



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



**EFEITO DO ÁCIDO ASCÓRBICO NA MITIGAÇÃO DE
ESTRESSE EM PLANTAS DE AÇAIZEIRO SOLTEIRO
(*Euterpe precatoria* Mart.) CULTIVADAS EM SUBSTRATO
CONTAMINADO COM CÁDMIO**

GLEYCIANE LEVY DOS SANTOS

RIO BRANCO, AC
OUTUBRO/2024

GLEYCIANE LEVY DOS SANTOS

**EFEITO DO ÁCIDO ASCÓRBICO NA MITIGAÇÃO DE
ESTRESSE EM PLANTAS DE AÇAIZEIRO SOLTEIRO
(*Euterpe precatoria* Mart.) CULTIVADAS EM SUBSTRATO
CONTAMINADO COM CÁDMIO**

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

Orientadora: Profa. Dra. Berenice Kussumoto de Alcântara da Silva

RIO BRANCO, AC
OUTUBRO/2024

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Central da UFAC

S237e Santos, Gleyciane Levy dos, 1982 -

Efeito do ácido ascórbico na mitigação de estresse em plantas de açaizeiro solteiro (*Euterpe precatoria Mart.*) cultivadas em substrato contaminado com cádmio / Gleyciane Levy dos Santos; orientadora: Dr^a. Berenice Kussumoto de Alcântara da Silva. – 2024.
59 f.: il.; 30 cm.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Acre, Programa de Pós-Graduação em Ciência, Inovação e Tecnologia para a Amazônia-Cita, Rio Branco, 2024.

Inclui referências bibliográficas.

1. Amazônia. 2. Tolerância ao cádmio. 3. Ácido ascórbico. I. Silva, Berenice Kussumoto de Alcântara da (orientador). II. Título.

CDD: 509

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

**EFEITO DO ÁCIDO ASCÓRBICO NA MITIGAÇÃO
DE ESTRESSE EM PLANTAS DE AÇAIZEIRO
SOLTEIRO (*Euterpe precatoria* Mart.) CULTIVADAS
EM SUBSTRATO CONTAMINADO COM CÁDMIO**

GLEYCIANE LEVY DOS SANTOS

DISSERTAÇÃO APROVADA EM: 11/10/2024

Documento assinado digitalmente
 **BERENICE KUSSUMOTO DE ALCANTARA DA SILVA**
Data: 17/12/2024 20:08:20-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Profa.Dra. Berenice Kussumoto de Alcântara da Silva
UNIVERSIDADE FEDERAL DO ACRE

Documento assinado digitalmente
 **LEILA PRISCILA PETERS**
Data: 16/12/2024 11:05:35-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Profa. Dra. Leila Priscila Peters
UNIVERSIDADE FEDERAL DO ACRE

Documento assinado digitalmente
 **PRISCILA LUPINO GRATÃO**
Data: 12/12/2024 18:40:27-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Profa. Dra. Priscila Lupino Gratão
UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”

*Aos meus pais Raymundo Henrique Maria
do socorro (in memorian), por todo o amor,
apoio e paciência.*

*À minha avó Esmeralda (in memorian),
gratidão.*

Dedico.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente à Deus, por me conceder força e sabedoria.

Minha família, em especial aos meus pais Raimundo Henrique (*in memoriam*), e Maria do Socorro (*in memoriam*), responsáveis pela minha educação e moralidade, por terem me ensinado valores que carrego comigo em todos os momentos. Obrigada por me olhar de algum lugar.

Aos meus irmãos Olinda, Henrique e Maykon, minha sobrinha Bruna pelo apoio, amizade e atenção sempre que precisei.

À minha orientadora profa. Dra. Berenice Kussumoto de Alcântara da Silva, pela oportunidade de realizar este trabalho, por todo apoio, sabedoria, paciência e dedicação em todos os momentos que precisei.

À profa. Dra. Leila Priscila Peters e profa. Dra. Priscila Lupino Gratão por aceitarem participar da banca de defesa de dissertação.

Em especial Laryssa dos Santos Prado, todo meu reconhecimento pelo companheirismo e amizade, as quais irei ser eternamente grata.

À Neila Fernandes pela amizade, apoio e incentivo que me deu para ingressar no programa de mestrado.

Aos amigos(as) de mestrado Jerlene Martins, Rosália Nascimento, Renan Passos, grata pela amizade.

Agradeço a equipe do Laboratório de Botânica, em especial aos amigos(as) Erlangela Rocha, Pablo Henrico e Elvira Pereira. Grata pelos momentos de alegria e desafios, pela parceria e conhecimentos compartilhados.

Aos técnicos Evaldo Pessoa, do Laboratório de Diagnose e Controle de Doenças em Plantas, pelo suporte e apoio em diversos momentos durante a execução dos experimentos, e Joelton de Lima, do Laboratório de Química, pelo auxílio nas práticas laboratoriais.

Ao Marcio Lima, secretário do Programa de Pós-Graduação em Ciência, Inovação e Tecnologia para a Amazônia, pela amizade e suporte na parte burocrática.

Ao Laboratório de Microbiologia por disponibilizar os materiais para realização do experimento.

Ao Viveiro do Parque Zoobotânico (PZ) da UFAC, na pessoa do José Cláudio, por disponibilizar as plantas de açaizeiro para realização do experimento.

À Universidade Federal do Acre e ao PPG-CITA pela formação.

À CAPES pelo apoio financeiro.

Por fim, a todos que de alguma forma, direta ou indiretamente, contribuíram para o bom andamento e desenvolvimento deste trabalho, a minha gratidão.

“Porque o Senhor é o que dá a sabedoria; da sua boca é que sai o conhecimento e o entendimento”.

Provérbios 2:6

RESUMO

Euterpe precatoria é uma espécie de açaí nativo da América Central e norte da América do Sul. O principal produto extraído da espécie é a polpa, considerada um dos mais importantes produtos florestais não madeireiros do continente. No entanto, estresses abióticos como a exposição a metais pesados, tais como o cádmio, representam desafios em ambientes agrícolas e florestais. Dada a toxicidade do cádmio para uma diversidade de espécies, e a falta de estudos com relação a esse contaminante no açaizeiro solteiro, o objetivo deste trabalho foi avaliar o efeito do ácido ascórbico no processo de indução de tolerância em plantas de açaizeiro solteiro (*E. precatoria* Mart.) cultivadas em substrato contaminado com cádmio. O experimento consistiu na utilização de mudas tratadas com ácido ascórbico e não tratadas crescendo em vasos com solo contaminado com cádmio e sem cádmio. Visando entender a resposta antioxidante das plantas sob estresse com cádmio, parâmetros como comprimento da parte aérea e raiz, diâmetro do coleto, número de folhas, atividade fotossintética, teores de clorofila e carotenoides, quantificação de peróxido de hidrogênio e peroxidação lipídica e atividade de catalase foram analisados. Com este estudo, concluímos que o ácido ascórbico induziu resistência das plantas, não havendo diferença significativa em todas as variáveis nos tratamentos avaliados. Com isso, conclui-se que o cádmio não teve efeito nos parâmetros de crescimento das plantas de açaizeiro solteiro, indicando a tolerância da espécie ao metal pesado.

Palavras-chave: Amazônia, tolerância ao cádmio, ácido ascórbico, acúmulo de metais pesados, *seedling priming*, estresse oxidativo.

