUSSUMOTO DE ALCANTARA D/
Data: 15/05/2023 16:59:01-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

DRA. BERENICE KUSSUMOTO DE ALCÂNTARA DA SILVA
UNIVERSIDADE FEDERAL DO ACRE

Documento assinado digitalmente
 FLAVIO HENRIQUE SILVEIRA RABELO
Data: 11/05/2023 13:29:31-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

DR. FLÁVIO HENRIQUE SILVEIRA RABÊLO
UNIVERSIDADE FEDERAL DE LAVRAS

Documento assinado digitalmente
 VANDERLEY BORGES DOS SANTOS
Data: 15/05/2023 13:02:57-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

DR. VANDERLEY BORGES DOS SANTOS
UNIVERSIDADE FEDERAL DO ACRE

Dedico a minha mamãe, Edilene Soares Alves,
por todo o amor, cuidado e incentivo durante essa
trajetória.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiro a Deus por ter me mantido na trilha certa durante este projeto de pesquisa com saúde e forças para chegar até o final.

À minha família. Minha mãe Edilene e meu pai Francisco, meu irmão Thalison e minha irmã Thayline. Que me proporcionaram um ótimo ambiente familiar para meu crescimento e desenvolvimento pessoal.

À Universidade Federal do Acre, que me trouxe inúmeros aprendizados e amizades para toda a vida. E ao programa de Pós-Graduação em Ciência, Inovação e Tecnologia para a Amazônia e seus professores por apoio e ensinamentos.

À professora Berenice Kussumoto, pela confiança, orientação e, principalmente pela oportunidade especial de trabalhar comigo nesta dissertação.

Aos meus colegas Raquel, Wendrio e Erlângela pelo grande apoio e parceria no período de coletas e acompanhamento da pesquisa.

Aos amigos e amigas que fiz nestes anos de mestrado, sem vocês este caminho não teria sido tão divertida como foi.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPQ e à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – CAPES, pelo apoio financeiro e pela bolsa de estudos.

*“We learn wisdom from failure much more than from success.
We often discover what will do, by finding out what will not do
and probably he who never made a mistake never made a
discovery.”*

Samuel Smiles

RESUMO

A preocupação com o meio ambiente tornou-se uma problemática mundial, de tal forma que estudos dos efeitos de contaminantes ambientais tem se tornado frequente. Dentre esses poluentes destaca-se o cádmio que é um dos elementos químicos mais danosos para a saúde humana, sendo capaz de acarretar doenças que vão desde neurológicas, surgimento de dermatoses até o desenvolvimento de cânceres em diferentes órgãos do corpo humano, mesmo em baixas concentrações. Interações entre a matéria orgânica e os metais pesados são descritas como troca iônica. A alta disponibilidade de metais no solo pode ser justificada pela concentração de matéria orgânica presente neste. O presente estudo teve como objetivo avaliar o comportamento de *Euterpe precatoria* cultivada em substratos com e sem matéria orgânica e contaminados por cádmio. Para a realização do experimento em casa de vegetação foi usado o delineamento experimental casualizado com 4 tratamentos e 5 repetições, sendo 2 plantas por repetição, totalizando 20 unidades experimentais. Em cada parcela experimental foram utilizados vasos com capacidade de aproximadamente 4 kg de solo com diferentes composições, onde, T1 – 30% Matéria Orgânica + 40% Areia + 30% Argila + Contaminante (Cd); T2 – 30% Matéria Orgânica + 40% Areia + 30% Argila; T3 – 55% Areia + 45% Argila + Contaminante (Cd) e T4 – 55% Areia + 45% Argila. Os substratos que levaram o Cd em sua composição foram incubados por oito dias. Após a incubação foram plantadas uma muda de *E. precatoria* em cada vaso. Aos 40 dias após o plantio, foram avaliadas massa seca, capacidade de *E. precatoria* acumular Cd em seus tecidos (raiz e parte aérea) e concentração de Cd no substrato após o plantio das mudas. Os resultados mostraram que a matéria orgânica influenciou significativamente a produção de massa seca da raiz e parte aérea de *E. precatoria* cultivada nos substratos que levaram matéria orgânica em sua composição. *E. precatoria* destacou-se por reduzir a concentração de Cd no solo, principalmente nas raízes, além de mostrar-se uma espécie tolerante ao contaminante, pois não apresentou sinais de toxicidade esperados. A espécie demonstrou ser uma espécie fitoestabilizadora em condições experimentais, além de que, curiosamente, observou-se o bom desempenho dessa espécie quando cultivada em substrato com Cd.

Palavras-chave: Fitorremediação; palmeiras; metais pesados; matéria orgânica.

ABSTRACT

The concern for the environment has become a worldwide problem, in such a way that studies of the effects of environmental contaminants have become frequent. Among these pollutants, cadmium stands out, which is one of the most harmful chemical elements for human health, being capable of causing diseases ranging from neurological, the appearance of dermatoses to the development of cancers in different organs of the human body, even at low concentrations. . Interactions between organic matter and heavy metals are described as ion exchange. The high availability of metals in the soil can be explained by the concentration of organic matter present in it. The present study aimed to evaluate the behavior of *Euterpe precatoria* cultivated in substrates with and without organic matter and contaminated by cadmium. To carry out the experiment in a greenhouse, a randomized experimental design was used with 4 treatments and 5 replications, with 2 plants per replication, totaling 20 experimental units. In each experimental plot, vases with a capacity of approximately 4 kg of soil with different compositions were used, where, T1 – 30% Organic Matter + 40% Sand + 30% Clay + Contaminant (Cd); T2 – 30% Organic Matter + 40% Sand + 30% Clay; T3 – 55% Sand + 45% Clay + Contaminant (Cd) and T4 – 55% Sand + 45% Clay. Substrates containing Cd in their composition were incubated for eight days. After incubation, one seedling of *E. precatoria* was planted in each pot. At 40 days after planting, dry mass, ability of *E. precatoria* to accumulate Cd in its tissues (root and shoot) and concentration of Cd in the substrate after seedling planting were evaluated. The results showed that organic matter significantly influenced the production of root and shoot dry mass of *E. precatoria* cultivated in substrates that had organic matter in their composition. *E. precatoria* stood out for reducing the concentration of Cd in the soil, mainly in the roots, in addition to being a species tolerant to the contaminant, as it did not show the expected signs of toxicity. The species proved to be a phytostabilizing species under experimental conditions, and, curiously, the good performance of this species was observed when cultivated in substrate with Cd.

Keywords: Phytoremediation; palm trees; heavy metals; organic matter.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. A - Planta de <i>E. precatoria</i> ; B - Cacho de açaí solteiro (<i>E. precatoria</i>); C - Polpa extraída do fruto do açaí; D - Artesanato produzido da palha do açaí; E - Frutos de <i>E. precatoria</i> . Fonte: Marcus Vasconcelos.....	26
Figura 2. Localização da área onde o estudo foi conduzido, Rio Branco, Acre Brasil.....	28
Figura 3. Homogeneização do substrato peneirado (areia, argila e matéria orgânica).....	29
Figura 4. A - Pesagem do cloreto de cádmio; B - Preparo da solução contendo cádmio para contaminação do substrato.....	30
Figura 5. Pesagem das amostras de substrato para análises químicas.....	30
Figura 6. A - Muda de <i>E. precatoria</i> retirada do tubete para plantio; B - 40 unidades experimentais de mudas de <i>E. precatoria</i> dos 4 tratamentos dispostos em casa de vegetação.	31
Figura 7. Amostras de raiz e parte aérea de <i>E. precatoria</i> lavadas e seccionadas por compartimento.....	32
Figura 8. A - Amostras de raiz e B - parte aérea de <i>E. precatoria</i> secas em estufa de circulação de ar e pesadas em balança analítica de precisão.	33
Figura 9. Comparação dos tratamentos com cádmio e com matéria orgânica. Letras minúsculas diferentes significam diferenças estatísticas entre os tratamentos com e sem cádmio e letras maiúsculas diferentes significam diferenças estatísticas entre os tratamentos com matéria orgânica. ($P \leq 0,05$).	37

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Valores orientadores para solo (mg kg^{-1}).....	21
Tabela 2. Propriedades químicas do substrato de cada tratamento adotado no experimento..	31
Tabela 3. Valores médios de massa seca bruta e incremento de massa seca nos tecidos raiz e parte aérea de <i>E. precatoria</i> após 40 dias de cultivo em casa de vegetação.	35
Tabela 4. Concentração de Cd em diferentes tecidos (raiz e parte aérea) de <i>E. precatoria</i> após 40 dias de plantio em casa de vegetação.	39
Tabela 5. Concentração de Cd em diferentes tecidos (raiz e parte aérea), Fator de Bioacumulação e Fator de Translocação do metal após 40 dias de plantio de <i>E. precatoria</i> em casa de vegetação.....	42
Tabela 6. Propriedades químicas do solo de cada tratamento adotado no experimento após 40 dias de cultivo de <i>E. precatoria</i> em casa de vegetação.	43

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

% – Porcentagem

μmol – Micromol

cmol_c – Centimol de Carga

°C – Grau Celsius

APmax – Tecnologia em Agropecuária Rural e Urbana

As – Arsênio

Cd – Cádmio

CdCl₂.H₂O – Cloreto de Cádmio Puríssimo

CETESB – Companhia Ambiental do Estado de São Paulo

Co – Cobalto

CONAMA – Conselho Nacional do Meio Ambiente

Cr – Cromio

CTC – Capacidade de Troca Catiônica

Cu – Cobre

DIC – Delineamento Inteiramente Casualizado

EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária

FB – Fator de Bioacumulação

Fe – Ferro

FT – Fator de Translocação

FUNTAC – Fundação de Tecnologia do Estado do Acre

g – Grama

g/cm – Gramas por Centímetro

Hg – Mercúrio

Kg – Quilograma

LABRAS – Laboratório Brasileira de Análises Ambientais e Agrícolas

mg – Miligrama

Mn – Manganês

Mo – Molibdênio

N – Nitrogênio

Ni – Níquel

Pb – Chumbo

pH – Potencial Hidrogeniônico

Pu – Plutônio

Sb – Antimônio

Sbn – Solução Baseada na Natureza

Sr – Estrôncio

t - Capacidade de Troca Catiônica Efetiva

T1 – Tratamento Um

T2 – Tratamento Dois

T3 – Tratamento Quatro

T4 – Tratamento Quatro

Ti – Titânio

V – Vanádio

VI – Valor de Intervenção

VP – Valor de Preservação

VRQ – Valor de Referência de Qualidade

Zn – Zinco

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	14
2. REVISÃO DA LITERATURA.....	17
2.1 Solo.....	17
2.2 Metais pesados.....	18
2.3 Efeito do cádmio em plantas	19
2.4 Legislação ambiental	21
2.5 Remediação de solos contaminados por metais pesados.....	22
2.6 Fitorremediação.....	22
2.7 Mecanismos de fitorremediação.....	24
2.8 Açáí (<i>Euterpe precatoria</i> Mart.).....	25
3. OBJETIVOS.....	27
3.1 Geral	27
3.2 Específicos.....	27
4. MATERIAL E MÉTODOS	28
4.1 Área experimental.....	28
4.2 Delineamento e instalação do experimento	28
4.3 Determinação dos tratamentos.....	29
4.4 Determinação da massa seca	32
4.5 Análise química do tecido vegetal e análise estatística	33
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	35
5.2 Produção de massa seca das mudas de <i>Euterpe precatoria</i>	35
5.3 Potencial fitorremediador de <i>E. precatoria</i>	38
5.4 Concentração de Cd no solo após o período de plantio.....	43
6. CONSIDERAÇÕES FINAIS	46
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	47

1. INTRODUÇÃO

A contaminação do solo, desde a Revolução Industrial, vem sendo uma das grandes preocupações ambientais para muitos pesquisadores e para a sociedade. Destacado como um recurso natural base da vida nos ecossistemas terrestres, junto com a água, o ar e a luz solar, o solo detém uma grande variedade de organismos e microrganismos que desempenham funções essenciais dentro dos ecossistemas. Mediante a isso, pesquisadores tem dado ênfase em estudos que avaliam o desempenho das plantas sob estresse por contaminantes, bem como estudos para a remediação e revitalização de solos contaminados por substâncias nocivas aos seres vivos.

Dentre os diferentes tipos de contaminação, têm-se a grande problemática dos metais pesados, em razão das atividades industriais, agrícolas ou descarte indevido de resíduos sólidos. O termo metal pesado é aplicado na literatura a um grupo de elementos químicos com densidade superior a $4,0 \text{ g/cm}^3$ e peso atômico entre 63,546 e 200,590 (CONCIANI, 2016). Podem ser encontrados naturalmente no solo em baixas concentrações, como resultado de processos pedogenéticos ou proveniente de atividades antrópicas (KEDE et al., 2008).

Embora alguns metais sejam nutrientes essenciais, constituintes de enzimas (Mn, Fe, Cu, Zn, e Mo), os mesmos são considerados importantes para atividades enzimáticas, porém em quantidades excessivas se tornam danosos ou até mesmo letais (ZHUANG, 2009). A problemática ambiental surge quando resíduos, em sua maioria industriais, acabam contaminando ambientes e afetando a saúde humana. Ao entrar na cadeia alimentar, mesmo em baixas concentrações, e serem absorvidos pelo organismo, os metais pesados podem acarretar sérios problemas crônicos ao organismo (CHAVES, 2008).

A contaminação ambiental por cádmio, nos últimos anos, tem aumentado de forma expressiva em virtude de ações antrópicas (GALLEGO et al., 2012). Atividades como mineração, fundição, emprego de fertilizantes químicos, descarte de baterias e resíduos estão entre as principais atividades que geram a contaminação por esse metal pesado (FENG, et al., 2010; CHOU et al., 2011). O cádmio é um dos contaminantes mais preocupantes e pode afetar diferentes processos no metabolismo das plantas (DOURADO et al., 2014).

O cádmio é conhecido por inibir a germinação de sementes e o crescimento de raízes, induzir alterações nos cromossomos e a formação de micronúcleos (FOJTOVÁ e KOVARIK, 2000). Pode causar despolarização da membrana citoplasmática e acidificação, levando ao rompimento da homeostase celular (GRATÃO et al., 2005; GALEGO et al., 2012). Quando em contato com o organismo humano, este metal pode acarretar doenças que vão desde

neurológicas, surgimento de dermatoses até o desenvolvimento de cânceres em diferentes órgãos do corpo humano (MOSCHEM e GONÇALVEZ, 2020)

Várias técnicas podem ser usadas para remediar metais pesados em solos, sendo as mais usuais: precipitação, incineração e processos eletroquímicos. Todas estas pautadas em princípios *in situ* e *ex situ*. Tratando-se de solos contaminados, remediar o solo *in situ* dispõe uma grande vantagem, pois nessa modalidade não se faz necessário realizar grandes transportes do solo contaminado, uma vez que o problema pode ser resolvido no local da contaminação (CHAVES, 2008).