ABSTRACT

Euterpe precatoria is a species of açai native to Central America and northern South America. The main product extracted from this species is its pulp, considered one of the most important non-timber forest products on the continent. However, abiotic stresses, such as exposure to heavy metals like cadmium, pose challenges in agricultural and forest environments. Given cadmium's toxicity to a variety of species and the lack of studies on this contaminant in single-stem açai, the objective of this study was to evaluate the effect of ascorbic acid on the process of inducing tolerance in single-stem açai plants (*E. precatoria* Mart.) grown in cadmium-contaminated substrate. The experiment involved the use of seedlings treated with ascorbic acid and untreated seedlings growing in pots with cadmium-contaminated and cadmium-free soil. To understand the antioxidant response of the plants under cadmium stress, parameters such as shoot and root length, stem diameter, leaf number, photosynthetic activity, chlorophyll and carotenoid content, quantification of hydrogen peroxide and lipid peroxidation, and catalase activity were analyzed. From this study, we concluded that ascorbic acid induced plant resistance, as there were no significant differences in all the evaluated variables across the treatments. Therefore, we conclude that cadmium did not affect the growth parameters of single-stem açai plants, indicating the species' tolerance to the heavy metal.

Keywords: Amazon, cadmium tolerance, ascorbic acid, accumulation of heavy metals, seedling priming, oxidative stress.

LISTA DE FIGURAS

		Pág.
Figura 1.	Horta Experimental da Universidade Federal do Acre (UFAC). (A) vista frontal das estufas; (B) e (C) estufa onde o experimento foi instalado.....	27
Figura 2.	Plântulas de <i>Euterpe precatoria</i> Mart. obtidas no Viveiro do Parque Zoobotânico da Universidade Federal do Acre (UFAC). (A) plântulas cultivadas no solo do viveiro; (B) bandejas onde ocorreu o transporte das plântulas.....	27
Figura 3.	Processo de repique das plântulas de <i>Euterpe precatoria</i> Mart. (A) vaso de polietileno com substrato; (B) plântula de açazeiro solteiro antes do repique; (C) plântulas repicadas nos vasos.....	28
Figura 4.	Esquema de disposição dos tratamentos experimentais a partir da combinação dos fatores A e B no delineamento em blocos casualizados (DBC) em esquema fatorial.....	30
Figura 5.	Disposição dos blocos na área experimental, destacando a casualização dos tratamentos dentro dos blocos.....	31
Figura 6.	Substrato composto coletado para as análises químicas e de biodisponibilidade do metal pesado (Cd).....	32
Figura 7.	Determinação dos teores de clorofila e carotenoides. (A) tubo de ensaio coberto com papel filme; (B) solução de acetona 70% contendo os pigmentos fotossintéticos após 48 h a 4 °C; (C) cubeta contendo os pigmentos fotossintéticos para leitura em espectrofotômetro.....	33
Figura 8.	Análises bioquímicas com leitura em espectrofotômetro. (A) peroxidação de lipídeos; (B) quantificação de peróxido de hidrogênio.....	35
Figura 9.	Comprimento da parte aérea e raiz (cm) das plantas de <i>Euterpe precatoria</i> Mart. submetidas ao estresse com cádmio (ns = não significativo). CCCA: com cádmio e com ácido ascórbico, CCSA: com cádmio e sem ácido ascórbico, SCCA: sem cádmio e com ácido ascórbico, e SCSA: sem cádmio e sem ácido ascórbico.....	37
Figura 10.	Plantas de <i>Euterpe precatoria</i> Mart. submetidas ao estresse com cádmio (ns = não significativo). (A) CCCA: com cádmio e com ácido ascórbico, (B) CCSA: com cádmio e sem ácido ascórbico, (C) SCCA: sem cádmio e com ácido ascórbico, e (D) SCSA: sem cádmio e sem ácido ascórbico.....	37

Figura 11.	Diâmetro do coleto (mm) das plantas de <i>Euterpe precatoria</i> Mart. submetidas ao estresse com cádmio (ns = não significativo). CCCA: com cádmio e com ácido ascórbico, CCSA: com cádmio e sem ácido ascórbico, SCCA: sem cádmio e com ácido ascórbico, e SCSA: sem cádmio e sem ácido ascórbico.....	38
Figura 12.	Índices SPAD das plantas de <i>Euterpe precatoria</i> Mart. submetidas ao estresse com cádmio (ns = não significativo). CCCA: com cádmio e com ácido ascórbico, CCSA: com cádmio e sem ácido ascórbico, SCCA: sem cádmio e com ácido ascórbico, e SCSA: sem cádmio e sem ácido ascórbico.....	39
Figura 13.	Concentração de clorofila e carotenoides (mg/L) das plantas de <i>Euterpe precatoria</i> Mart. submetidas ao estresse com cádmio (ns = não significativo). CCCA: com cádmio e com ácido ascórbico, CCSA: com cádmio e sem ácido ascórbico, SCCA: sem cádmio e com ácido ascórbico, e SCSA: sem cádmio e sem ácido ascórbico...	39
Figura 14.	Quantidade de peróxido de hidrogênio ($\mu\text{mol g}^{-1}$) das plantas de <i>Euterpe precatoria</i> Mart. submetidas ao estresse com cádmio. (ns = não significativo). Letras diferentes diferem entre si pelo teste de Tukey ($p < 0,05$). CCCA: com cádmio e com ácido ascórbico, CCSA: com cádmio e sem ácido ascórbico, SCCA: sem cádmio e com ácido ascórbico, e SCSA: sem cádmio e sem ácido ascórbico.....	43
Figura 15.	Conteúdo de MDA (nmol g^{-1}) das plantas de <i>Euterpe precatoria</i> Mart. submetidas ao estresse com cádmio. (ns = não significativo). CCCA: com cádmio e com ácido ascórbico, CCSA: com cádmio e sem ácido ascórbico, SCCA: sem cádmio e com ácido ascórbico, e SCSA: sem cádmio e sem ácido ascórbico.....	44
Figura 16.	Quantificação de proteínas solúveis ($\mu\text{mol mg}^{-1}$) pelo método de Bradford das plantas de <i>Euterpe precatoria</i> Mart. submetidas ao estresse com cádmio. (ns = não significativo). CCCA: com cádmio e com ácido ascórbico, CCSA: com cádmio e sem ácido ascórbico, SCCA: sem cádmio e com ácido ascórbico, e SCSA: sem cádmio e sem ácido ascórbico.....	44
Figura 17.	Atividade da catalase ($\mu\text{mol mg}^{-1}$) em espectrofotômetro das plantas de <i>Euterpe precatoria</i> Mart. submetidas ao estresse com cádmio. (ns = não significativo). CCCA: com cádmio e com ácido ascórbico, CCSA: com cádmio e sem ácido ascórbico, SCCA: sem cádmio e com ácido ascórbico, e SCSA: sem cádmio e sem ácido ascórbico....	45

LISTA DE TABELAS

		Pág.
Tabela 1.	Massa fresca e massa seca da parte aérea (MFPA e MSPA) e da raiz (MFR e MSR) das plantas de <i>Euterpe precatoria</i> Mart. submetidas ao estresse com cádmio (ns = não significativo). CCCA: com cádmio e com ácido ascórbico, CCSA: com cádmio e sem ácido ascórbico, SCCA: sem cádmio e com ácido ascórbico, e SCSA: sem cádmio e sem ácido ascórbico.....	38
Tabela 2.	Concentração de metais pesados do substrato utilizado no cultivo das plantas de <i>Euterpe precatoria</i> Mart. CCCA: com cádmio e com ácido ascórbico, CCSA: com cádmio e sem ácido ascórbico, SCCA: sem cádmio e com ácido ascórbico, e SCSA: sem cádmio e sem ácido ascórbico.....	40
Tabela 3.	Concentração de cádmio (mg kg^{-1}) na parte aérea e raiz de <i>Euterpe precatoria</i> Mart. e fator de translocação do metal pesado. CCCA: com cádmio e com ácido ascórbico, CCSA: com cádmio e sem ácido ascórbico, SCCA: sem cádmio e com ácido ascórbico, e SCSA: sem cádmio e sem ácido ascórbico.....	40
Tabela 4.	Caracterização química dos nutrientes das plantas de <i>Euterpe precatoria</i> Mart.....	42

LISTA DE ABREVIATURAS

g	Grama
mg	Miligrama
mL	Mililitro
mm	Milímetro
mM	Milimolar
nm	Nanômetro
rpm	Rotações por minuto
μL	Microlitro

LISTA DE SIGLAS

ANOVA	Análise de Variância
CAT	Catalase
CCBN	Centro de Ciências Biológicas e da Natureza
DBC	Delineamento em Blocos Casualizados
EDTA	Ácido etilenodiamino tetra-acético
ERO	Espécie Reativa de Oxigênio
GR	Glutathione Redutase
MDA	Malondialdeído
NADPH	Fosfato de dinucleótido de nicotinamida e adenina
pH	Potencial Hidrogeniônico
PVPP	Polivinilpolipirrolidona
PZ	Parque Zoobotânico
SOD	Superóxido Dismutase
TBA	Ácido 2-tiobarbitúrico
TCA	Ácido tricloroacético
UFAC	Universidade Federal do Acre

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	16
2. REVISÃO DE LITERATURA.....	19
2.1. Contaminação ambiental por metais pesados.....	19
2.2. Ácido ascórbico na mitigação de estresse por metais pesados	22
2.3. Interferência do cádmio nos processos biológicos das plantas.....	22
2.4. A espécie <i>Euterpe precatoria</i> Mart.	24
3. OBJETIVOS.....	26
3.1. Geral.....	26
3.2. Específicos	26
4. MATERIAL E MÉTODOS.....	27
4.1. Área experimental	27
4.2. Material vegetal	27
4.3. Desenho experimental.....	28
4.4. Ensaio da absorção de cádmio por plantas de açaizeiro solteiro	31
4.5. Parâmetros de crescimento e fotossíntese	32
4.6. Concentração de Cd nas plantas de açaizeiro solteiro	33
4.7. Análises bioquímicas.....	34
4.8. Análises estatísticas	36
5. RESULTADOS.....	37
5.1. Crescimento das plantas de açaí-solteiro.....	37
5.1.1. Atividade fotossintética.....	39
5.1.2. Teores de clorofila e carotenoides	39
5.1.3. Concentração de metais pesados nos substratos	40
5.1.4. Concentração de Cd nas plantas de açaizeiro solteiro.....	40
5.1.5. Caracterização química dos nutrientes das plantas de açaizeiro solteiro ...	41
5.2. Análises bioquímicas.....	43
5.2.1. Quantificação dos níveis de peróxido de hidrogênio	43
5.2.2. Determinação da peroxidação de lipídeos	43
5.2.3. Extração e quantificação da concentração de proteínas totais	44
5.2.4. Ensaio de enzimas antioxidantes	45
5.2.4.1. Atividade da catalase (CAT).....	45
6. DISCUSSÃO.....	46

7. CONCLUSÃO.....	48
8. REFERÊNCIAS.....	49

1. INTRODUÇÃO

Euterpe precatoria Mart. é uma espécie de açaí nativo, sendo encontrada em parte da América Central e no norte da América do Sul (Henderson *et al.*, 2019). No Brasil, a palmeira é distribuída de forma nativa nos Estados do Acre, Amazonas, Rondônia e Pará (Ferreira *et al.*, 2022), e é conhecida popularmente como açaí-solteiro (Aguiar e Mendonça, 2001) e açaí-do-amazonas (Yamaguchi *et al.*, 2015). Além disso, pertence à família *Arecaceae* e é uma espécie de clima tropical quente e úmido (Ferreira *et al.*, 2022). Quanto às necessidades nutricionais, a cultura não é exigente e é capaz de crescer em solos pobres e ácidos (Wadt, 2004).

A polpa do açaí é o principal produto extraído da espécie (Kang *et al.*, 2012), sendo considerado um dos mais importantes produtos florestais do continente (Brum e Souza, 2020). Somente no ano de 2022, a produção de açaí alcançou o volume de 1.699.588 toneladas de polpa produzida no Brasil, segundo o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE (IBGE, 2022). O rápido incremento do consumo interno e das exportações refletem a alta demanda pela polpa (Vieira *et al.*, 2018), e somente no Estado do Acre cerca de 90% de toda a produção é realizada via extrativismo (Cartaxo *et al.*, 2018).

Estresses abióticos, tais como deficiência hídrica, temperaturas elevadas e exposição a metais pesados, são alguns dos desafios mais comuns encontrados em ambientes agrícolas e florestais (Mittler e Blumwald, 2010). Os metais pesados compreendem metais e metaloides com massa específica atômica superior a 5 g/cm³, e a maioria desses metais está disponível no ambiente como elementos traço (Bhargava *et al.*, 2012). Em grandes concentrações podem ser tóxicos aos organismos vivos, e o aumento de metais pesados no ambiente é atribuído à intensificação da agricultura, com o uso de fertilizantes químicos e pesticidas, e ao descarte de resíduos industriais (Matson *et al.*, 1997).

O cádmio (Cd) é reconhecido como um dos metais pesados mais prejudiciais, causando impactos negativos ao ambiente (Pendias; Pendias, 2001). Esse metal não pode ser facilmente degradado (Nedelkoska; Doran, 2000), e em organismos vivos, o Cd pode perturbar funções enzimáticas, desnaturar proteínas e, conseqüentemente, prejudicar o funcionamento celular (Moschem; Gonçalves, 2020).

O acúmulo de metais pesados em alimentos é um fator que pode afetar a segurança alimentar das populações. O cacaueiro (*Theobroma cacao* L.) é um

exemplo de planta que possui a capacidade de acumular cádmio nos frutos, levantando questões sobre a segurança dos alimentos produzidos (Abubakar *et al.* 2024). Embora existam estudos que abordem a absorção de cádmio em plantas como o cacau, há uma lacuna no conhecimento no que se refere a absorção desse metal pesado em plantas de açaizeiro solteiro. O cádmio é um elemento tóxico que, se ingerido, pode se acumular no organismo humano, aumentando o risco de câncer e danos aos órgãos vitais (Zhao *et al.*, 2024). Nesse sentido, avaliar a absorção de cádmio em plantas de açaizeiro solteiro é importante para garantir a segurança alimentar (Biswas e Poddar, 2024).

O açaizeiro solteiro é uma espécie que apresenta crescimento lento, além de apresentar importância socioeconômica pela exploração da sua polpa para uso comestível. Sendo assim, não é considerada uma boa espécie para programas de fitorremediação. Entretanto, não se sabe se o açaizeiro solteiro consegue acumular cádmio nos frutos, o que torna necessária a realização de estudos mais aprofundados sobre o tema para fins de segurança alimentar.

Um estudo desenvolvido no Acre avaliou a absorção de cádmio em plantas de *E. precatoria* (Silva *et al.*, 2023). Porém, a duração do experimento foi curta, não possibilitando conclusões precisas sobre a tolerância de plantas de açaizeiro solteiro. Contudo, uma técnica conhecida como *seedling priming* pode ser uma possível estratégia para aumentar a resistência de plantas ao cádmio (Gratão *et al.*, 2005). Esse método consiste no tratamento de mudas para induzir a tolerância em plantas antes de serem submetidas a estresses bióticos e abióticos.

O tratamento de mudas com ácido ascórbico surge como alternativa para induzir tolerância a estresses bióticos e abióticos. O ácido ascórbico, por ser um antioxidante, tem a capacidade de neutralizar o estresse oxidativo causado pelo acúmulo de metais pesados (Celi *et al.*, 2023; Pandey *et al.*, 2024). Além disso, ele regula processos fisiológicos essenciais, incluindo fotossíntese e biossíntese hormonal, que são essenciais para o desenvolvimento das plantas e resposta ao estresse (Celi *et al.*, 2023; Mishra *et al.*, 2023). Nesse sentido, essa abordagem pode aumentar a resistência das plantas, além de promover crescimento mais saudável e aumento da produtividade, sendo útil em áreas agrícolas contaminadas com metais pesados (Mishra *et al.*, 2023; Singh *et al.*, 2024).