A fitorremediação é uma técnica que vem sendo utilizada em projetos de biorremediação de ambientes terrestres e aquáticos contaminados por metais pesados. Com essa estratégia podem ser utilizadas plantas, aproveitando suas características fisiológicas, para retirar e acumular contaminantes dispersos nas áreas afetadas (PIO et al., 2013). É considerada uma técnica viável e de baixo custo e alguns autores elencam pontos positivos como a viabilidade de aplicação *in situ* em áreas extensas, possibilidade de remediar diferentes tipos de poluentes, capacidade de ser aplicada em diferentes tipos de ambientes (solo, água e ar), facilidade de monitoramento das plantas, possibilidade de ser associado com outros métodos e favorecimento na conservação de recursos naturais (VASCONCELOS et al., 2012; SILVA et al., 20019; CHAVES et al., 2010).

A fitorremediação de solos contaminados com metais pesados tem como principal objetivo absorção e acúmulo desses elementos tóxicos pelas plantas (OLIVEIRA et al., 2018). De forma mais ampla, as espécies com boa capacidade de fitorremediação funcionam como um filtro, possibilitando a descontaminação do ambiente, armazenando os contaminantes em seus compartimentos (raiz, caule e folhas), impedindo que a substância poluente esteja disponível para o homem (RODRIGUES et al., 2016).

A fitorremediação não é considerada uma técnica simples, pois envolve fatores fisiológicos e bioquímicos de cada planta, além de fatores climáticos (MARQUES et al., 2011). Ainda há muito que se pesquisar em relação aos mecanismos ecofisiológicos de espécies nativas da Amazônia submetidas ao estresse por metais pesados, pois ainda são poucos os trabalhos envolvendo a técnica de fitorremediação para descontaminação de ambientes, principalmente tratando-se de espécies arbóreas.

Para o processo de fitorremediação é recomendado uso de espécies vegetais que apresentem características como crescimento rápido, elevada produção de biomassa, competitividade, vigor e tolerância à poluição (LAMEGO e VIDAL, 2007). *Euterpe precatoria* Mart. Apresenta algumas das características citadas. Espécies que estão presentes na

alimentação humana não são indicadas para o processo de fitorremediação, uma vez que os metais pesados podem ser incorporados nos tecidos da planta e, quando ingerido há um sério risco de desenvolvimento de problemas de saúde (COLLET et al., 2018).

Apesar do crescente número de estudos sobre o efeito do Cd em plantas e a fitorremediação, existem lacunas no conhecimento se considerarmos o uso de espécies arbóreas, especialmente nativas. A Amazônia Ocidental possui uma grande biodiversidade e com muitas espécies endêmicas que não sabemos como enfrentam as contaminações ambientais. Ademais, visto que as espécies florestais são cultivadas em solos ricos em matéria orgânica, é importante conhecer se esse componente do solo pode afetar a biodisponibilidade de Cd, podendo auxiliar nos processos de fitorremediação. Nesse contexto, o objetivo desse estudo foi avaliar o efeito da matéria orgânica na dinâmica de translocação de Cd em *E. precatória* cultivada em solo contaminado com cloreto de cádmio ($\text{CdCl}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$).

2. REVISÃO DA LITERATURA

2.1 Solo

O solo é considerado um sistema dinâmico que leva em sua constituição componentes sólidos, líquidos e gasosos de origem natural ou orgânica, que ocupa, em extensão territorial, a maior parte das superfícies continentais do planeta terra (MENDONÇA, 2006). Lima (2001) define solo como material proveniente da decomposição de rochas pela ação de agentes físicos ou químicos, podendo ou não ter matéria orgânica em sua composição.

Mesmo sendo um importante recurso natural, o solo, na maioria das vezes, tem sua integridade afetada, sobretudo, quando atividades de intervenção humana para desenvolvimento socioeconômico são executadas sem o comprometimento com as leis de preservação ambiental (RIZZO et al., 2006). Por ser um recurso que não se renova com facilidade como a água e o ar, os processos de contaminação do solo tornam-se danosos, principalmente por conta da dificuldade de percepção dos contaminantes presentes nessa matéria (SISINNO et al., 2000).

O solo é essencial para atividades agrícolas, pois, além de desempenhar papel de suporte para as plantas, fornece nutrientes e água que são fundamentais para o seu desenvolvimento (ANDREOLI et al., 2014). Logo, os processos de contaminação acabam comprometendo, ou até mesmo impossibilitando o crescimento das espécies vegetais. Os processos de contaminação dos solos vêm sendo retratados em diferentes contextos, principalmente quando trata-se de poluição de solos por metais pesados, sendo de relevante importância sua detecção para evitar problemas relacionados à saúde humana (ACCIOLY et al., 2000).

Estudos mostram que diferentes plantas apresentam diferentes respostas quando submetidas ao estresse por metal pesado. Pesquisas apontam que as características do solo influenciam a disponibilidade de elementos minerais para absorção pelas plantas, ou seja, dependendo do tipo de solo que a planta é cultivada a resposta de fitorremediação pode variar. Nogueiro et al. (2016) ao estudar aplicação de cádmio em tomateiros cultivados em solo argiloso e arenoso, observou que as plantas cultivadas em solo argiloso apresentaram maiores concentrações de N, Mn e Cd e apresentaram maior produção de massa seca.

A interação entre a matéria orgânica e os metais pesados são descritas como troca iônica (DEUCHER, 2001). De acordo com Morais et al. (1997), a matéria orgânica, dependendo do teor, é a principal responsável pela carga elétrica negativa nos solos tropicais, desta maneira, comporta os principais sítios de adsorção de cádmio. Para Levi-Minzi (1976), a adsorção do cádmio por solos correlaciona-se positivamente com o conteúdo de matéria orgânica presente

neste. Schuman (1977), aponta que solos ricos em matéria orgânica manifestam alta capacidade de fixação de metais pesados, diferente de solos desprovidos desse componente. De maneira geral, a matéria orgânica desempenha um importante papel no processo de retenção de Cd em solos.

2.2 Metais pesados

O termo metal pesado é designado a um heterogêneo grupo de elementos, que inclui metais e semi-metais com potenciais tóxicos e poluidores, mesmo que alguns deles sejam essenciais para organismos vivos em baixas concentrações (BIONDI, 2010). Considera-se metal pesado todo elemento situado entre o cobre e o chumbo na tabela periódica com peso atômico entre 63,546 e 200,590 e densidade superior a 4,0 g/cm³ (CONCIANI, 2016). Esses elementos encontram-se distribuídos por toda a natureza e desempenham uma gama de papéis nos sistemas biológicos, que variam de reguladores até importantes componentes que integram a estrutura das proteínas (TAVARES, 2009).

Os metais pesados no solo podem ter origem de fontes naturais, ou através da ação de interferência do homem. Os teores naturais de metais presentes no solo, também chamados de “*background level*” vão depender do material de origem sobre o qual o solo se desenvolveu e originou seus constituintes mineralógicos. Solos que possuem rochas básicas em sua composição, apresentam maiores teores de metais pesados quando comparados com solos que tiveram sua origem de formação sobre gnaises, arenitos, granitos e siltitos (TILLER, 1989; OLIVEIRA 1996; TEIXEIRA FILHO, 2009).

Alguns metais pesados são nutrientes aos vegetais, e como sua absorção acontece no momento da nutrição vegetal são denominados de acordo com a quantidade disponível no solo para a planta. São denominados micronutrientes aqueles que se encontram em pequenas quantidades (Cu, Fe, Mn e Zn), outros são favoráveis ao crescimento das plantas (Co e Ni), e os demais (As, Cd, Cr, Pb, Hg, Pu, Sb, Ti e U) não apresentam função biológica, e também apresentam toxicidade em altas concentrações quando disponíveis para as plantas (ALLOWAY e AYERS 1996).

As principais fontes antropogênicas de metais pesados no meio ambiente são oriundas de fertilizantes, pesticidas, águas procedentes de irrigações contaminadas, resíduos urbanos e industriais, mineração, fundição e refinamento de metais (SANTI e SEVA FILHO, 2004). No ambiente urbano, as atividades desenvolvidas pelo setor industrial, somam uma das principais fontes de contaminação por metais pesados. Atividades como a queima de carvão mineral, e petróleo, acabam por promover a liberação de diversos metais pesados em forma de vapor ou

adsorvido ao material particulado emitido na atmosfera através dessas reações (MILANEZ, 2007).

O cádmio, dentre os metais pesados, é um dos principais contaminantes do meio ambiente e considerado um dos mais tóxicos, estando na lista dos compostos mais tóxicos existentes na natureza (NEVES, 2004).

A presença de cádmio (Cd) no ambiente pode dar-se por consequência de dois processos, sendo o primeiro através de fontes naturais que incluem atividades vulcânicas, intemperismo de rochas, incêndios florestais de ordem natural e mobilização de solos (ANGELIS et al., 2017). O segundo processo é consequência de atividades antrópicas por meio de derivados de baterias, pigmentos, estabilizadores plásticos, pesticidas, fertilizantes, processamento de borracha, galvanização, combustão fóssil e incineração de resíduos (ANGELIS et al., 2017; LOZI, 2019).

Uma vez disponível no ambiente, o Cd representa problemas significativos, pois sua toxicidade, mesmo em quantidades traço, é prejudicial ao homem, além de ser móvel nas plantas e de fácil incorporação em ciclos biológicos (OLIVEIRA et al., 2001). Apesar do Cd não ser um elemento imprescindível ao metabolismo das plantas, os íons de Cd^{+2} são facilmente absorvidos pelas raízes e translocados para o compartimento aéreo na maioria das espécies, ficando fácil a introdução desse elemento tóxico na cadeia trófica (BORIN, 2010).

A contaminação por Cd vem crescendo substancialmente a nível global. A exposição dos seres humanos a esse metal pesado pode ocorrer através da ingestão de alimentos, consumo de água contaminada, inalação e tabagismo (KIRHAM, 2006). O tabagismo e a alimentação com produtos agrícolas ou hortaliças são as principais causas da contaminação por Cd em seres humanos (GUIMARÃES et al., 2008).

Problemas nos rins, fígado, testículo e intestino podem ser causados caso o organismo seja exposto a altas doses desse metal. A exposição recorrente contribui para o surgimento da doença de itai-itai, câncer no fígado, rins, pulmão, sistema hematopoiético e reprodutor (SARKAR et al., 2013; LOZI, 2019).

2.3 Efeito do cádmio em plantas

A exposição de plantas a elevadas concentrações de cádmio é capaz de causar alterações morfológicas, fisiológicas, bioquímicas e anatômicas, além de ocasionar um rápido declínio da capacidade de absorção e acúmulo desse elemento pelo sistema radicular da planta (OLIVEIRA et al., 2001; ANDRADE et al., 2005).

O excesso desse elemento em plantas causa, principalmente, a redução do crescimento vegetal em alguns órgãos da planta, sobretudo o do sistema radicular pela deficiência de minerais (VITÓRIA et al., 2001). Também podem ser verificadas alterações enzimáticas de várias rotas metabólicas, incluindo do Ciclo de Calvin, da glicose e da assimilação de sulfato (FORNAZIER et al., 2002; CARDOSO et al., 2002; PEREIRA et al., 2002).

Os sintomas de toxicidade causados pelo Cd também interferem em diversas funções celulares e moleculares, principalmente pela formação de complexos com grupos externos de compostos orgânicos, tais como o grupo das proteínas, decorrendo na inibição de atividades consideradas essenciais (HALL, 2002; METWALLY et al., 2003). O Cd interfere no ciclo fotossintético e causa alteração da rota normal do transporte de elétrons para produção de radicais livres. O processo de lignificação do ápice das raízes parece ser uma forma de defesa da planta ao acúmulo desse metal, porém esse mecanismo de proteção acarreta danos ao processo de absorção de nutrientes e, conseqüentemente, ao crescimento das plantas (SCHÜTZENDÜBEL e POLLE, 2002).

Em condições de estresse por metais pesados, as plantas podem desenvolver mecanismos de tolerância conforme o seu desenvolvimento, o que pode as tornar adaptadas a este estresse, sendo que uma planta pode ter vários mecanismos de tolerância. Desse modo, as respostas ao estresse variam amplamente dependendo das características intrínsecas da espécie, do elemento responsável pelo estresse, assim como as condições ambientais (SOUZA et al., 2011).

Estudos têm indicado que espécies florestais ao contrário das espécies de ciclo anual, tem se mostrado mais resistentes a doses elevadas de metais pesados. Dentre esses estudos, Placek et al. (2015) ao avaliarem a capacidade das espécies *Pinus silvestres*, *Picea abies* e *Quercus robur* em remediar contaminantes do solo (Cd, Zn e Pb), verificaram que o *Pinus silvestres* apresentou excelente capacidade de adaptação na presença dos metais, podendo ser usado na recuperação de solos contaminados. Santos et al. (2004), no mesmo sentido, analisando mudas florestais em experimento controlado não encontraram sinais visíveis de fitotoxidez. Renault et al. (2004) investigou o potencial de revegetação e fitorremediação com espécies arbóreas em rejeitos de minério, e registrou crescimento natural de *Pinus banksiana* no local.

2.4 Legislação ambiental

Apesar da utilização indiscriminada dos recursos naturais, medidas para adoção de providências necessárias têm ganhado força quando a temática é gestão de recursos ambientais (MOURA e ROCHA, 2015). A resolução nº 001 do Conselho Nacional do Meio Ambiente CONAMA (1988) instaura que toda atividade poluidora, deve se responsabilizar em desenvolver medidas mitigadoras sobre os impactos além de recuperar a área que foi degradada.

Em grande parte dos países, como no Brasil, não existe um controle e fiscalização adequada para áreas contaminadas por metais pesados. Os estudos nessa área passam a ganhar visibilidade, pois sabe-se que os impactos decorrentes dos metais pesados sobre o meio ambiente e homem podem ocasionar sérios riscos à saúde (SANTOS, 2005; ALCANTARA, 2017).

A resolução CONAMA 420/2009 considera a necessidade de estabelecer critérios específicos para definição de valores orientadores para a prevenção da contaminação de solos além de definir diretrizes para o gerenciamento de áreas contaminadas. Essa resolução 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. Consta na resolução procedimentos e ações voltadas para o gerenciamento de áreas contaminadas desde eliminar o perigo ou reduzir o risco à saúde humana até possibilitar o uso declarado ou futuro da área, observando o planejamento de uso e ocupação do solo.

Na Tabela 1 constam os valores de investigação para metais estabelecidos pelo CONAMA. Essa resolução apresenta valores de preservação (VP), que representam as concentrações limite dos elementos no solo, os valores de investigação (VI), que representam a quantidade determinada da substância no solo acima da qual existem riscos potenciais, diretos ou indiretos, à saúde humana e o valor de referência de qualidade (VRQ), que é a concentração de determinada substância que define a qualidade natural do solo (CONAMA, 2012).