A toxicidade dos metais pesados é devida à sua capacidade de gerar espécies reativas de oxigênio (ERO) (Gratão *et al.*, 2005), que são produzidas via NADPH

oxidase localizada na membrana plasmática (O'Brien *et al.*, 2012). Com isso, um sistema antioxidante eficaz é crucial para a tolerância ao Cd, pois esse metal pesado provoca a formação de ERO, danificando lipídios, proteínas e ácidos nucleicos (Thorsen *et al.*, 2009). Na presença de Cd, ocorre o aumento na atividade das enzimas superóxido dismutase (SOD: EC 1.15.1.1), catalase (CAT: EC 1.11.1.6) e glutathione redutase (GR: EC 1.8.1.7) (Gratão *et al.*, 2005).

Quanto à produção de açaizeiro solteiro em sistemas de cultivo, não se sabe como as plantas reagem, onde o Cd se acumula e nem qual efeito terão na qualidade do produto. Com isso, é importante o desenvolvimento de estudos sobre a absorção de cádmio e mecanismos antioxidantes apresentados por plantas de *E. precatoria*. Dado o exposto, o objetivo deste trabalho foi avaliar o efeito do ácido ascórbico no processo de indução de tolerância em plantas de açaizeiro solteiro (*Euterpe precatoria* Mart.) cultivadas em substrato contaminado com cádmio.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1. Contaminação ambiental por metais pesados

Nas últimas décadas, a contaminação ambiental por metais pesados tem sido considerada um dos principais problemas ambientais ocorrentes no mundo, devido aos impactos negativos que eles provocam em ecossistemas terrestres e aquáticos (Da Silva *et al.*, 2023). Embora esses elementos ocorram naturalmente no solo, as atividades antrópicas têm liberado de forma substancial metais em grandes concentrações, que permanecem no ambiente por longos períodos e se acumulam na cadeia alimentar, aumentando os riscos de exposição humana (Bettaieb; Arbaoui, 2018). Essas atividades incluem processos industriais, mineração, agricultura e queima de combustíveis fósseis (Shehata *et al.*, 2019).

O cádmio (Cd) é um dos metais pesados mais tóxicos para os seres humanos, animais e plantas (Chen; Kao, 1995; Benavides *et al.*, 2005). Ele pode se acumular no corpo humano com uma meia-vida superior a 10 anos (Salt *et al.*, 1995), e tem apresentado as taxas de emissão mais altas nas últimas décadas (Nascimento; Pereira, 1997; Nawrot *et al.*, 2008). A maioria dos metais pesados persiste no solo devido à sua natureza imóvel, estando fortemente associados à terra e aos colóides orgânicos (Kashem *et al.*, 2010).

É considerado um poluente crítico devido à sua alta toxicidade, potencial carcinogênico elevado e alta contaminação ambiental (Niu *et al.*, 2023). A principal forma pela qual o Cd entra na cadeia alimentar humana é através do consumo de vegetais, mariscos ou carne contaminados com o metal pesado, oriundos de animais alimentados com ração vegetal contaminada (Chen *et al.*, 2020). Tanto os processos de fabricação naturais quanto os artificiais resultam na liberação de mais de 10.000 toneladas de Cd no ambiente, onde pode se infiltrar no fornecimento de água potável e poluir o solo em áreas agrícolas (Troutner, 2022).

A presença elevada de Cd nos solos agrícolas é atribuída principalmente ao uso excessivo de fertilizantes fosfatados, à infiltração de efluentes industriais e ao lodo de esgoto urbano (Munira *et al.*, 2016). Há vários sensores eletroquímicos que podem detectar com precisão a presença de metais pesados no ambiente (Rezayi *et al.*, 2012, Ahmadzadeh *et al.*, 2015, Şolomonea *et al.*, 2022). Como exemplo, um sensor portátil de ressonância de plasmon de superfície de fibra óptica foi utilizado para identificar traços de Cd²⁺ (Şolomonea *et al.*, 2022).

O conteúdo de Cd em fertilizantes fosfatados pode alcançar 200 µg/g (Moreno *et al.*, 1999), e pode chegar a 815 µg/g em lodo de esgoto (Qadir *et al.*, 2000). Na China, aproximadamente 20 milhões de hectares de terras cultiváveis estão contaminados com Cd e outros metais pesados, resultando na produção anual de 12 milhões de toneladas de grãos contaminados (Luo *et al.*, 2018). Dessa forma, a descontaminação de terras cultiváveis poluídas com Cd tornou-se uma prioridade global.

Algumas espécies de plantas desenvolveram alta tolerância ao Cd, sendo capazes de acumular o metal pesado em concentrações superiores a 100 µg/g de peso seco, o que é considerado o limiar para os hiperacumuladores de Cd (Clemens, 2001). Por exemplo, as espécies *Arabidopsis halleri* e *Sedum plumbizincicola* podem acumular Cd acima de 1000 e 7000 µg/g, respectivamente (Zhao *et al.*, 2006, Liu *et al.*, 2017). Esses hiperacumuladores possuem sofisticados mecanismos de desintoxicação de Cd, sem exibir quaisquer efeitos da toxicidade resultante do acúmulo de grandes quantidades de Cd.

Diversos estudos destacaram os papéis cruciais de genes/proteínas específicos na tolerância ao Cd em plantas (Krämer, 2010, Migocka *et al.*, 2015a, Migocka *et al.*, 2015b, Liu *et al.*, 2017, Zhao *et al.*, 2019). No entanto, os mecanismos de tolerância e acúmulo de Cd em hiperacumuladores ainda não estão completamente esclarecidos (Niu *et al.*, 2023). Portanto, uma compreensão mais aprofundada dos mecanismos de tolerância e acúmulo de Cd em plantas é fundamental para o manejo adequado de espécies hiperacumuladoras de Cd.

Algumas famílias de plantas se destacam por conter espécies hiperacumuladoras de Cd. Dentre elas, tem-se a família *Brassicaceae*, que inclui vegetais importantes e plantas produtoras de óleo cultivadas em todo o mundo (Niu *et al.*, 2023). *Brassica juncea* pode acumular Cd a níveis acima de 400 µg/g em folhas durante 24 dias de exposição, embora tenha apresentado efeitos negativos sobre o crescimento vegetal (Haag-Kerwer *et al.*, 1999). A espécie *Thlaspi caerulescens* também é reconhecida como hiperacumuladora não somente de Cd, como também de zinco (Zn) (Tuomainen *et al.*, 2006). De forma geral, as espécies dessa família iniciam várias vias como resposta ao estresse provocado pelo Cd, que incluem a ativação de enzimas antioxidantes, ajuste osmótico e efeitos quelantes (Isaure *et al.*, 2015).

As leguminosas também se destacam como hiperacumuladoras de Cd. A espécie *Medicago sativa*, uma planta modelo, é uma importante cultura forrageira em todo o mundo (Niu *et al.*, 2023). Ela pode acumular Cd, e o local em que ocorre maior concentração do metal pesado são as raízes, seguido pelo caule (Gutsch *et al.*, 2018a). *Glycine max* é bastante cultivada pelo alto teor de óleo e proteína dos seus grãos (Niu *et al.*, 2023).

Em decorrência dos elevados níveis de contaminação do solo e do baixo pH, observou-se um aumento do teor de Cd nas sementes de soja em todo o mundo (Zhang *et al.*, 2021). A soja é tolerante a baixas concentrações de Cd, porém em altas concentrações ocorre a redução da produtividade da cultura (Ikhajiagbe *et al.*, 2021). Espécies de *Crassulaceae* são consideradas hiperacumuladoras de Cd sem apresentar toxicidade aparente (Niu *et al.*, 2023). *Sedum alfredii* e *S. plumbizincicola* podem acumular Cd até 11.000 e 7000 µg/g, respectivamente (Liu *et al.*, 2017, Zhang *et al.*, 2017).

E. precatoria é uma espécie de grande importância para a bioeconomia da região amazônica pelo consumo e comercialização da sua polpa. Porém, ao contrário de espécies hiperacumuladoras, a habilidade do açaizeiro solteiro em acumular cádmio ainda é pouco estudada (Perrut-Lima *et al.*, 2022). Nesse sentido, estudos são necessários para avaliar se *E. precatoria* acumula cádmio, e se técnicas como *seedling priming* podem induzir tolerância ao estresse.

2.2. Ácido ascórbico na mitigação de estresse por metais pesados

O ácido ascórbico surgiu como um agente em potencial para mitigação de estresse causado pelo cádmio e outros metais pesados em várias espécies de plantas. Esse agente antioxidante aumenta o crescimento, melhora as características fisiológicas e reduz os efeitos tóxicos do cádmio, promovendo dessa forma a saúde das plantas e a segurança alimentar. As espécies reativas de oxigênio (ROS) que são geradas pela exposição ao cádmio são neutralizadas pelo ácido ascórbico, caracterizando o seu potencial antioxidante na redução do estresse oxidativo (Liu *et al.*, 2019; Navrátilová *et al.*, 2021).

Estudos relatam que a suplementação de ácido ascórbico leva ao aumento de clorofila, fotossíntese aprimorada e aumento nas variáveis de crescimento vegetal, como comprimento da raiz e da parte aérea (Zhang *et al.*, 2019; Kaur, 2023). Foi demonstrado que a aplicação exógena de ácido ascórbico diminui a

absorção de cádmio nas plantas, diminuindo assim sua concentração no tecido vegetal (Liu *et al.*, 2019; Zhang *et al.*, 2019).

Quanto à combinação com outros compostos, foi observado que o efeito sinérgico do ácido ascórbico com o silicato de cálcio alivia mais a toxicidade do cádmio, aumentando a resiliência geral da planta (Kaur, 2023). Embora o ácido ascórbico seja benéfico, é importante definir a dosagem precisa a ser aplicada, pois quantidades excessivas podem levar a efeitos pró-oxidantes (Navrátilová *et al.*, 2021).

Em contraste, embora o ácido ascórbico se mostre como um agente promissor na mitigação de estresse por cádmio, o potencial de acúmulo de metais pesados na cadeia alimentar continua sendo uma preocupação. Mais pesquisas são necessárias para explorar os efeitos de longo prazo da aplicação do ácido ascórbico e suas implicações para a segurança alimentar e conservação do ambiente.

2.3. Interferência do cádmio nos processos biológicos das plantas

O Cd é um metal pesado que apresenta efeitos adversos à saúde humana (Da Silva *et al.*, 2023; Yeşilyurt, 2023). Esse metal pode entrar no solo de forma natural ou por meio de atividades antrópicas (Jinadasa *et al.*, 2016). As fontes naturais de cádmio compreendem erupções vulcânicas, incêndios florestais e intemperismo das rochas, e altas concentrações de cádmio são bastante encontradas em rochas máficas e ultramáficas (Khan *et al.*, 2017). Entretanto, as principais fontes de poluição por cádmio estão relacionadas às atividades humanas (Yeşilyurt, 2023).

As atividades que contribuem de forma significativa para a contaminação de solos por cádmio incluem processos industriais como fundição, descarte de resíduos da produção de cimento, uso de fertilizantes à base de fosfato e acúmulo de cinzas da combustão de combustíveis fósseis (Pan *et al.*, 2016; Yeşilyurt, 2023). Além disso, outras fontes de liberação de cádmio no ambiente compreendem o uso de estabilizantes plásticos, baterias, fungicidas, resíduos de látex e produção têxtil, óleo de motor, painéis solares e tintas (Khan *et al.*, 2017; Mahmood *et al.*, 2019).

Altas concentrações de cádmio ocasionam efeitos prejudiciais sobre diversos processos fisiológicos e bioquímicos das plantas (Yeşilyurt, 2023). Longos períodos de exposição ao Cd têm sido associados a alterações nos parâmetros de crescimento e desenvolvimento vegetal, como inibição do crescimento da parte aérea e da raiz

(Boussama *et al.*, 1999), redução da massa fresca das plantas e do comprimento das folhas, além de interferir nos teores de clorofila, na condutividade estomática, na germinação de sementes e nos teores de ATP (adenosina trifosfato) (Khan *et al.*, 2017; Mahmood *et al.*, 2019).

O cádmio inibe a fotossíntese pelas plantas, devido a alterações nas funções dos estômatos, no transporte de elétrons, no ciclo de Calvin, desordens na estrutura dos grana e na síntese de clorofila, causando também a degradação das mitocôndrias (Barceló *et al.*, 1988; Mahmood *et al.*, 2019; Yeşilyurt, 2023). A interrupção desse processo interfere na absorção de nutrientes, no atraso do crescimento de brotos, na indução da morte celular e na clorose das folhas (Khan *et al.*, 2017).

Além disso, esse metal pesado inibe as bombas de prótons, restringindo o crescimento das raízes e interrompendo as etapas fotossintéticas, comprometendo o funcionamento adequado das rotas metabólicas, afetando os sistemas de transporte de íons e prejudicando a atividade de enzimas essenciais para diversos processos metabólicos (Rasheed *et al.*, 2018; Yeşilyurt, 2023).

A presença de bordas foliares de coloração marrom-avermelhada e clorose (Schickler; Caspi, 1999) são sinais característicos observados em plantas expostas a esse metal (DAS *et al.*, 1997). Isso se deve à capacidade do Cd de interagir facilmente e competir com ferro (Fe) (Salt *et al.*, 1995), níquel (Ni) (Baccouch *et al.*, 1998) e cobre (Cu) (Mocquot *et al.*, 1996) pelos sítios de absorção na membrana plasmática (Nascimento; Pereira, 1997), resultando na supressão da absorção desses elementos e induzindo a uma deficiência de Fe nesse tecido vegetal. Além disso, efeitos genéticos e citotóxicos foram observados em plantas expostas a esse metal, com inibição da divisão celular, alterações cromossômicas (aberrações cromossômicas) e indução de picnose nas células das raízes (Das *et al.*, 1997).

O estresse causado pelo cádmio pode provocar alterações anatômicas nas plantas. A análise da anatomia da raiz em relação à presença do cádmio pode indicar alterações, como a diminuição da densidade de vasos condutores (Wang *et al.*, 2024), o aumento da espessura da camada cortical (Khatlan *et al.*, 2024) e a redução do comprimento dos pelos radiculares (Altaf *et al.*, 2023). Essas modificações podem comprometer a capacidade das raízes em captar água e nutrientes, aumentando os efeitos negativos do metal pesado sobre o crescimento e desenvolvimento vegetal (Muhammad *et al.*, 2023).

2.4. A espécie *Euterpe precatoria* Mart.

Euterpe precatoria Mart., popularmente conhecida como "açaí-do-amazonas" (Yamaguchi *et al.*, 2015) ou "açaí-solteiro" (Aguiar e Mendonça, 2001), é uma frutífera nativa da região amazônica, pertencendo à família *Arecaceae* e ao gênero *Euterpe* (Henderson e Galeano, 1996). Além disso, é considerada a palmeira mais abundante da bacia amazônica (Brum e Souza, 2020), sendo comum em áreas de várzea, mas ocorrendo também em rampas andinas íngremes a 2000 m de altitude.