Tabela 1. Valores orientadores para solo (mg kg^{-1}).

METAIS	VALORES DE PREVENÇÃO	REFERÊNCIA DA QUALIDADE	VALORES DE INVESTIGAÇÃO		
			AGRICULTURA	RESIDENCIAL	INDUSTRIAL
Arsênio	15	0,6	35	55	150
Bário	150	84	300	500	750
Cádmio	1,3	0,5	3	8	20
Chumbo	72	13	180	300	900

Cobalto	25	4	35	65	90
Cobre	60	5	200	400	600
Cromo	75	35	150	300	400
Mercúrio	0,5	0,1	12	36	70
Níquel	30	9	70	100	130
Vanádio	-	24	-	-	1000
Zinco	300	35	450	1000	2000

Fonte: CONAMA (2012).

2.5 Remediação de solos contaminados por metais pesados

A remediação de áreas que sofreram degradação passou a ser uma exigência legal e um compromisso social. A literatura apresenta inúmeras tecnologias e técnicas para remediação de áreas contaminadas. Tanto processos físicos quanto químicos podem ser adotados para tal medida, porém, ambos tecnicamente difíceis e com elevado custo (CHAVES, 2008).

As técnicas que são adotadas para remediar contaminantes do solo baseiam-se em processos de engenharia direcionados a aumentar a capacidade de extração dos elementos tóxicos. Esses processos possuem métodos que têm como objetivo imobilizar os metais pesados, retirando-os do solo. Geralmente podem ser elencados da seguinte forma: a biorremediação que baseia-se na introdução de microrganismos específicos no local da contaminação; a fitorremediação onde se emprega plantas com o objetivo de remover, transferir, estabilizar ou destruir elementos nocivos; a eletrocinética que faz uso da passagem de uma corrente elétrica de baixa intensidade entre os eletrodos envolvidos pelos contaminantes do solo; o tratamento químico que é baseado em processos oxidativos ou redutores e a separação pirometalúrgica que utiliza fornalhas de altas temperaturas para volatilizar os metais; entre outros (ABDANUR, 2005; CHAVES, 2008).

2.6 Fitorremediação

A fitorremediação (*fito* = planta e *remediação* = corrigir) é conhecida como uma tecnologia que faz uso de vegetais para degradar, extrair ou mobilizar contaminantes do solo e da água (EPA, 2000). A fitorremediação tem como principal objetivo promover a reabilitação da estrutura e ecologia do solo contaminado, aumentando a quantidade de carbono orgânico, porosidade e a infiltração da água, além de reduzir níveis de erosão (MERKL et al., 2006).

Essa técnica é considerada uma tecnologia que visa promover a descontaminação, ainda que parcial, de solos que sofreram algum tipo de contaminação ou isolar o material contaminante de modo a evitar sua dispersão. Tem custo relativamente baixo quando

comparado a outras tecnologias, baixo impacto ambiental e aceitação pela comunidade científica e indústrias (MARQUES et al., 2011; HUANG et al., 2005).

O processo de fitorremediação pode ser usado em aplicações “*in situ*” ou “*ex situ*”. A técnica é considerada, de modo geral, para uso “*in situ*” pelo estabelecimento da vegetação em áreas de solo ou água contaminados. Porém, estudos mostram que solos contaminados podem ser escavados e transportados para uma unidade de tratamento onde a fitorremediação pode ser aplicada (MONTEIRO, 2008; SAMPAIO, 2015).

Os resultados da fitorremediação não são instantâneos, podendo levar anos ou até mesmo décadas para que o resultado esperado possa ser alcançado (EPA, 2000). A fitorremediação é baseada na seletividade, natural ou desenvolvida, que algumas espécies apresentam a determinados tipos de mecanismos de ação. Essa seletividade deve-se ao fato de que os compostos orgânicos podem ser translocados para os tecidos das plantas e posteriormente volatizados. Esses ainda podem sofrer parcial ou completa degradação ou serem transformados em compostos menos danosos (ALCCIOLY et al., 2000).

São espécies com potencial para fitorremediação aquelas capazes de crescer na presença do contaminante e sobreviver sem diminuir sua taxa de crescimento, mesmo com a captura e acúmulo do material tóxico (PAJEVIC et al., 2009). Plantas hiperacumuladoras recebem destaque por apresentarem capacidade de absorver quantidades elevadas de metais pesados. De acordo com Watanabe (1997), plantas hiperacumuladora são capazes de extrair e acumular mais de 100 mg kg⁻¹ de Cd, tornando-se promissoras para descontaminação de ambientes. Essas têm se mostrado muito eficazes em concentrar metais pesados nas partes aéreas do que nas raízes, o que indica que elas conseguem transportar e cumular os metais pesados em seus compartimentos superiores (DOUMETT et al., 2008; HAQUE et al., 2008).

Com a evolução das tecnologias direcionadas cada vez mais para processos naturais, as pesquisas já direcionam que processos como a fitorremediação podem contribuir, de forma significativa, em descontaminação de solos e água (TAVARES, 2009). O conhecimento da interação entre plantas, poluente e solo é o primeiro passo para a realização eficaz dessa técnica (CABRAL, 2016).

Com os avanços nas pesquisas algumas empresas começam a surgir no mercado com o intuito de fazer uso da fitorremediação para minimizar impactos ambientais. Um exemplo é a Phytorestore é uma empresa líder na restauração da biodiversidade de grandes áreas com crises ecológicas e sócio-ambientais. A empresa utiliza de Soluções Baseadas na Natureza (SbN) para fazer tratamento natural de efluentes sanitários, industriais, rios, lagos, mananciais e solos contaminados através da biotecnologia dos jardins filtrantes. No Brasil poucas são as pesquisas

com espécies locais e, para alcançar esse nível de aplicação da técnica, estudos com diferentes espécies são necessários. Como processo de fitorremediação não depende apenas dos mecanismos fisiológicos da planta, como já mostram estudos, é importante estudar a relação de espécies nativas da região já adaptadas às condições edafoclimáticas, uma vez que estas condições podem interferir no êxito da técnica.

2.7 Mecanismos de fitorremediação

Existem diferentes técnicas, dependendo da área contaminada, natureza química ou propriedades químicas do poluente, capaz de remediar solos contaminados, sendo elas: fitoextração, fitoestabilização, fitovolatização, fitoestimulação e fitodegradação (VASSÃO, 2019).

- I. **Fitoextração** é uma técnica que envolve a absorção dos contaminantes, presentes no solo ou água, pelas raízes, onde os mesmos são nelas armazenados ou podem ser transportados e acumulados no compartimento superior da planta. Esse procedimento é possível com plantas, que tenham capacidade de armazenar altas concentrações de metais específicos. Espécies como *Brassica juncea*, *Aeolanthus biformifolius*, *Alyssum bertolonii* e *Thlaspi caerulescens* são exemplos de plantas que possuem alta capacidade de acumular metais (GRATH, 1998; CHAVES, 2008).
- II. **Fitoestabilização** consiste na técnica de utilização de plantas para estabilizar ou imobilizar os poluentes do solo, evitando a migração dos contaminantes via erosão ou lixiviação, prevenindo a exposição aos animais e minimizando a probabilidade de serem inseridos na cadeia alimentar (LAMENGO e VIDAL, 2007; VASSÃO, 2019). As plantas indicadas para essa técnica devem apresentar tolerância às condições de solo, desenvolver-se vegetativamente com agressividade, possuir um sistema radicular que atinja grandes extensões, absorver grandes quantidades de metais para imobiliza-los nas raízes, possuírem tolerância a diferentes tipos de ambientes e terem ciclos de vida longo ou facilidade de autopropagação (SANTIBÁÑEZ et al., 2008; VASSÃO, 2019). Para essa estratégia podem ser adotadas as espécies de *Haumaniastrum*, *Eragrostis*, *Ascolepis*, *Gladiolus* e *Alyssum* (MILLER, 1996).
- III. **Fitovolatização** é a técnica pelo qual as plantas são eficazes no ato de degradação de poluentes orgânicos. Os elementos dos grupos 2, 5 e 6 da Tabela periódica, com ênfase no mercúrio, selênio e arsênio, que são facilmente absorvidos pelas raízes para posteriormente serem convertidos em formas não tóxicas ou voláteis para em seguida serem liberados para a atmosfera (BROOKS, 1998; VASSÃO, 2019). Como exemplos de espécies utilizadas

nesta técnica, temos a alfafa (*Medicago sativa*), a mostarda indiana (*Brassica juncea*), a canola (*Brassica napus*) e *Populus* (USEPA, 2000).

- IV. **Fitoestimulação** baseia-se na degradação de poluentes orgânicos por microrganismos na região da rizosfera, estimulado pelas plantas (LAMEGO e VIDAL, 2007). Nesse processo acontece o estímulo da atividade microbiana, caracterizado pela liberação de aminoácidos e polissacarídeos pela raiz. Esses compostos possuem a competência de degradar outros componentes presentes no solo, conferindo à planta aptidão rizosférica para biorremediação, por apresentar grandes concentrações de microrganismos (VASSÃO, 2019). Exemplos dessa estratégia são alfafa (*Medicago sativa*), soja (*Glycine max* L.), menta (*Mentha spicata*), amora (*Morus rubra* L.) e o arroz (*Oryza sativa* L.) (USEPA, 2000).
- V. **Fitodegradação** nesta técnica os contaminantes orgânicos são degradados ou mineralizados dentro das células vegetais por enzimas específicas. Destacam-se as nitroredutases (degradação de nitroaromáticos), desalogenases (degradação de solventes clorados e pesticidas) e lacases (degradação de anilinas). *Populus* sp. e *Myriophyllum spicatum* são exemplos de plantas que possuem tais sistemas enzimáticos (CUNNINGHAM et al., 1996).

2.8 Açáí (*Euterpe precatoria* Mart.)

O açáí é uma palmeira tipicamente tropical com ocorrência em matas de terra firme, várzea e igapó de toda a Amazônia (FRANK et al., 20021). O Ministério do Meio Ambiente classifica o açáí como uma palmeira tipicamente amazônica, que conta com aproximadamente vinte e oito espécies congregadas no gênero *Euterpe*. Esse gênero tem ocorrência na América Central e América do Sul (BRASIL, 1998).

No Brasil é representado por cinco espécies (*Euterpe catinga* Wallace, *Euterpe edulis* Mart., *Euterpe longibracteata* Barb. Rodr., *Euterpe oleracea* Mart. e *Euterpe precatoria* Mart.) e quatro variedades (*E. precatoria* Mart. var. *precatoria*, *E. precatoria* var. *longevaginata* (Mart.) A.J.Hend., *E. catinga* Wallace var. *catanga* e *E. catinga* var. *roraimae* (Dammer) A.J.Hend. & Galeano), distribuídas entre as cinco regiões do país (LEITMAN et al., 2013). Na Amazônia há uma forte ocorrência de *E. oleracea* Mart. e *E. precatoria* Mart., ambas nativas, mas não endêmicas (OLIVEIRA e ALMEIDA, 2014).

E. precatoria Mart. é uma palmeira de estipe único (monocaula) que pode atingir de 3 a 20 m de altura e de 4 a 23 cm de diâmetro. Frutifica na época de outubro a março, com 10 m a 20 m de altura e caule liso medindo de 10 cm a 23 cm de diâmetro. Possui coroa formada por

10 a 15 folhas horizontais e arqueadas, com ráquis de 2 a 3,5 m de comprimento compostas com 60 a 90 folíolos de até 80 cm de comprimento e 2-3 cm de largura, e as bainhas foliares de seus pecíolos formam um pseudocaule de aproximadamente um metro de comprimento, geralmente de cor verde, do qual se extrai o palmito (GALEANO, 1992; CASTRO et al., 1993). Os autores reportam ainda que este possui inflorescência com pedúnculo de cerca de 20 cm de comprimento, e ráquis que atinge até 40 cm de comprimentos, com aproximadamente 90 ráquulas pendentes, esbranquiçadas e tomentosas, as mais longas até 70 cm de comprimento.

O açaí solteiro (*E. precatória*) desenvolve-se dentro de uma variedade de habitats e, na região amazônica, é comum ao longo das margens dos rios em florestas de baixio, áreas temporariamente inundáveis conhecidas como áreas de várzeas, e, ocasionalmente em florestas de terra firme (ROCHA, 2004). Na Amazônia Oriental, Acre, Amazonas, Pará e Rondônia, dispõe da maior frequência dessa espécie (HENDERSON, 2000).

Essa palmeira apresenta elevado potencial econômico, principalmente pelo seu fruto, o mesocarpo comestível é a parte mais utilizada, de onde é extraído, a partir de frutos frescos, um líquido espesso conhecido como “vinho de açaí” (Figura 1), amplamente consumido na Amazônia brasileira em todos os níveis socioeconômicos da população (CASTRO, 1992). Utilizando-se ainda para extração de palmito e madeira, além do seu potencial ornamental (OLIVEIRA e ALMEIDA, 2014).

Figura 1. A - Planta de *E. precatória*; B - Cacho de açaí solteiro (*E. precatória*); C - Polpa extraída do fruto do açaí; D - Artesanato produzido da palha do açaí; E - Frutos de *E. precatória*.
Fonte: Marcus Vasconcelos.



3. OBJETIVOS

3.1 Geral

- Avaliar o crescimento de *E. precatória* em substratos com diferentes níveis de cádmio e matéria orgânica.