Quanto às características botânicas da espécie, elas são bem peculiares. A copa apresenta folhas regularmente espaçadas, mostrando um padrão estrelado (Ferreira *et al.*, 2020). A espécie é monoica e suas inflorescências apresentam flores masculinas e femininas, não ocorrendo autofecundação (Küchmeister *et al.*, 1997). Os cachos apresentam frutos pequenos, com diâmetro variando de 1,0 a 2,0 cm, e são esféricos e roxos escuros quando maduros (Cartaxo *et al.*, 2020). E seu estipe é solitário, com um anel de raízes adventícias na base.

A polpa extraída dos frutos de açaí é o principal produto derivado da palmeira, valorizado por seu alto valor nutricional, propriedades antioxidantes e anti-inflamatórias (Kang *et al.*, 2012, Kang *et al.*, 2011), bem como por suas propriedades antiproliferativas e cardioprotetoras (Pacheco-Palencia *et al.*, 2009). Além disso, a produção de polpa de açaí gera renda às populações tradicionais amazônicas (Lopes *et al.*, 2019).

O Brasil é o principal produtor, consumidor e exportador de açaí (Boeira *et al.*, 2020). Estudos fitoquímicos evidenciaram que a polpa de açaí é rica em substâncias bioativas (Boeira *et al.*, 2020). No Estado do Acre, o açaí-solteiro constitui a principal matéria prima utilizada na produção agroindustrial (Cartaxo *et al.*, 2020). Cerca de 90% da polpa produzida no Estado é proveniente do extrativismo, com o município de Feijó ocupando o 1º lugar em volume de produção (Cartaxo *et al.*, 2018).

A alta demanda pela polpa de açaí tem impulsionado o desenvolvimento de novos cultivos comerciais (Peters *et al.*, 2020). Os frutos provenientes dessa palmeira são reconhecidos como um dos alimentos mais populares na Amazônia (Boeira *et al.*, 2020) e como um dos principais produtos não madeireiros do continente (Brum e Souza, 2020). Em 2022, a produção de açaí atingiu a marca de 1.699.588 toneladas (IBGE, 2022).

No entanto, a produtividade da espécie pode ser comprometida por estresses bióticos e abióticos. Entre os principais fatores estão o estresse hídrico, o que compromete o desenvolvimento das plantas e, conseqüentemente, a produção dos frutos (Ashokan *et al.*, 2024). Outro fator é a deficiência de nutrientes, principalmente fósforo e potássio, pois a falta de um desses nutrientes pode limitar processos fisiológicos essenciais, como a fotossíntese (Ashokan *et al.*, 2024). Além disso, a exposição a metais pesados, como o cádmio, pode afetar o crescimento das raízes e a absorção de nutrientes (Adil e Quraishi, 2023). Pragas e doenças como a antracnose (*Colletotrichum* spp.) também podem causar perdas na qualidade dos frutos (Peters *et al.*, 2020). E as mudanças climáticas podem influenciar de forma negativa o ciclo de produção de plantas de açaizeiro solteiro.

3. OBJETIVOS

3.1. Geral

Avaliar o efeito do ácido ascórbico na mitigação do estresse oxidativo e no processo de indução de tolerância em plantas de açaizeiro solteiro (*Euterpe precatoria* Mart.) cultivadas em substrato contaminado com cádmio.

3.2. Específicos

- Avaliar a acumulação e distribuição do cádmio em diferentes partes da planta, incluindo parte aérea e raiz;
- Analisar o crescimento e desenvolvimento de *E. precatoria* na presença de cádmio;
- Avaliar a resposta fotossintética de *E. precatoria* quando expostas ao cádmio;
- Investigar a influência do ácido ascórbico na capacidade das plantas de açaizeiro solteiro de tolerar cádmio;
- Analisar a atividade da catalase em *E. precatoria* em resposta à presença de cádmio;
- Examinar os níveis de estresse oxidativo nas plantas de açaí-solteiro.

4. MATERIAL E MÉTODOS

4.1. Área experimental

Os experimentos em condições de casa de vegetação foram desenvolvidos na Horta Experimental da Universidade Federal do Acre (UFAC) (Figura 1). A casa de vegetação teve médias de temperatura de 32 ± 2 °C durante o dia e 25 ± 2 °C durante a noite e fotoperíodo natural.

As análises bioquímicas foram desenvolvidas no Laboratório de Diagnose e Controle de Doenças em Plantas e no Laboratório de Química, respectivamente, ambas ligadas ao Centro de Ciências Biológicas e da Natureza (CCBN) da UFAC.

Figura 1 - Horta Experimental da Universidade Federal do Acre (UFAC). (A) vista frontal das estufas; (B) e (C) estufa onde o experimento foi instalado.



4.2. Material vegetal

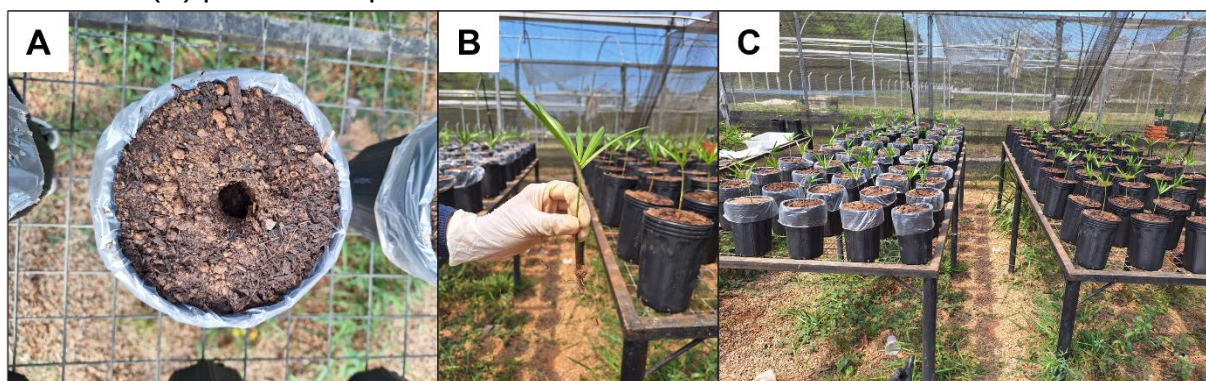
Cerca de 80 plântulas de *E. precatoria* de três meses de idade foram obtidas no Viveiro do Parque Zoobotânico (PZ) da UFAC (Figura 2). As plântulas foram selecionadas com base na uniformidade de altura, vigor e ausência de doenças e/ou ataque de pragas. Após a seleção, as plântulas foram transportadas para a Horta Experimental em condições favoráveis até o repique. O transporte ocorreu em bandejas de plástico com uma camada fina de substrato composto ao redor das raízes.

Figura 2 - Plântulas de *Euterpe precatoria* Mart. obtidas no Viveiro do Parque Zoobotânico da Universidade Federal do Acre (UFAC). (A) plântulas cultivadas no solo do viveiro; (B) bandejas onde ocorreu o transporte das plântulas.



Na Horta Experimental, as plântulas foram mantidas em condições não controladas de temperatura e umidade relativa (UR%). Além disso, elas tiveram redução de 50% da incidência de luz solar por meio de telas de sombreamento de malha preta. As plântulas foram repicadas manualmente em vasos de polietileno de 2,6 litros contendo substrato composto por terra vegetal e areia na proporção de 1:1, e no interior de cada vaso foram adicionados granitos para facilitar o escoamento de água (Figura 3). Não houve tratamento prévio do substrato utilizado. As raízes enoveladas foram cortadas usando uma tesoura comum, e a profundidade seguiu até a base do coleto. A irrigação foi realizada a cada dois dias e tratos culturais foram realizados para evitar o ataque de pragas e o crescimento de outras espécies de plantas.

Figura 3 - Processo de repique das plântulas de *Euterpe precatoria* Mart. (A) vaso de polietileno com substrato; (B) plântula de açaizeiro solteiro antes do repique; (C) plântulas repicadas nos vasos.



4.3. Desenho experimental

O experimento foi conduzido com um total de 80 plantas de açaizeiro solteiro, organizadas no delineamento em blocos casualizados (DBC) com fatorial 2 x 2. A casa de vegetação onde o experimento foi implantado apresentou variação na precipitação por problemas na estrutura do local. Em decorrência disso, optou-se pelo delineamento em questão. O fator A e o fator B contaram com dois níveis cada e, por meio da combinação entre os fatores, foram formados quatro tratamentos distribuídos em cinco blocos, com quatro repetições dos tratamentos por bloco, totalizando 80 unidades experimentais (Figuras 4 e 5).

Os blocos foram dispostos de forma isolada na área experimental, e a distribuição aleatória das plantas nos blocos foi realizada por meio de sorteio. A escolha do desenho experimental em esquema fatorial foi justificada pela necessidade de analisar múltiplos fatores e suas interações, enquanto a variabilidade ambiental foi

controlada por meio da divisão em blocos. Os fatores e os níveis de cada fator são descritos a seguir:

- Fator 1: presença/ausência de cádmio:
 - CC: com cádmio;
 - SC: sem cádmio.
- Fator 2: aplicação/ou não de ácido ascórbico:
 - CA: com ácido ascórbico;
 - SA: sem ácido ascórbico.

Os tratamentos foram organizados da seguinte forma: o tratamento 1 (SCSA) consistiu em plantas em substrato não contaminado e sem aplicação de ácido ascórbico; o tratamento 2 (SCCA) envolveu plantas em substrato não contaminado com aplicação de ácido ascórbico; o tratamento 3 (CCSA) incluiu plantas em substrato contaminado com cádmio, sem aplicação de ácido ascórbico; e o tratamento 4 (CCCA) compreendeu plantas em substrato contaminado com cádmio, com aplicação de ácido ascórbico.

Figura 4 - Esquema de disposição dos tratamentos experimentais a partir da combinação dos fatores A e B no delineamento em blocos casualizados (DBC) em esquema fatorial.

Bloco 1				Bloco 2				Bloco 3				Bloco 4				Bloco 5			
CCCA	SCCA	SCCA	SCCA	CCCA	CCSA	SCSA	SCSA	SCCA	SCSA	CCSA	SCCA	CCCA	SCCA	CCSA	CCCA	SCCA	CCCA	SCCA	CCCA
CCSA	SCSA	CCCA	SCSA	SCCA	CCSA	CCCA	SCSA	CCCA	CCCA	SCCA	CCCA	CCCA	SCSA	SCCA	CCSA	SCSA	SCSA	CCSA	SCSA
CCSA	CCCA	CCCA	CCSA	CCSA	SCCA	CCCA	CCSA	SCCA	CCSA	CCSA	SCSA	CCSA	SCCA	SCSA	CCSA	CCSA	SCCA	CCSA	SCSA
SCB2	CCSA	SCSA	SCCA	SCSA	CCCA	SCCA	SCCA	SCSA	CCCA	CCSA	SCSA	SCSA	SCSA	SCCA	CCCA	CCCA	CCCA	SCCA	SCCA

Figura 5 - Disposição dos blocos na área experimental, destacando a casualização dos tratamentos dentro dos blocos.



4.4. Ensaio da absorção de cádmio por plantas de açaizeiro solteiro

Com 165 dias após o repique das plantas, houve o início dos experimentos. Inicialmente, foi realizada a aplicação do ácido ascórbico nas plantas. A solução de ácido ascórbico foi preparada com uma concentração padronizada de 5 mM (Da Silva *et al.*, 2020) em água destilada, sendo armazenada em um recipiente transparente até o momento da aplicação. Foram realizadas duas aplicações, uma a cada três dias. Cada planta recebeu 20 mL da solução por meio de pulverização diretamente nas folhas.

Com quatro dias após a última aplicação do ácido ascórbico, houve a aplicação do cádmio. O metal pesado foi aplicado na forma de cloreto de cádmio (CdCl_2) diretamente no substrato. Foram diluídos 324 mg de CdCl_2 em 4 litros de água destilada para preparar a solução contaminante, e cada vaso recebeu 100 mL dessa solução (8,1 mg de CdCl_2 por vaso e 4,05 mg de CdCl_2 /kg de substrato). Todas as plantas foram irrigadas a cada dois dias para manter a umidade adequada do substrato, e elas foram monitoradas semanalmente para observar possíveis efeitos dos tratamentos. Durante o experimento, tratos culturais foram realizados, o que incluiu a remoção de plantas daninhas e o controle de pragas.

Ao final do experimento, foram coletados 200 g de substrato composto de cada tratamento. As amostras foram secas à temperatura ambiente e na sombra, e depois de secas foram peneiradas e embaladas (Figura 6). Posteriormente, as amostras foram enviadas para o Laboratório Brasileiro de Análises Ambientais e Agrícolas (LABRAS) para as análises químicas e de biodisponibilidade do metal pesado (Cd).

Figura 6 - Substrato composto coletado para as análises químicas e de biodisponibilidade do metal pesado (Cd).



4.5. Parâmetros de crescimento e fotossíntese

Aos 50 dias após a contaminação do substrato composto com cádmio, houve a coleta de dados referentes ao comprimento da parte aérea e da raiz, diâmetro do coleto, número de folhas, área foliar e massa fresca e seca da parte aérea e raiz. Além disso, foi analisado o teor de nitrogênio nas plântulas e os teores de clorofila a, clorofila b, clorofila total e carotenoides. Amostras de folhas e raízes foram coletadas para as análises de translocação do cádmio. Por fim, foram coletadas plantas inteiras para a avaliação da atividade antioxidante. Os blocos foram selecionados aleatoriamente para cada variável analisada.

Para a medição do crescimento das plantas, no momento da coleta, as mudas foram lavadas três vezes com água destilada para remover o excesso de cádmio aderido à superfície das raízes. Para as análises bioquímicas, plantas inteiras foram coletadas e congeladas imediatamente após a coleta em nitrogênio líquido, sendo armazenadas em ultrafreezer -80 °C. Com as plantas restantes, foi feita a obtenção da massa fresca das amostras e seca das amostras. As plantas foram secas a 60 °C durante 2 dias, e ao final desse período foi feita a obtenção da massa seca das amostras.

A atividade fotossintética foi mensurada utilizando o medidor de clorofila atLEAF CHL PLUS, e as medidas foram obtidas a cada 14 dias, totalizando três medições. As medições foram realizadas entre 08:00h e 11:00h da manhã sempre na mesma folha, sendo selecionada a folha mais jovem. Por ser uma planta com folhas compostas, as medições foram feitas em um único ponto no meio de cada folíolo a partir do terceiro folíolo, totalizando três folíolos por planta.