3.2 Específicos

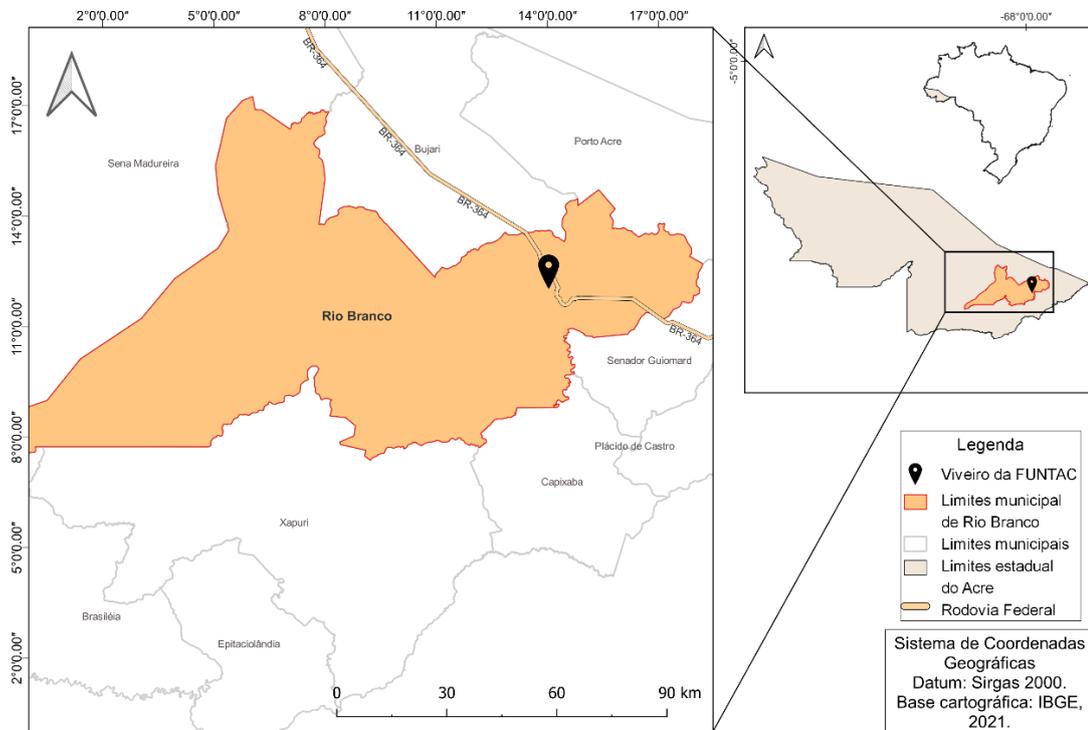
- Caracterizar a resposta de *E. precatória* ao cádmio;
- Analisar as propriedades químicas do solo que sofreu contaminação por cloreto de cádmio antes e depois do plantio experimental;
- Determinar o crescimento (massa seca parte aérea, massa seca raiz e massa seca total) das plantas de *E. precatória* submetidas a tratamento com cádmio e sem cádmio.
- Determinar o teor de metais pesados em cada compartimento (sistema radicular e parte aérea) de *E. precatória*;
- Verificar o efeito da matéria orgânica nos Fatores de Translocação (FT) e Bioacumulação (FB) de cádmio.

4. MATERIAL E MÉTODOS

4.1 Área experimental

O experimento foi conduzido em casa de vegetação localizada nas dependências da Fundação de Tecnologia do Estado do Acre (FUNTAC), no município de Rio Branco, Acre (S -9.946176 e W -67.868997) (Figura 2). O clima local segundo a classificação de Köppen é do tipo Am, com chuvas anuais variando entre 1.900 e 2.200 mm e temperaturas médias entre 24 e 26 °C (ALVARES et al., 2013).

Figura 2. Localização da área onde o estudo foi conduzido, Rio Branco, Acre Brasil.



4.2 Delineamento e instalação do experimento

A instalação das unidades experimentais seguiu o delineamento inteiramente casualizado (DIC), composto por 4 tratamentos e 5 repetições, sendo 2 plantas da espécie *E. precatória* por repetição, totalizando 20 unidades experimentais. As mudas de *E. precatória* foram obtidas no Viveiro da Floresta. No viveiro, essas mudas foram produzidas em casa de vegetação por meio de sementes crescidas em tubetes com capacidade de 115 cm³. O substrato usado no viveiro é o da marca Maxfertil, conhecido como substrato misto para plantas, que leva em sua composição casca de pinus, cinzas, vermiculita, turfa, serragem e bioestabilizadores. O fertilizante Osmocote Plus da marca ICL, que leva em sua fórmula 15% de N, 9% de P₂O₅, 12%

de K_2O , 1,3 de Mg, 6% de S, 0,46% de Fe, 0,06% de Mn, 0,02% de B, 0,05% de Cu, 0,05% de Zn e 0,02% de Mo, é aplicado no substrato para um melhor desempenho do material vegetal. As mudas estavam com idade de aproximada de 120 dias em ambiente controlado. Foram separados 40 vasos plásticos de polietileno de 3,8 litros para onde as mudas foram transplantadas. O substrato de cada tratamento utilizado no experimento foi obtido no viveiro da FUNTAC, peneirado em peneira de malha de 2 mm para obtenção de uma granulometria mais fina e homogêneo em seguida (Figura 3).

Figura 3. Homogeneização do substrato peneirado (areia, argila e matéria orgânica).



4.3 Determinação dos tratamentos

Os tratamentos utilizados foram:

T1 – 30% Matéria Orgânica + 40% Areia + 30% Argila + Contaminante (Cd);

T2 – 30% Matéria Orgânica + 40% Areia + 30% Argila;

T3 – 55% Areia + 45% Argila + Contaminante (Cd);

T4 – 55% Areia + 45% Argila.

A matéria orgânica utilizada no experimento foi a Vivatto Plus, da marca Technes, que possui propriedades físico-químicas balanceadas.

Para o preparo da solução contaminante o cloreto de cádmio foi pesado em balança analítica de precisão (Figura 4A) e colocado na estufa a 108 °C por 4 horas para eliminação da umidade que possa ter sido absorvida pelo reagente. Em seguida, preparou-se uma solução com 0,36 g de cloreto de cádmio em 3 litros de água destilada.

Após a diluição da solução foi realizada a contaminação do solo com a adição de 300ml de $CdCl_2 \cdot H_2O$ para cada vaso e foi realizada de forma manual com auxílio de um becker, a partir da solução estoque de Cd (Figura 4B). O solo foi dividido em 4 tratamentos, sendo realizada a contaminação individualmente em dois tratamentos (T1 e T3).

Figura 4. A - Pesagem do cloreto de cádmio; B - Preparo da solução contendo cádmio para contaminação do substrato.



Após a homogeneização dos substratos de cada tratamento, realizada em um carro de mão com auxílio de uma pá manual, o solo foi acomodado em vasos plásticos com peso de aproximadamente 4 kg e levados para casa de vegetação para a implantação do experimento. Logo depois, os tratamentos que levaram o contaminante (T1 e T3) foram contaminados com o metal pesado (Cd). A solução contendo Cd foi preparada com água destilada, onde, foi utilizado a proporção de 12 mg de Cloreto de cádmio monohidratado puríssimo ($\text{CdCl}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$) para cada 1 kg de solo. A concentração final de Cd utilizada no experimento foi de aproximadamente $100 \mu\text{mol CdCl}_2 \text{ Kg}^{-1}$ de solo. Os vasos foram dispostos em uma área plana dentro da casa de vegetação onde passaram por um processo de incubação de oito dias, com os vasos cobertos com uma lona de polietileno, durante três dias.

Após a incubação do solo, foram coletadas duas amostras de 200 g de substrato de cada tratamento (Figura 5). As amostras de solo foram enviadas ao laboratório LABRAS para serem realizadas análises químicas do solo antes do plantio das mudas de *E. precatória*.

Figura 5. Pesagem das amostras de substrato para análises químicas.



Na caracterização química dos solos de cada tratamento (Tabela 2) o $\text{pH}_{(\text{H}_2\text{O})}$ foi determinado, na relação solo: solução de 1:2,5, pelo método potenciométrico (EMBRAPA,

1997). Potássio, cálcio, magnésio e hidrogênio foram extraídos com KCl 1mol L⁻¹, na relação de 1:10, conforme descrito em EMBRAPA, (2009).

Tabela 2. Propriedades químicas do substrato de cada tratamento adotado no experimento.

TRATAMENTO	pH	K ⁺	----- cmol _c dm ⁻³ -----			Cd mg kg ⁻¹
			Ca ⁺²	Mg ⁺²	H ⁺	
T1	5,6	0,37	3,45	1,69	2,25	31,00
T2	6,2	0,61	4,22	2,31	2,35	0,16
T3	6,1	0,16	3,12	0,99	1,45	71,63
T4	6,2	0,27	4,08	1,35	1,55	0,05

T1 = 30% Matéria Orgânica + 40% Areia + 30% Argila + Contaminante (Cd); T2 = 30% Matéria Orgânica + 40% Areia + 30% Argila; T3 = 55% Areia + 45% Argila + Contaminante (Cd); T4 = 55% Areia + 45% Argila.

Levando em consideração os valores orientados para solo, proposto pela CETESB, observa-se que o cádmio ficou 62 vezes acima do valor que corresponde ao de um solo limpo. O período de homogeneização e incubação do solo não foram suficientes para deixar o contaminante homogêneo no solo condicionado nos vasos.

Ao ter o conhecimento das características do solo, foi realizado o transplântio das mudas com o auxílio de uma pá de jardinagem, servindo para fazer a cova, posteriormente as mudas foram retiradas dos tubetes (Figura 6A) e transplantadas para os substratos (Figura 6B). As plantas permaneceram em casa de vegetação onde foram monitoradas semanalmente por 40 dias.

Figura 6. A - Muda de *E. precatória* retirada do tubete para plantio; B - 40 unidades experimentais de mudas de *E. precatória* dos 4 tratamentos dispostos em casa de vegetação.



Durante o período do experimento, as plantas receberam diariamente água proveniente de irrigação automática dentro da casa de vegetação. Passado o período pré-estabelecido, foram

efetuadas novas coletas de duas outras amostras de solo, de 200 g cada, de cada tratamento, para serem enviadas ao LABRAS para análises químicas e biodisponibilidade do metal pesado (Cd), através do método DTPA, que foi usado para contaminar os substratos. Como o laboratório não enviou o resultado das análises a tempo de serem inseridas neste manuscrito para aula de qualificação, ressalto que os teores e conteúdos de metais pesados presentes nos solos de cada tratamento, depois do plantio das mudas, serão inseridos e apresentados na defesa final da dissertação.

4.4 Determinação da massa seca

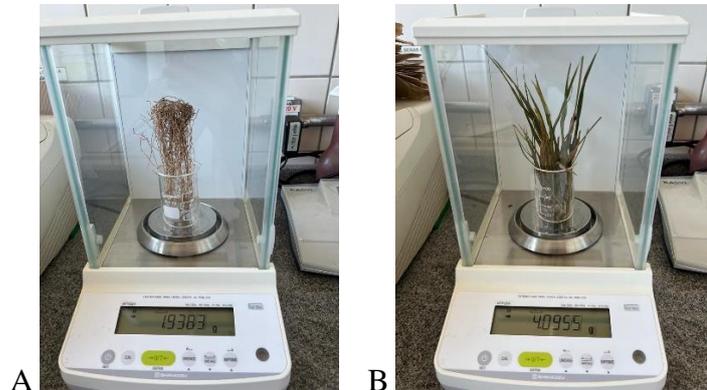
As plantas foram coletadas e lavadas com água da torneira até a retirada completa do solo. Em seguida, foram separadas a raiz e parte aérea (Figura 7), sendo estas acondicionadas em envelopes de papéis kraft e secas em estufa com circulação forçada de ar em temperatura entre 60 e 65 °C até atingirem condições de peso constante.

Figura 7. Amostras de raiz e parte aérea de *E. precatória* lavadas e seccionadas por compartimento.



Na sequência, peso seco de cada compartimento (raiz e parte aérea) foi determinada em balança analítica de precisão (Figura 8A e 8B). A massa seca total foi obtida pelo somatório da massa seca da raiz, caule e folha em cada indivíduo. Após o processo de secagem, o material vegetal foi triturado em moinho de facas, acondicionado em sacos plásticos, vedados e enviados o laboratório LABRAS para análises químicas.

Figura 8. A - Amostras de raiz e B - parte aérea de *E. precatoria* secas em estufa de circulação de ar e pesadas em balança analítica de precisão.



Antes do transplântio, foram selecionadas 5 mudas de *E. precatoria* para determinação do incremento de massa seca. As 5 unidades amostrais passaram pelo mesmo processo de secagem e pesagem adotados para material vegetal utilizados nesse estudo. O incremento de massa seca final, após o transplântio, foi obtido através da seguinte fórmula:

$$IMs = MSf - MSi$$

Onde:

IMs = Incremento de biomassa seca;

MSf = Massa seca final do experimento;

MSi = Massa seca inicial (antes do transplante das mudas).

4.5 Análise química do tecido vegetal e análise estatística

Foi separado o material vegetal de quatro mudas de cada tratamento para quantificar biomassa seca e determinar as concentrações de metais pesados presentes em cada compartimento das amostras (raiz e parte aérea). Amostras de 10 g do material seco e finamente triturado de 4 plantas de cada tratamento, foram submetidas a análises químicas pelo método DTPA, utilizado pelo Instituto Agrônomo (IAC), para determinação do teor de metal acumulado nos tecidos vegetais de *E. precatoria*.

A capacidade das plantas em concentrar Cd foi determinada pelo Fator de Bioconcentração (FBC) calculado a partir da seguinte equação (ARUMUGAM et al., 2018):

$$FBC = \frac{TMPA}{TMS}$$

Onde:

TMPA: Teor do metal na parte aérea;

TMS: Teor de metal biodisponível no solo.

O Fator de Translocação (FT) foi calculado segundo a equação (ARUMUGAM et al., 2018):

$$FT = \frac{TMPA}{TMR}$$

Onde:

TMPA: Teor de metal na parte aérea;

TMR: Teor de metal na raiz.

Os dados foram agrupados em planilhas eletrônicas e na sequência, os dados de médias das variáveis paramétricas foram submetidas à análises descritivas e teste de Tukey para comparação das médias ($p \leq 0,05$), utilizando a plataforma R-studio.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.2 Produção de massa seca das mudas de *Euterpe precatoria*

Durante os 40 dias do experimento, o acúmulo de massa seca pelas plantas de *E. precatoria* apresentou diferenças significativas dentro dos tecidos analisados (raiz e parte aérea) (Tabela 3). Mesmo com a elevada dosagem do cádmio nos substratos, o crescimento das plantas foi positivamente afetado, o que não era esperado pela quantidade de contaminante adicionado no substrato. Entre os tratamentos adotados no estudo, o tratamento que não levou o contaminante (Cd) sem presença de matéria orgânica (T4) apresentou a menor média no incremento acumulado de massa seca nas plantas ($0,99 \text{ g kg}^{-1}$), enquanto o tratamento contaminado com cádmio e com matéria orgânica (T1) apresentou o maior acúmulo ($3,76 \text{ g kg}^{-1}$).

Tabela 3. Valores médios de massa seca bruta e incremento de massa seca nos tecidos raiz e parte aérea de *E. precatoria* após 40 dias de cultivo em casa de vegetação.

TRATAMENTO	MASSA SECA BRUTA ----- (g.vaso ⁻¹) -----		INCREMENTO MASSA SECA ----- (g.vaso ⁻¹) -----	
	RAIZ	P. AÉREA	RAIZ	P. AÉREA
T1	2,32	3,99	1,35a	2,42 ^a
T2	1,84	3,54	0,87ab	1,97ab
T3	1,90	3,17	0,93ab	1,60ab
T4	1,11	2,42	0,14b	0,85b

T1 = 30% Matéria Orgânica + 40% Areia + 30% Argila + Contaminante (Cd); T2 = 30% Matéria Orgânica + 40% Areia + 30% Argila; T3 = 55% Areia + 45% Argila + Contaminante (Cd); T4 = 55% Areia + 45% Argila. Letras minúsculas diferentes significam diferenças estatísticas de incremento de massa seca dentro de cada tecido (raiz e parte aérea).

O incremento de massa seca da raiz do tratamento T1 ($1,35 \text{ g Kg}^{-1}$) foi superior aos demais tratamentos. Os tratamentos com matéria orgânica sem Cd T2 ($1,84 \text{ g Kg}^{-1}$) e sem matéria orgânica com Cd T3 ($0,87 \text{ g Kg}^{-1}$) apresentaram valores semelhantes, não apresentando diferença significativa entre si ($P \leq 0,05$), para esse compartimento das plantas (Figura 9). Já o tratamento T4 ($0,14 \text{ g Kg}^{-1}$) manifestou o menor valor para incremento de massa seca de raiz.

Segundo Vandecasteele (2005), a ausência de efeito no crescimento radicular é um indicativo da alta tolerância que uma planta pode apresentar, uma vez que esta estrutura é considerada indicador mais sensível de uma planta, por conta do seu contato direto com o solo. Segundo Kabata e Pendias (2001), o teor total crítico em solos para as plantas é de 3 a 8 mg kg^{-1} para Cd, ocorrendo acima destes valores já é possível observar sinais de toxidez para os tecidos. Neste experimento, os tratamentos que receberam o cádmio apresentaram resultados

positivos para incremento de massa seca, ou seja, o cádmio aparenta ser benéfico para o aumento a produção de massa seca em *E. precatoria*. Accioly e Siqueira (2000) citam que dependendo do grau de fitotoxidez do contaminante, existe uma ampla faixa de efeitos negativos sobre o desenvolvimento inicial da planta, o que não foi observado nesse trabalho.

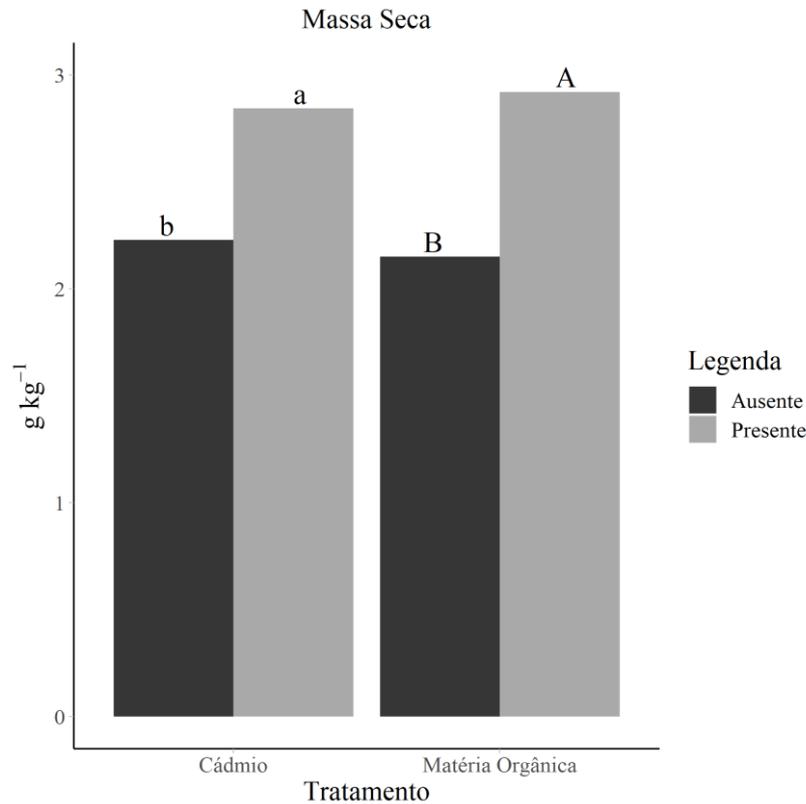
Analisando o incremento da parte aérea, observou-se que as plantas de *E. precatoria* que foram submetidas ao estresse do cádmio expressou o maior valor médio para incremento de massa seca nesse compartimento T1 (2,42 g Kg⁻¹). Já o tratamento T4 (0,85 g Kg⁻¹) mostrou o menor valor médio para incremento no mesmo compartimento (Tabela 3). Neste estudo o resultado foi contrário ao que seria esperado, tendo em vista que o cádmio é um elemento não essencial e tóxico às plantas, sendo que altas concentrações desse contaminante, tais como foram adotadas nesse experimento, deveriam ter causado efeitos fitotóxicos e não efeito positivo no incremento de massa seca.

Andrade (2010), ao analisar teor de cádmio em plantas de arroz em solos incubados com resíduo siderúrgico, observou uma redução da matéria seca das plantas quando submetidas ao estresse do cádmio, o que não foi possível verificar nesse estudo com cultivo de *E. precatoria* em substrato contaminado com cádmio. As plantas de *E. precatoria* não apresentaram sintomas de fitotoxicidade, durante os 40 dias de experimento, mesmo cultivadas em substrato contaminado com o metal.

Lindino et al. (2011), ao conduzir um experimento com a espécie *Crotalaria spectabilis* para remoção de metal pesado do solo, constatou que as plantas tiveram uma taxa de 100% de sobrevivência, porém apresentaram redução nas taxas de crescimento em massa seca. Resultados similares aos encontrados por Romeiro et al. (2007) ao estudar a capacidade da espécie *Canavalia ensiformes* de extrair o chumbo de um solo contaminado, pois mesmo com diminuição no crescimento das plantas do experimento, a espécie foi considerada pelos autores uma boa tolerante ao chumbo.

Como a espécie adotada nesse estudo, *E. precatoria*, mostrou resultados positivos para incremento de massa seca sob cultivo em substrato contaminado com cádmio, diferentes de outros casos encontrados na literatura.

Figura 9. Comparação dos tratamentos com cádmio e com matéria orgânica. Letras minúsculas diferentes significam diferenças estatísticas entre os tratamentos com e sem cádmio e letras maiúsculas diferentes significam diferenças estatísticas entre os tratamentos com matéria orgânica. ($P \leq 0,05$).



Considerando o incremento de massa seca de *E. precatória*, observa-se na Figura 9 que o cádmio aparenta exercer influência positiva similar à matéria orgânica. Esse tipo de comportamento, em que uma planta cresce melhor sob determinado contaminante, já foi observado em trabalhos anteriores como em Nalon (2008) que ao avaliar o potencial do eucalipto em fitorremediar chumbo em solos contaminados com diferentes dosagens do contaminante, observou que a massa seca da parte aérea foi superior no tratamento que levou a maior dosagem do chumbo no solo, algo incomum de ser observado.

No caso do cádmio, o resultado obtido nesse trabalho piloto foi inesperado, uma vez que tem sido observado que a presença de cádmio no solo causa efeitos negativos no crescimento e atividade radicular das plantas (GRATÃO et al., 2015)

Tezzoto et al. (2011), ao estudarem a tolerância do café ao cádmio, níquel e zinco, em condições de campo, observaram que as plantas de café são altamente tolerantes aos três metais testados no experimento. Além disso, mesmo em elevadas doses dos contaminantes, houve pouquíssimo transporte dos metais para o grão, que é a parte consumida pelo homem.

Esses trabalhos corroboram com os resultados desse estudo, pois o tratamento T1, que recebeu cádmio e matéria orgânica na mistura do substrato, mostrou maior produção de biomassa seca tanto na raiz como na parte aérea das plantas, ou seja, o cádmio aliado a matéria orgânica fez com que a massa seca das plantas no tratamento T1 aumentasse. No entanto será realizada uma nova repetição experimental para confirmar esse resultado inesperado.

Na literatura a maioria dos estudos apontam comportamentos distintos de espécies vegetais quando submetidas ao estresse por metais pesados, no que se refere à produção de massa seca. Marques et al. (2000), por exemplo, constataram em seu estudo que a produção de matéria seca das plantas estudadas foi bastante influenciada negativamente pela contaminação do solo por metais pesados. Zeitouni et al. (2007), estudando fitoextração de cádmio e zinco de um latossolo vermelho-amarelo contaminado com metais pesados, observou um efeito negativo sobre a produção de matéria seca da parte aérea das espécies estudadas. Uma redução de até 50% na produção de massa seca foi observada nesse experimento. Marques et al. (2000) encontrou valores semelhantes ao avaliar crescimento de espécies arbóreas que foram submetidas ao estresse por metal pesado. Alcantara et al. (2021), observou uma redução de crescimento em variedades de tomateiros sensíveis ao cádmio, bem como redução de produtividade dos frutos.

Taiz e Zeiger (2009) reportam que a produção de massa seca está associada à tolerância da espécie ao contaminante, adquirida através das diferentes adaptações fisiológicas e bioquímicas que permitem à planta tolerar altas concentrações desses elementos contaminantes. Fatores como redução do transporte através da membrana, exclusão, formação de peptídeos ricos em grupos tiólicos, quelação por ácidos orgânicos e principalmente a compartimentalização do metal em estruturas subcelulares configuram tolerância adquirida da planta.

5.3 Potencial fitorremediador de *E. precatoria*

Um fato importante ao avaliar a eficiência de cada espécie em absorver os metais pesados em excesso no solo é avaliar a quantidade retida em relação à matéria seca da planta. Na determinação do teor de Cd presente nos dois compartimentos das plantas (raiz e parte aérea), verificou-se que a espécie alvo do estudo apresenta um comportamento distinto quanto absorção, transporte e acúmulo desse metal em seus tecidos. Na tabela 4 pode ser observado os resultados para os teores do metal de interesse nos tecidos vegetais de *E. precatoria*.

Tabela 4. Concentração de Cd em diferentes tecidos (raiz e parte aérea) de *E. precatória* após 40 dias de plantio em casa de vegetação.

TRATAMENTO	CONCENTRAÇÃO DE METAL NOS TECIDOS (mg/kg ⁻¹)	
	RAIZ	P. AÉREA
T1	6,17c	0,02a
T2	0,02a	0,02a
T3	8,05b	0,02a
T4	0,02a	0,02a

T1 = 30% Matéria Orgânica + 40% Areia + 30% Argila + Contaminante (Cd); T2 = 30% Matéria Orgânica + 40% Areia + 30% Argila; T3 = 55% Areia + 45% Argila + Contaminante (Cd); T4 = 55% Areia + 45% Argila. Letras minúsculas diferentes significam diferenças estatísticas de acúmulo de Cd dentro de cada coluna (raiz e parte aérea).

A partir dessa análise, verifica-se na Tabela 4, que somente na raiz o acúmulo do metal foi detectado. Os tratamentos que levaram o contaminante (T1 e T3) apresentaram acúmulo de Cd. Tavares (2009) explica que esse fato ocorre, pois na maioria dos casos a absorção de metais pesados pelas plantas pode ser limitado pela baixa solubilidade e difusão destes nos solos. Para Pereira et al. (2012) a absorção de Cd, como de outros metais, por espécies vegetais depende da biodisponibilidade do elemento na solução do solo.

Kahle (1993), em seu estudo sobre resposta das raízes de árvores aos metais pesados, afirma esse acúmulo pode estar relacionado com a imobilização do metal por meio de polímeros orgânicos insolúveis presentes no tecido radicular. Este maior acúmulo de Cd nas raízes pode indicar que as mesmas servem como uma barreira parcial ao transporte do metal para a parte aérea (SHARMA e DUBEY, 2005). Logo, torna-se importante, estudos voltados para uso de espécies capazes extrair e transportar o máximo de metal pesado presente no ambiente contaminado.

Com base nos resultados da Tabela 4, verifica-se que *E. precatória*, foi eficaz em fitoextrair o Cd e acumular na raiz. Mesmo em elevadas concentrações desse contaminante no solo, a espécie foi capaz de absorver quantidades significativas desse metal sem afetar seu desenvolvimento. Vários mecanismos em que o sistema radicular pode contribuir com a tolerância de plantas a metais pesados são considerados, como a regulação da absorção do elemento na rizosfera, acúmulo desses nas raízes, preservando a sua integridade e funções primárias, e a baixa translocação para a parte aérea (ARDUINI et al., 1996).

Entretanto, Santos (2005) observou em seu estudo com mostarda, amaranto e kenaf, proporcionalmente mais metal na parte aérea do que na raiz, concluindo que o principal

mecanismo de impedimento a translocação de metais para a parte aérea não foi a retenção do metal na raiz, mas sim, algum outro mecanismo ligado à limitação na absorção dos metais.

Watanabe (1997), descreve que uma boa planta hiperacumuladora deve ter como características: alta taxa de acumulação mesmo em baixas concentrações do contaminante, capacidade concomitante de acúmulo de diversos contaminantes, alta taxa de crescimento e de produção de biomassa, resistência a pragas e doenças, capacidade de absorção e concentração e tolerância ao contaminante. *E. precatória* mostrou ser uma espécie que dispõe de algumas características citadas por Watanabe. Uma vez que as mudas foram tolerantes ao metal pesado, apresentou incremento em produção de biomassa e acumulou metal pesado em seu sistema radicular.

Assunção (2012) ao estudar a resposta de plantas a diferentes metais pesados, constatou que a espécie *Paspalum notatum* acumulou mais Cd na raiz do que em qualquer outra parte da planta. Andrade et al., (2009) avaliando *Avena strigosa* Schreber, *Helianthus annuus* L., e *Paspalum notatum* em quatro tipos de solos de uma área de mineração relatou que as raízes de *Paspalum notatum* cultivada em diferentes solos apresentaram teores mais elevados de Cd nas raízes, resultados estes semelhantes aos encontrados neste estudo com *E. precatória*.

Marques et al., 2000 avaliando crescimento e teor de metais em mudas de espécies arbóreas cultivadas em solo contaminado com metais pesados, observou que algumas espécies como *C. fissilis*, *H. courbaril*, *M. caesalpiniaefolia*, *S. schottiana*, *M. peruiferum*, *M. umbelata* e *T. impetiginosa* apresentaram baixos teores de Zn e Cd na parte aérea, indicando algum mecanismo regulador da translocação desses metais da raiz para a parte aérea. Os autores verificaram ainda que as espécie *C. fissilis* e *H. courbaril* não apresentaram sinais de fitotoxicidade e nem tiveram seu crescimento afetado pela contaminação dos metais, resultados esses que corroboram com as mesmas respostas deste estudo. Isto sugere que o mecanismo de tolerância de *E. precatória* está na sua capacidade de absorver e reter o Cd nas raízes, não translocando-o para a parte aérea.

O grande acúmulo de Cd nas raízes pode estar relacionado com a alta afinidade desse metal pelas cargas negativas da parede celular das células que formam estrias de Caspary e plasmalema das células da endoderme que acabam formando uma barreira fisiológica, que por sua vez restringem o acesso do contaminante ao xilema, e conseqüentemente reduz sua translocação para a parte aérea da planta (SEREGIN et al., 2004). Segundo Gilberti (2012), o Cd pode ser compartimentalizado no vacúolo ou quelatado no citoplasma, fazendo com o metal fique retido em apenas um órgão da planta, diminuindo a chance de haver translocação do contaminante para os tecidos aéreos.

Vale ressaltar que nem todos os metais pesados são igualmente retidos nas raízes das diferentes espécies, ou seja, a tolerância a um determinado elemento não garante, necessariamente, a tolerância a outro (ANTOSIEWICZ, 1992). Fatores como estágio de desenvolvimento da planta, tempo de exposição ao elemento e as diferentes espécies químicas dos elementos interferem nos teores dos elementos nas diferentes partes da planta (ALLOWAY, 1995).

A regulação da absorção de metais pesados na rizosfera, o acúmulo desses nas raízes, desde que preservada sua integridade e funções primárias, e a baixa translocação para a parte aérea são considerados mecanismos pelos quais o sistema radicular pode contribuir para a tolerância de espécies a metais pesados (ARDUINI et al., 1996). Espécies de plantas que apresentam boa acumulação de metais em sua estrutura foliar são consideradas fitoextratoras, enquanto que as que fixam em maior quantidade em seu sistema radicular são consideradas fitoestabilizadoras (SILVA et al., 2019). Essas duas classificações, em qualquer situação, são indicações que a espécie é ideal para programas de fitorremediação, embora a característica de fitoestabilizadora apresente como vantagem a retenção do elemento por maior tempo, uma vez que os metais acumulados no sistema foliar apresentam maior rotatividade, voltando para o ambiente em menor tempo (SILVA, 2016).

Dentro dessa condição, quando comparado o comportamento de *E. precatória* em translocar Cd do solo para a parte aérea em relação a translocação para o sistema radicular, essa espécie apresentou indicadores de fitoestabilizadora, uma vez que sua eficiência em translocar para o sistema radicular foi alta e maior que em relação ao transporte para a parte aérea. Chaves et al. (2010), obtiveram resultados semelhantes avaliando capacidade extratora de Cu e Zn por mamona em delineamento inteiramente casualizado. Os acúmulos de Cu e Zn nas plantas foram maiores nas raízes do que nas folhas.

A eficiência das plantas acumularem contaminante através do processo de fitorremediação foi avaliada pela análise dos Fatores de Bioacumulação (FB), razão entre a concentração do metal na biomassa da planta e do meio contaminada; e Fator de Translocação (FT) razão entre os teores do contaminante na parte aérea e da raiz (Tabela 5).

Tabela 5. Concentração de Cd em diferentes tecidos (raiz e parte aérea), Fator de Bioacumulação e Fator de Translocação do metal após 40 dias de plantio de *E. precatoria* em casa de vegetação.

TRATAMENTO	CONCENTRAÇÃO DE METAL NOS TECIDOS (mg/kg ⁻¹)		FB	FT
	RAIZ	P. AÉREA		
T1	6,17b	0,02a	0,0023a	0,0032a
T2	0,02a	0,02a	---	---
T3	8,05c	0,02a	0,0023a	0,0025b
T4	0,02a	0,02a	---	---

T1 = 30% Matéria Orgânica + 40% Areia + 30% Argila + Contaminante (Cd); T2 = 30% Matéria Orgânica + 40% Areia + 30% Argila; T3 = 55% Areia + 45% Argila + Contaminante (Cd); T4 = 55% Areia + 45% Argila. Letras minúsculas diferentes significam diferenças estatísticas dentro de cada coluna.

O Fator de Translocação (FT), este representa a capacidade que as plantas têm em translocar e acumular metais na parte aérea. Ele é um índice importante para a caracterização de espécies com potencial de fitoextração, quando o objetivo é de colher o material vegetal produzido, retirando assim o contaminante do meio onde ele se encontra (solo ou água). Neste índice é determinada a concentração translocada para a parte aérea em relação à concentração acumulada nas raízes.

Em relação ao cádmio observamos um maior Fator de Translocação no tratamento T1. Mesmo assim o valor obtido para a translocação corresponde apenas a uma pequena parte do valor acumulado na raiz o que caracteriza esta planta como uma planta altamente especializada na fitoestabilização em ambientes contaminados com cádmio.

O Fator de Bioacumulação (FB) correlaciona a concentração de metal encontrada nos tecidos das plantas com o teor do metal disponível no ambiente de desenvolvimento. Foi observado que os Fatores de Bioacumulação tratamentos contaminados com o Cd, o que possibilita concluir que esta espécie atua mais eficientemente como fitoestabilizadora que como fitoextratora para Cd (Tabela 5).

Tanto o Fator de Translocação como o Fator de Bioacumulação obtidos são influenciados pela relação entre a concentração acumulada nas raízes e a concentração acumulada na parte aérea. A Tabela 5 mostra que a concentração média de cádmio obtida para raiz foi superior a parte aérea. O que se pode observar é que há uma diferença expressiva na acumulação entre parte aérea e a raiz e para o cádmio, sendo que a acumulação desses metais nas raízes foi sempre maior. Zacchini et al., (2009) também observou que em média, a acumulação de cádmio nas raízes correspondeu a 87% do total acumulado na planta parte aérea.

Pesquisas recentes Chandra et al., (2017) mostram dados semelhantes aos desta pesquisa em plantas nativas de um área na china que acumulam maiores teores Cu principalmente na raiz. Segundo Zhang et al., (2019) e Shirani et al., (2018) encontraram que a raiz da planta de melão e melancia acumula Cd em maior quantidade que a parte aérea, corroborando com os resultados deste estudo.

Soares et al., (2001) avaliando os teores, acúmulo e distribuição de metais pesados nas raízes, caule e folhas de mudas de vinte espécies arbóreas transplantadas, para mistura de solo contaminado por diversos metais pesados, observaram que as espécies *Machaerium nictidans*, *Myroxylon peruiferum*, *Piptadenia gonoacantha*, *Senna macranthera* e *Trema micrantha* acumularam, proporcionalmente, mais Zn e Cd na parte aérea do que nas raízes. Diferente dos resultados encontrados neste estudo com *E. precatória*, que acumulou o Cd nas raízes.

5.4 Concentração de Cd no solo após o período de plantio

De acordo com a Tabela 6, nota-se que nos substratos contaminados com o metal pesado (Cd), onde foi cultivada a espécie *E. precatória* ocorreu uma redução na concentração desse contaminante.

Tabela 6. Propriedades químicas do solo de cada tratamento adotado no experimento após 40 dias de cultivo de *E. precatória* em casa de vegetação.

TRATAMENTO	pH	K ⁺	Ca ⁺²	Mg ⁺²	H ⁺	Cd	
		----- cmol _c dm ⁻³ -----					mg kg ⁻¹
T1	5,8	0,36	4,13	1,71	3,2	8,56	
T2	5,7	0,39	3,96	1,55	3,4	0,05	
T3	6,1	0,18	3,06	0,78	2,3	8,77	
T4	6,3	0,15	3,31	0,78	1,9	0,02	

T1 = 30% Matéria Orgânica + 40% Areia + 30% Argila + Contaminante (Cd); T2 = 30% Matéria Orgânica + 40% Areia + 30% Argila; T3 = 55% Areia + 45% Argila + Contaminante (Cd); T4 = 55% Areia + 45% Argila.

Os tratamentos T2 e T4 apresentaram baixos teores de Cd, como não houve adição de Cd nesses tratamentos, esses valores correspondem ao teor de metal presente no substrato amostrado em estudo. Os tratamentos T1 e T3, por sua vez exibiram valores maiores de Cd, uma vez que esses tratamentos receberam altas dosagens do contaminante para análise da capacidade de *E. precatória* em desenvolver-se em substratos com elevados teores desse elemento, bem como sua capacidade em translocá-lo para raiz ou parte aérea.

Em todos os tratamentos que foram cultivados *E. precatória* observa-se a redução dos teores de Cd no substrato em relação aos valores iniciais antes do cultivo da espécie. No tratamento T1 houve uma redução de 31,00 mg kg⁻¹ para 8,56 mg kg⁻¹, o T3, que também levou

o Cd em sua composição, mostrou uma redução de 71,63 mg kg⁻¹ para 8,77 mg kg⁻¹. É importante destacar que uma fração do metal pode ter sofrido lixiviação através da irrigação, uma vez que o processo acontecia diariamente na casa de vegetação.

Cetesb (2014) considera que valores de Cd a partir de 3,0 mg kg⁻¹ no solo representam riscos potenciais, diretos ou indiretos, para o desenvolvimento de espécies vegetais, especialmente culturas agrícolas. Alguns estudos mostram que valores acima desse valor de referência (3,0 mg kg⁻¹) é capaz de causar fitotoxidez às plantas. Estudos têm indicado que espécies perenes, ao contrário de espécies agrícolas, são mais resistentes a elevadas doses de metais pesados, além disso, essas espécies são acumuladoras de biomassa, um ponto positivo no processo de fitorremediação de metais pesados.

Silva (2011) avaliou o efeito do Cu sobre o crescimento e qualidade de mudas das espécies florestais açoita-cavalo e aroeira-vermelha. Os resultados revelaram que as doses testadas de Cu não alteraram a qualidade de mudas de aroeira-vermelha, sendo ainda considerado benéfico para o desenvolvimento das plantas de açoita-cavalo que removeu do solo em média 64 mg kg⁻¹. O mesmo aconteceu com *E. precatória*, neste estudo, pois durante o monitoramento do experimento foi possível observar que, mesmo nos tratamentos que levaram alta dosagem do Cd o desenvolvimento das mudas não foi afetado.

Soares et al. (2000) ao avaliar o efeito de concentrações crescentes de metal pesado em mudas de *Eucalyptus maculata* e *Eucalyptus urophylla* observaram que altas concentrações do contaminante não causaram redução na absorção e translocação de outros micronutrientes, não representando mecanismo de fitotoxidez desse metal. Santos et al. (2010), no mesmo sentido, analisando mudas florestais em experimento, não encontraram sinais visíveis de fitotoxidez, e consideraram essa característica como um dos indicadores de espécies fitorremediadora.

A tolerância das plantas aos metais pesados tem sido bastante documentada em espécies herbáceas e raramente com espécies arbóreas (MARQUES et al., 2000). Mesmo sem estudos aprofundados de caracteres genéticos para tolerância de metais pesados, algumas espécies de árvores podem sobreviver em condições de excesso de metais no solo, como indicam os resultados deste trabalho, embora por um curto período de tempo estudado.

Borin (2010) ao estudar fitorremediação de Cd e Zn por *Amaranthaceae* constataram que a espécie *Alternanthera* sp. é hiperacumuladora de cádmio, indicadora de zinco e pode ser utilizada em programas de fitorremediação para estabilizar áreas contaminadas com altas concentrações destes elementos. A espécie escolhida para este estudo também não apresentou sinais de fitotoxidez e mostrou-se eficiente em acumular Cd apenas no sistema radicular, o que

passa a ser um ponto positivo, pois *E. precatória* produz um fruto que é bastante consumido por seres humanos.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A contaminação dos substratos foi acima dos valores permitidos pela CETESB, provavelmente devido a metodologia utilizada para contaminação não ter sido a mais adequada. Possivelmente a espécie *E. precatória* é tolerante ao Cd, porém são necessárias repetições utilizando substratos uniformemente contaminados.

Embora não seja possível concluir que a espécie é tolerante ao Cd, os resultados da pesquisa mostraram que nas condições testadas não houve inibição no incremento de biomassa de *E. precatória*, e mesmo com a elevada concentração do contaminante a espécie não apresentou sinais de toxicidade.

Observou-se a redução na concentração do Cd no substrato e absorção de Cd pelas raízes de *E. precatória*, todavia grande parte da redução do contaminante possivelmente ocorreu por lixiviação devido aos vasos utilizados no experimento possuírem aberturas em suas extremidades para drenagem de água.

A matéria orgânica influenciou significativamente a produção de biomassa seca da raiz e parte aérea de *E. precatória* cultivada nos substratos que levaram matéria orgânica em sua composição.

A espécie *E. precatória* demonstrou durante os 40 dias de experimento acúmulo de Cd no sistema radicular, porém não foi possível observar acúmulo do contaminante na parte aérea, sendo este um dado promissor no que tange a segurança alimentar. No entanto são necessários estudos para comprovar a eficácia a longo prazo.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABDANUR, A. **Remediação de solo e água subterrânea contaminados por Hidrocarbonetos de petróleo: estudo de caso na refinaria de Duque de Caxias/RJ.** Dissertação de Mestrado (Mestrado em Ciências do Solo) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 143p. 2005.
- ACCIOLY, A. M. A.; SIQUEIRA, J. O.; NOVAIS, R. F.; ÁLVARES, V. H.; SCHAEFER, C. E. G. R. Contaminação química e biorremediação do solo. **Tópicos em ciência do solo.** Viçosa, p. 299-352, 2000.
- ALCANTARA, B. K.; CARVALHO, M. E. A.; GAZIOLA, S. A.; B, K. L. R.; PIOTTO, F. A.; JACOMINO, A. P.; AZEVEDO, R. A. Tolerance of tomato to cadmium-induced stress: analyzing cultivars with different fruit colors. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 28, p. 26172-26181, 2021.
- ALCANTARA, H. G. **Fitorremediação de solos contaminados por metais pesados.** Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Ambiental) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campo Mourão, 46p., 2017.
- ALLOWAY, B. J.; AYERS, D. C. **Chemical principles of environmental pollution.** 2 ed. CRC Press. 396 p. 1996.
- ALLOWAY, B.J. **Heavy metals in soils.** 2 ed. New York: Blackie Academic & Professional. 368p. 1995.
- ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; GONÇALVES, J. L. M.; SPAROVEK, G. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711-728, 2013.
- ANDRADE, S. A. L.; JORGE, R. A.; SILVEIRA, A. P. D. Cadmium effect on the association of jackbean (*Canavalia ensiformis*) and arbuscular mycorrhizal fungi. **Scientia Agricola**, v. 62, n. 4, p. 389-394, 2005.
- ANDRADE, A. F. M de; SOBRINHO, N. M. B. do A.; MAZUR, N. Teor de zinco, cádmio e chumbo em plantas de arroz em solos incubados com resíduo siderúrgico. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental.** v.14, n.10, p.1087–1093, 2010
- ANDREOLI, C. V.; ANDREOLI, F. N.; JUSTI JUNIOR, J. Formação e características dos solos para o entendimento de sua importância agrícola e ambiental. **Complexidade: redes e conexões do ser sustentável.** Curitiba, p. 511-529, 2014.
- ANGELIS, C. D.; GALDIERO, M.; PIVONELLO, C.; SALZANO, C.; GIANFRILLI, D.; PISCITELLI, P.; LENZI, A.; COLAO, A.; PIVONELLO, R. The enviroment and male reproduction: The efect of cadmium exposure on reproductive function and its implication in fertily. **Reproductive Toxicology**, V. 73, n. 105, p. 105-127, 2017.
- ANTOSIEWICZ, D. M. Adaptation of plants to an environment polluted with heavy metals. **Acta Societatis Botanicorum Polinae**, v.61, p. 281-299, 1992.
- ARDUINI, L.; GODBOLD, D. L.; ONNIS, A. Cadmium and copper uptake and distribution in Mediterranean tree seedlings. **Physiologia Plantarum**, v.97: p. 111-117, 1996.

ARUMUGAM, G. RAJENDRAN, R.; GANESAN, A.; SETHU, R. Bioaccumulation and translocation of heavy metals in mangrove rhizosphere sediments to tissues of *Avicenia marina* - A field study from tropical mangrove forest. **Environmental Nanotechnology, Monitoring and Management**, v. 10, p. 272-279. 2018.

ASSUNÇÃO, S. J. R. **Seleção de plantas para fitorremediação de chumbo, cádmio e zinco, de uma área contaminada na bacia do rio Subaé**. Dissertação (Mestrado em Solos e Qualidade de Ecossistema) - Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, Cruz das Almas, 90p., 2012

BIONDI, C. M. **Teores naturais de metais pesados nos solos de referência do Estado de Pernambuco**. Tese (Doutorado em Solos) - Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife, 70p., 2010.

BORIN, A. L. D. C. **Fitorremediação de cádmio e zinco por *Amaranthaceae***. Tese de Doutorado (Doutorado em Recursos Ambientais e Uso da Terra) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 169p., 2010.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente – MMA; Superintendência da Zona Franca de Manaus – SUFRAMA; Serviço Brasileiro de Apoio as Micros e Pequenas Empresas – SEBRAE; Grupo de Trabalho Amazônico – GTA. **Produtos Potenciais da Amazônia**. v.19, 50p. Manaus, 1998.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente (MMA). Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). **Resolução CONAMA Nº 420, de 28 de dez. 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 União. Brasília, DF: Imprensa Oficial.

BROOKS, R.R. Phytoremediation by volatilisation. In Brooks, R.R. **Plants that hyperaccumulate heavy metals**, CAB International, Walling-ford, 289 p., 1998.

CABRAL, C.M.; SANTOS, J.B. Grupo INOVAHERB: excelência em pesquisas sobre fitorremediação de ambientes com resíduos de herbicidas no Brasil. Revista **Científica Vozes dos Vales**, Minas Gerais, n. 9, p. 1-11, 2016.

CARDOSO, P. F.; MOLINA, S. M. G.; PEREIRA, G. J. G.; VITÓRIA, A. P.; AZEVEDO, R. A. Response of rice inbred lines to cadmium exposure. **Journal Plant Nutrition**, v. 25, n. 5, p. 927-944, 2002.

CASTRO, A. O extrativismo do açaí no Amazonas. In: **Relatório de resultados do projeto de pesquisa: extrativismo na Amazônia Central, viabilidade e desenvolvimento**. Manaus: INPA-CNPq/ORSTOM, 1992. p. 779-782.

CASTRO, A.; BOVI, M. L. A. Assaí. In: Clay, J. W.; Clement, C. R. (Eds.). Selected species and strategies to enhance income generation from Amazonian forests. FAO **Forestry Paper**. Rome. p.58-67, 1993.

CETESB, COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Relatório de áreas contaminadas do Estado de São Paulo**. São Paulo: Cetesb, 2014.

CHANDRA, R.; YADAV, S.; YADAV, S. Phytoextraction potential of heavy metals by native wetland plants growing on chlorolignin containing sludge of pulp and paper industry. **Ecological Engineering**, v. 98, p. 134-145. 2017.

CHAVES, E.V. **Absorção de metais pesados de solos contaminados do aterro sanitário e pólo industrial de Manaus pelas espécies de plantas *Senna multijuga*, *Schizolobium amazonicum* e *Caesalpinia echinata***. Tese de Doutorado (Doutorado em Biotecnologia) - Universidade Federal do Amazonas, Manaus, 87p., 2008.

CHAVES, L. G. H.; MESQUITA, E. F.; ARAUJO, D. L.; FRANÇA, C. P. Acúmulo e distribuição de cobre e zinco em mamoeira cultivar BRS Paraguaçu e crescimento da planta. **Engenharia Ambiental**, v. 7, n. 3, p. 263-277, 2010.

CHOU, T.; CHAO, Y.; HUANG, W.; HONG, C.; KAO, C. H. Effect of magnesium deficiency on antioxidant status and cadmium toxicity. **Journal of Plant Physiology**, v. 168, p. 1021-1030, 2011.

COLLET, M. L.; DORIGON, E. B.; SPRICIGO, J. G.; NAIBO, G.; ALVES, M. V. Fitorremediação de áreas de lixão desativadas com *Phaseolus vulgaris* e *Lactuca sativa* obtidas de solo contaminado por metais pesados (cobre e zinco). **Unoesc & Ciência**, v. 9, n. 2, 161-168, 2018.

Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental. **Relatório Estabelecimento de Valores Orientadores para Solos e Águas Subterrâneas no Estado de São Paulo**. São Paulo: CETESB; 2005. Disponível em <<https://cetesb.sp.gov.br/solo/wp-content/uploads/sites/18/2014/12/valores-orientadores-nov-2014.pdf>>. Acesso em 25 jul. 2022.

CONAMA. Resolução no 420, de 28/12/2009. In: **Resoluções do CONAMA**. Brasília: Ministério do Meio Ambiente, p. 899-915, 2012.

CONCIANE, R. **Estudo comparativo da mobilidade de contaminantes inorgânicos em solos laterítico e não laterítico**. Tese de Doutorado (Doutorado em Geotecnia) - Universidade de Brasília, Brasília, 86p., 2016.

CUNNINGHAM, S.D.; ANDERSON, T. A.; SCHWAB, A. P. Phytoremediation of soils contaminated with organic pollutants. **Advances in Agronomy**. v. 56, p. 55-114, 1996.

DEUCHER, M. T. **Retenção e mobilidade de cádmio em solos: revisão e estudo de caso em ambiente tropical**. Dissertação de Mestrado (Mestrado em Geoquímica e Geotectônica) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 80p., 2001.

DOUMETT, S.; LAMPERI, L.; CHECCHINI, L.; AZZARELLO, E.; MUGNAI, S.; MANCUSO, S. Heavy metal distribution between contaminated soil and *Paulownia tomentosa*, in a pilot-scale assisted phytoremediation study: Influence of different complexing agents. **Chemosphere**, v. 72, p. 1481-1490, 2008.

DOURADO, M. N.; SOUZA, L. A.; MARTINS, P. F.; PETERS, L. P.; PIOTTO, F. A.; AZEVEDO, R. A. *Burkholderia* sp. SCMS54 triggers a global stress defense in tomato enhancing cadmium tolerance. **Water, Air, and Soil Pollution**, v. 225, p. 1-16, 2014.

EMBRAPA. EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - **Manual de métodos de análises de solo**. 2. ed. Rio de Janeiro, 212p. 1997.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. **Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes**. 2. ed. Brasília, DF, 627p. 2009.

EPA. **Introduction of phytoremediation**. EPA/600/R-999/107, 94 p., 2000.

FENG, J.; SHI, Q.; WANG, X.; WEI, M.; YANG, F.; XU, H. Silicon supplementation ameliorated the inhibition of photosynthesis and nitrate metabolism by cadmium (Cd) toxicity in *Cucumis sativus* L. **Scientia Horticulturae**, v. 123, p. 521–530, 2010.

FOJTOVÁ, M.; KOVARÍK, A. Genotoxic effect of cadmium is associated with apoptotic changes in tobacco cells. **Plant, Cell and Environment**, v. 23, p. 531-537, 2000.

FORNAZIER, R. F.; FERREIRA, R. R.; VITÓRIA, A. P.; MOLINA, S. M. G.; LEA, P. J. Effects of cadmium on antioxidant enzymes activities in sugar cane. **Biologia Plantarum**, v. 45, n. 1, p. 91-97, 2002.

FRANKE, I. L.; BERGO, C. L.; AMARAL, E. F.; ARAÚJO, E. A. **Aptidão natural para o cultivo de açaí (*Euterpe oleracea* Mart. e *Euterpe precatoria* Mart.) no Estado do Acre**. Ministerio da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. EMBRAPA- Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, ISSN 0100-8668. Comunicado Técnico Nº 142, dez/2001, p. 1-5.

GALEANO, G. **Las palmas de la región de Araracuara**. Estudios en la Amazonia colombiana. 2ª edição, Bogotá: Facultad de Ciencias Naturales, Universidad Nacional de Colombia. Segunda Edición. p. 96-97. 1992.

GALLEGO, S. M.; PENA, L. B.; BARCIA, R. A.; AZPILICUETA, C. E.; IANNONE, M. F.; ROSALES, E. P.; ZAWOZNIK, M. S.; GROPPA, M. D.; BENAVIDES, M. P. Unravelling cadmium toxicity and tolerance in plants: insight into regulatory mechanisms. **Environmental and Experimental Botany**, v. 83, p. 33-46, 2012.

GILBERTI, L.H.; Potencial para o uso da espécie nativa, *Baccharis Dracunculifolia* Dc (Asteraceae) na fitorremediação de áreas contaminadas por arsênio. Dissertação (Mestrado em Biologia Vegetal) - Universidade de Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 68p., 2012.

GRATÃO, P. L.; MONTEIRO, C. C.; CARVALHO, R. F.; TEZOTTO, T.; CARVALHO, R. F.; ALVES, L. R.; PETERS, L. P.; AZEVEDO, R. A. Cadmium stress antioxidant responses and root-to-shoot communication in grafted tomato plants. **Biomaterials**, v. 28, p. 803–816, 2015.

GRATH, S. P. **Phytoextraction for soil remediation**. In Brooks, R. R., Plants that Hyperaccumulate Heavy Metals, CAB International, Wallingford, 261p., 1998.

GUIMARÃES, M. A.; SANTANA, T. A.; SILVA, E. V.; LENZEN, I. L.; LOUREIRO, M. E. Toxicidade e tolerância ao cádmio em plantas. **Revista Trópica**, v.1, n. 3, p. 58-68, 2008.

HALL, J. L. Cellular mechanisms for heavy metal detoxification and tolerance. **Journal of Experimental Botany**, v. 53, n. 366, p. 1-11, 2002.

- HENDERSON, A. The genus *Euterpe* in Brazil. In: REIS, M.S.; REIS, A. (Eds.). ***Euterpe edulis Martius – (Palmiteiro) biologia, conservação e manejo***. Itajaí: Herbário Barbosa Rodrigues, 2000. p.1-22.
- HUANG, X. D.; ELALAWI, Y.; GURSKA, J.; GLICK, B.R.; GREENBERG, B.M. A multi-process phytoremediation system for decontamination of persistent total petroleum hydrocarbons (HTPs) from soils. ***Journal Microchem***, v. 81 p. 139-147, 2005.
- KABATA, P. A.; PENDIAS, H. ***Trace elements in soils and plants***. 3^aed. Boca Raton, Flórida: CRC. 413p., 2001.
- KAHLE, H. Response of roots of trees to heavy metals. ***Environmental and Experimental Botany***, v.33, n.1, p.99-119, 1993.
- KEDE, M. L. F. M.; MOREIRA, J. C.; MAVROPOULOS, E.; ROSSI, A. M.; BERTOLINO, L. C.; PEREZ, D. V.; ROCHA, N. C. C. Estudos do comportamento do chumbo em latossolos brasileiros tratados com fosfatos: contribuições para a radiação de sítios contaminados. ***Química Nova***, v. 31, n. 3, p. 579-584, 2998.
- KIKHAM, M. B. Cadmium in plants on polluted soils: effects of soil factors hyperaccumulation, and amendments. ***Geoderma***, v. 137, n1/2, p. 19-32, 2006.
- LAMEGO, F. P.; VIDAL, R. A. Fitorremediação: Plantas como agentes de despoluição?. ***Revista de Ecotoxicologia e Meio Ambiente***, v. 17, p. 9-18, 2007.
- LEITMAN, P.; SOARES, K.; HENDERSON, A.; NOBLICK, L.; MARTINS, R. C. 2015 Arecaceae in ***Lista de Espécies da Flora do Brasil***. Jardim Botânico do Rio de Janeiro. Disponível em: <<http://floradobrasil.jbrj.gov.br/jabot/FichaPublicaTaxonUC/FichaPublicaTaxonUC.do?id=FB15711>>. Acesso em: 24 mai. 2022.
- LEVI-MINZ, R.; SOLDATINI, G. F.; RIFFALDI, R. Cadmium adsorption by soils. ***Journal of Soil Science***, v. 27, n. 1, 10-15, 1976.
- LIMA, V. C. ***Fundamentos de pedologia***. Fundamentos de pedologia Curitiba: Universidade Federal do Paraná, Setor de Ciências Agrárias, Departamento de Solos e Engenharia Agrícola, 343p., 2001.
- LINDINO, C. A.; TOMCZAK, A. C. G. J. Fitorremediação de solos utilizando *Crotalaria spectabilis* para remoção de cádmio e chumbo. ***Scientia Agraria Paranaensis***, v. 11, n. 4, p. 25-32, 2011.
- LOZI, A. A. ***Toxicidade comparada dos metais pesados, arsênio, cádmio, chumbo, cromo e níquel, sobre parâmetros reprodutivos de camundongos machos adultos após exposição aguda***. Dissertação de Mestrado (Mestrado em Biologia Animal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 77p., 2019.
- MARQUES, M.; AGUIAR, C.R.C.; SILVA, J.J.L.S. Desafios, técnicas e barreiras sociais, econômicas e regulatórias na fitorremediação de solos contaminados. ***Revista Brasileira de Ciência do Solo***, v. 35, p.1-11, 2011.

MARQUES, T. C. L. S. M.; SIQUEIRA, J. O.; MOREIRA, F. M. S. 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.

MENDONÇA, J. F. B. Solo: Substrato da vida. **Embrapa Recursos Genéticos e Biotecnologia**. Brasília, 156 p., 2006.

MERKL, N.; SCHULTZEK, R.; ARIAS, M. Effect of the tropical grass *Brachiaria brizantha* (Hochst. ex A. Rich.) Stafon microbial population on the activity in petroleum-contaminated soil. **Microbiol. Res.** **161**, p.80-91, 2006.

METWALLY, A.; FINKEMEIER, I.; GEORGI, M. & DIEZT, K. J. Salicylic acid alleviates the cadmium toxicity in barley seedlings. **Plant Physiology**, v. 132, n. 1, p. 272-281, 2003.

MILANEZ, B. A co-incineração de resíduos em fornos de cimento: riscos para a saúde e o meio ambiente. **Ciência e Saúde Coletiva**. Dez. 2007. Acessado em: 28 de mar. 2022. Disponível em: <http://www.cienciaesaudecoletiva.com.br/artigos/a_coincineracao-deresiduos-em-fornos-de-cimento-riscos-para-a-saude-e-o-meioambiente/1482?id=1482&id=1482>.

MILLER, R. R. **Phytoremediation**. 1996. Acessado em: 30 de março de 2022. Disponível em: <<http://www.gwrtac.org/>>.

MITCHELL, C. D.; FRETZ, T. A. Cadmium and zinc toxicity in seedlings white pine, red maple, and Norway spruce. **Ohio Agricultural Research and Development**, v. 81, n 1, p. 21-25, 1977.

MONTEIRO, M.T. **Fitorremediação de rejeito contaminado proveniente do canal do fundão, na Baía da Guanabara-RJ**. Tese de Doutorado (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 317p. 2008.

MORAIS, F. I.; PAGE, A. L.; LUND, L. J. The effect of pH, salt concentrations, and nature of electrolytes on the charge characteristics of Brazilian tropical soils. **Soil Science Society of America Journal**, v. 40, n. 4, 521-527, 1976.

MOSCHEM, J. C.; GONÇALVEZ, P. R. Impacto toxicológico de metais pesados: uma análise de efeitos bioquímicos e celulares. **Health and Biosciences**, v. 1, n. 2, p. 88-100, 2020.

NALON, L. **Potencial do eucalipto na fitorremediação de um solo contaminado por chumbo**. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) - Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias Campus de Jaboticabal, Jaboticabal, 94p., 2008.

NEVES, E. O. **Composição de minerais em caldo de cana-de-açúcar e em vinho tinto artesanal de mesa**. Tese de Doutorado (Doutorado em Ciência e Tecnologia de Alimentos) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, Minas Gerais, 55p. 2004.

NOGUEIROL, R. C.; MONTEIRO, F. A.; GRATÃO, P. L.; SILVA, B. K. A.; AZEVEDO, R. A. Cadmium application in tomato: nutritional imbalance and oxidative stress. **Water Air Soil Pollut**, v. 227, n. 210, 2016.

OLIVEIRA, D. G. **Potencial fitorremediador de Lonchocarpus cultratus aos metais manganês e chumbo**. Dissertação de Mestrado (Mestrado em Biodiversidade e Conservação) – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano, Rio Verde, 82p., 2018.

OLIVEIRA, J. A.; CAMBRAIA, J.; CANO, M. A. O.; JORDÃO, C. P. Absorção e acúmulo de cádmio e seus efeitos sobre o crescimento relativo de plantas de salvinia e aguapé. **Revista Brasileira de Fisiologia Vegetal**, v. 13, n.3, p. 329-341, 2001.

OLIVEIRA, M. S. P.; ALMEIDA, R. S. Potencial econômico de algumas palmeiras nativas da Amazônia. In: ENCONTRO AMAZÔNICO DE AGRÁRIAS, 6., 2014. Pará. **Anais...** Pará: UFRA, 2014. v. 6, p. 1-19.

OLIVEIRA, T. S. **Metais pesados como indicadores de materiais de origem de solos**. Tese (Doutorado em Solos) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 128 p., 1996.

PAJEVIC, S.; BORISEV, M.; NIKOLIC, N.; KRISTIC, B.; PILIPOVIC, A.; ORLOVIC, S. Phytoremediation capacity of poplar (*Populus spp.*) and willow (*Salix spp.*) clones in relation of photosynthesis. **Archives of Biological Science Belgrade**, v. 61, n. 2, p. 239-247, 2009.

PEREIRA, A.C.C.; RODRIGUES, A.C.D.; SANTOS, F.S.; GUEDES, J.N.; SOBRINHO, N.M.B.A. Concentração de metais pesados em espécies arbóreas utilizadas para revegetação de área contaminada. **Revista Ciência Agronômica**, v. 43, n. 4, p. 641-647, 2012.

PEREIRA, G. J. G.; MOLINA, S. M. G.; LEA, P. J.; AZEVEDO, R. A. Activity of antioxidant enzymes in response to cadmium in *Crotalaria juncea*. **Plant Soil**, v. 239, n.1, p. 123-132, 2002.

PIO, M. C. S.; SOUZA, K. S.; SANTANA, G. P. Capacidade de *Lemna aequinoctialis* para acumular metais pesados de água contaminada. **Acta Amazônica**, v. 43, n. 2., p. 203-210, 2013.

PLACEK, A.; GROBELAK, A.; KACPRZAK, M. Improving the phytoremediation of heavy metals contaminated soil by use of sewage sludge. **International Journal of Phytoremediation**, v. 18, n. 6, p. 605-618, 2015.

RENAULT, S.; SZCZERSKI, C.; SAILEROVA, E.; FEDIKOW, M. A. F.; Reporto f activities, Manitoba Industry e conomic development and mines. **Manitoba Geological Survey**, 89p., 2004.

RIZZO, A. C. L.; LEITE, S. G. F.; SORIANO, A. U.; SANTOS, R. L. C.; SOBRAL, L. G. S. Biorremediação de solos contaminados por petróleo: ênfase no uso de biorreatores. **Série Tecnologia Ambiental**, n. 37, 76 p., 2006.

ROCHA, E. Potencial ecológico para o manejo de frutos de açajeiro (*Euterpe precatoria* Mart.) em áreas extrativistas no Acre, Brasil. **Acta Amazonica**, v. 34, n. 2, p. 237-250, 2004.

RODRIGUES, A. C. D.; SANTOS, A. M.; SANTOS, F. S.; PEREIRA, OBRINHO, N. M. B. A. Mecanismos de respostas das plantas à poluição por metais pesados: A. C. C. Spossibilidade do uso de macrófitas para remediação de ambientes aquáticos contaminados. **Revista Virtual de Química**, v. 8, n. 1, p. 262-276, 2016.

ROMEIRO, S.; LAGÔA, A. M. M. A.; FURLANI, P. R.; ABREU, C. A.; PEREIRA, B. F. F. Absorção de chumbo e potencial de fitorremediação de *Canavalia ensiformes*. **Bragantia**, v. 66, n. 2, p. 327-334, 2007.

- SAMPAIO, C. J. S. **Estudos de fitorremediação de solos contaminados com diesel utilizando *Rhizophoramangle L.* e rizobactérias promotoras do crescimento de plantas.** Dissertação de Mestrado (Mestrado em Biotecnologia) - Universidade Federal da Bahia, 72p., 2015.
- SANTI, A.M.M.; SEVÁ FILHO, A.O. **Combustíveis e riscos ambientais na fabricação decimento; casos na Região do Calcário ao Norte de Belo Horizonte e possíveis generalizações.** II Encontro Nacional de Pós-Graduação e Pesquisa em Ambiente e Sociedade, Campinas, ANPPAS p. 1-18, 2004.
- SANTIBÁÑEZ, C.; VERDUGO, C.; GINOCCHIO, R. Phytostabilization of copper mine tailings with biosolids: implications for metal uptake and productivity of *Lolium perenne*. **Science of the Total Environment**, v. 395, n. 1, p. 1-10, 2008.
- SANTOS, G. C. G.; RODELLA, A. A.; ABREU, C. A.; COSACIONE, A. R. Vegetable species for phytoextraction of boron, copper, lead, manganese and zinc from contaminated soil. **Scientia Agricola, Piracicaba**, v. 67, n. 6, p.713-719, 2010.
- SANTOS, G. C. G. **Comportamento de B, Zn, Cu, Mn e Pb em solo contaminado sob cultivo de plantas e adição de fontes de matéria orgânica como amenizantes do efeito tóxico.** Tese de Doutorado (Doutorado em Agronomia) - Universidade de São Paulo, Piracicaba, 153p., 2005.
- SANTOS, H. P.; MELO, G. W. B.; LUZ, N. B.; TOMASI, R. J. **Comportamento fisiológico de plantas de aveia (*Avena strigos*) em solos com excesso de cobre.** Embrapa: Bento Gonçalves, 2004.
- SARKAR, A.; RAVINDRAN, G.; KRISHNAMURTHY, V. A brief review on the effect of cadmium toxicity: from cellular to organ level. **International Journal of Bio -Technology and Research**, v. 3, p. 17-36, 2013.
- SCHUMAN, L. M. Adsorption of Zn by Fe and Al hidrous oxides as influenced by aging and pH, **Soil Science Society of America Journal**, v. 41, n. 4, 703-706, 1977.
- SCHÜTZENDÜBEL, A.; SCHWANZ, P.; TEICHMANN, T.; GROSS. K.; LANGENFELD, H. R.; GODBOLD, D. L.; POLLE, A. Cadmium-induced changes in antioxidative systems, hydrogen peroxide content, and differentiation in scots pine roots. **Plant Physiology**, v. 127, n. 3, p. 887-898, 2001.
- SEREGIN, I.V.; SHPIGUN, L.K.; IVANOV, V.B.; Distribution and toxic effects of cadmium and lead on maize roots. **Russian Journal of Plant Physiology**, v.51, p. 525-533. 2004.
- SHARMA, P.; DUBEY, R.S. Lead toxicity in plants. **Brazilian Journal of Plant Physiology**, Londrina, v. 17, n. 1, p. 35-52, 2005.
- SHIRANI BIDABADI, S.; ABOLGHASEMI, R.; ZHENG, S. J. Grafting of watermelon (*Citrullus lanatus* cv. Mahbubi) onto different squash rootstocks as a means to minimize cadmium toxicity. **International Journal of Phytoremediation**, v. 20, n. 7, p. 730-738. 2018.
- SILVA, R. F.; LUPATINI, M.; ANTONIOLLI, Z. I.; LEAL, L. T.; JUNIOR, C. A. M. Comportamento de *Peltophorum dubium* (Spreng.) Taub. *Parapiptadenia rigida* (Benth.) Brenan e *Enterolobium contortisiliquum* (Vell.) Morong cultivadas em solo contaminado com cobre. **Ciência Florestal**, v. 21, n. 1, p.103-110, 2011.

- SILVA, T. J. **Fitorremediação em escala piloto: proposta para recuperação de solos contaminados com cobre e zinco**. Dissertação de Mestrado (Mestrado em Ciências Ambientais) – Universidade Estadual Paulista, Sorocaba, 93p. 2016.
- SILVA, T. J.; HANSTED, F.; TONELLO, P. S.; GOVEIA, D. Fitorremediação de Solos Contaminados com Metais: Panorama Atual e Perspectivas de uso de Espécies Florestais. **Revista Virtual de Química**, v. 11, n. 1, p. 18-34, 2019.
- SILVA, E.; SANTOS, P. S. GUILHERME, M. F. S. **Chumbo nas plantas: uma breve revisão sobre seus efeitos, mecanismos toxicológicos e remediação**. Tese de Doutorado (Doutorado em Ciências Biológicas – Universidade Federal de Campina Grande, Paraíba, 210 p., 2019.
- SISINNO, C. L. S.; OLIVEIRA, R. M. **Resíduos sólidos, ambiente e saúde: uma visão multidisciplinar**. Rio de Janeiro, Editora Fiocruz, 142 p., 2000.
- SOARES, ACCIOLY, A. M. A.; A MARQUES, T. C. L. L. S. M.; SIQUEIRA, J. O.; MOREIRA, F. M. S. Acumulo e distribuição de metais pesados nas raízes, caule e folhas de mudas de arvores em solo contaminado por rejeitos de indústria de zinco. **Revista Brasileira de Fisiologia Vegetal**, v.13, p. 302-315, 2001.
- SOUZA, E. P.; SILVA, I. F.; FERREIRA, L. E. Mecanismos de tolerância a estresses por metais pesados em plantas. **Revista Brasileira de Agrociências**, v. 17, n. 2-4, p. 167-173, 2011.
- TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Fisiologia vegetal**. 3. ed. Porto Alegre: Artmed, 2004. 613 p.
- TAVARES, S. R. L. **Fitorremediação em solo e água de áreas contaminadas por metais pesados provenientes da disposição de resíduos perigosos**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 371 p., 2009.
- TEIXEIRA FILHO, C. D. **Teores de metais pesados em alguns solos do estado do Ceará**. Dissertação (Mestrado em Ciências do Solo) - Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 75 p., 2016.
- TEZZOTO, T.; FAVARIN, J. L.; AZEVEDO, R. A.; ALLEONI, L. R. F.; MAZZAFERA, P. Coffee is highly tolerant to cadmium, nickel and zinc: Plant and soil nutritional status, metal distribution and bean yield. **Field Crops Research**, p. 25-34, 2012.
- TILLER, K.G. Heavy metals in soils and their environmental significance. **Advances in Soil Science**, New York, v.9, p. 113-142, 1989.
- USEPA. **Introduction to phytoremediation: EPA/600/R-99/107**. Cincinnati: National Risk Management Research Laboratory, 2000.
- VANDECASTELE, B.; LAING, G. D.; FILIP, P. Q. Differences in Cd and Zn bioaccumulation for the flood tolerance *Salix cinérea* in seasonally flooded contaminated sediments. **Science of the Total Environment**, v. 341, p. 251-263, 2005.
- VASCONCELLOS, M.; PAGLIUSO, D.; SOTOMAIOR, V. Fitorremediação: uma proposta de descontaminação do solo. **Estudos de Biologia, Ambiente e Diversidade**, v. 34, n. 83, p. 261-267, 2012.

VASSÃO, C. B. **Potencial de gramíneas (*Poaceae*) como fitorremediadoras em solo contaminado com herbicida**. Dissertação de Mestrado (Mestrado em Agronomia) – Universidade Estadual do Norte do Pará, Bandeirantes, 36p., 2019.

VITÓRIA, A. P.; LEA, P. J.; AZEVEDO, R. A. Antioxidant enzymes responses to cadmium in radish tissues. **Phytochemistry**, v. 57, n.2001, p. 710-715, 2001.

WATANABE, M. E. Phytoremediation on the brink of commercialization. **Environment Science Technology**, v.31, p.182-186, 1997.

ZACCHINI, M.; PIETRINI, F.; MUGNOZZA, G. S.; LORI, M.; PIETROSANTI, L.; MASSACCI, A. Metal Tolerance, Accumulation and translocation in Poplar and Willow Clones Treated with cadmium in Hydroponics. **Water Air Soil Pollut**, v 197, p. 23-34, 2009.

ZHANG, J.; TIAN, H.; WANG, P.; XIAO, Q.; ZHU, S.; JIANG, H. Variations in pH significantly affect cadmium uptake in grafted muskmelon (*Cucumis melo* L.) plants and drive the diversity of bacterial communities in a seedling substrate. **Plant Physiology and Biochemistry**, v. 139, p. 132-140. 2019.

ZHUANG, P.; MCBRIDE, M. B.; XIA, H.; LI, N.; LI, Z. Health risk from heavy metals via consumption of food crops in the vicinity of dabaoshan mine, South China. **Science of the Total Environment**, v. 407, n. 5, p. 1551-1561, 2009.