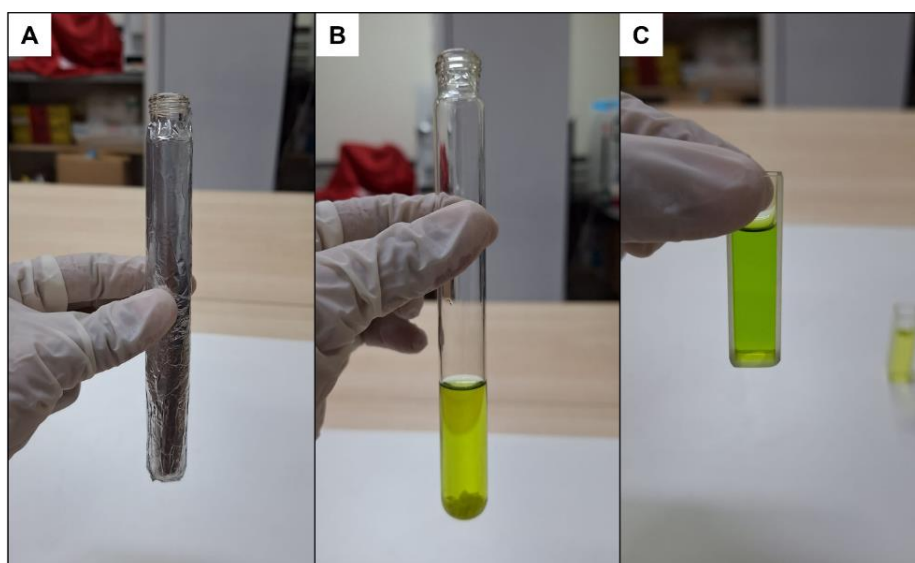
Para determinação dos teores de clorofila e carotenoides, 50 mg de folha de cada repetição de cada tratamento foram coletadas. As amostras foram cortadas em fragmentos de 25 mm², e em seguida foram colocadas em tubos de ensaio envoltos em papel alumínio, contendo 7 mL de acetona 80%. Os tubos foram armazenados na temperatura de 4 °C durante 48 horas para extração dos pigmentos (Figura 7). Após esse período, as amostras foram quantificadas em espectrofotômetro utilizando três comprimentos de onda: 663 nm, 647 nm e 470 nm. Para determinar os teores dos pigmentos, os valores de absorbância obtidos foram substituídos nas equações de Lichtenthaler & Wellburn (1983), e os resultados foram obtidos em mg/L:

$$\text{Clorofila } a = (12,21 \times A_{663}) - (2,81 \times A_{647})$$

$$\text{Clorofila } b = (20,13 \times A_{647}) - (5,03 \times A_{663})$$

$$\text{Carotenoides} = \frac{[(1000 \times A_{470} - 3,27) \times (\text{Clorofila } a) - 104 \times (\text{Clorofila } b)]}{229}$$

Figura 7 - Determinação dos teores de clorofila e carotenoides. (A) tubo de ensaio coberto com papel filme; (B) solução de acetona 80% contendo os pigmentos fotossintéticos após 48 h a 4 °C; (C) cubeta contendo os pigmentos fotossintéticos para leitura em espectrofotômetro.



4.6. Concentração de Cd nas plantas de açaizeiro solteiro

Após obtenção da massa fresca e seca das amostras, as plantas foram trituradas utilizando almofariz e pistilo de porcelana até a obtenção de um pó fino. Por fim, as amostras maceradas foram analisadas quimicamente no Laboratório Brasileiro de Análises Ambientais e Agrícolas (LABRAS), obtendo os valores de macronutrientes, micronutrientes e metais pesados.

4.7. Análises bioquímicas

Os parâmetros bioquímicos analisados compreenderam a determinação da concentração da peroxidação lipídica, quantificação de peróxido de hidrogênio (H₂O₂), quantificação de proteínas totais e a atividade da enzima antioxidante catalase (CAT). Para realizar as análises bioquímicas, foram coletadas plantas inteiras de açaizeiro solteiro. Três blocos foram selecionados ao acaso, sendo eles: bloco 2, bloco 3 e bloco 5. E para cada tratamento dentro de cada bloco foram coletadas três plantas, representando as repetições biológicas, totalizando nove repetições por tratamento.

As plantas coletadas foram colocadas dentro de tubos Falcon (50 mL) e logo em seguida imersas em nitrogênio líquido ainda em casa de vegetação. Posteriormente, as amostras foram armazenadas em ultrafreezer -80 °C até as análises subsequentes. Houve a separação da parte aérea (folhas + caule) e raiz de cada planta, ambas colocadas dentro do mesmo tubo Falcon.

A peroxidação de lipídeos foi determinada através da produção de metabólitos reativos ao ácido 2-tiobarbitúrico (TBA), principalmente o malondialdeído (MDA) (Heath e Packer, 1968) (Figura 8A). Houve a coleta de 200 mg de cada amostra, que foram maceradas em 2 mL de ácido tricloroacético (TCA) 0,1%, adicionando uma pequena quantidade de polivinilpirrolidona (PVPP) sem peso definido.

Após a homogeneização, as amostras foram transferidas para microtubos Eppendorf (2 mL) e logo em seguida centrifugadas a 10.000 rpm por 5 minutos. Do sobrenadante, foram coletados 250 µL e transferidos para tubos criogênicos (2 mL) em conjunto com 1 mL de solução de TCA 20% + TBA 0,5%. O branco consistiu na mesma reação descrita, porém substituindo a amostra pela solução de TCA 0,1%.

Os tubos com a reação foram colocados em banho-seco durante 30 minutos a 95 °C, sendo resfriados imediatamente em banho de gelo por 20 minutos. A leitura das amostras foi realizada em espectrofotômetro nos comprimentos de onda de 535 e 600 nm com duplicata técnica. A concentração de MDA (em nmol/g de massa fresca) foi calculada com base no coeficiente de extinção da reação:

$$nmol\ MDA = \left(\frac{A_{535} - A_{600}}{155000} \right) \times 10^6$$

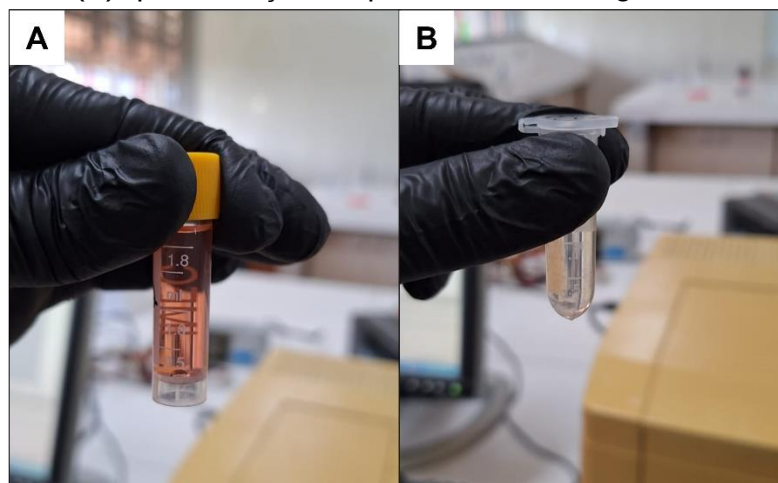
$$nmol\ MDA/g\ MF = \frac{nmol\ MDA}{0,3}$$

O conteúdo de peróxido de hidrogênio (H_2O_2) foi determinado através da reação com iodeto de potássio (KI) (Alexieva *et al.*, 2001) (Figura 8B). Foram pesados 200 mg de amostras e maceradas em 2 mL de TCA 0,1%. Após a homogeneização, as amostras foram transferidas para microtubos Eppendorf (2 mL) e centrifugadas a 10.000 rpm por 5 minutos.

Logo após a centrifugação, 200 μL do sobrenadante foram adicionados em novos microtubos Eppendorf (2 mL), juntamente com 200 μL de tampão fosfato de potássio 100 mM (pH 7,5) e 800 μL de solução de iodeto de potássio (KI) 1 M. O branco foi preparado com a mesma reação descrita, porém ao invés do sobrenadante da amostra, foram utilizados 200 μL de TCA 0,1%.

Os tubos contendo a reação foram colocados em banho de gelo no escuro por uma hora. A absorbância foi medida no comprimento de onda de 390 nm, e a leitura foi realizada em espectrofotômetro com duplicata técnica. Os teores de H_2O_2 foram determinados utilizando uma curva de calibração de H_2O_2 como padrão. Os resultados foram apresentados em $\mu\text{mol/g}$ de tecido vegetal.

Figura 8 - Análises bioquímicas com leitura em espectrofotômetro. (A) peroxidação de lipídeos; (B) quantificação de peróxido de hidrogênio.



Para a extração e quantificação de proteínas totais, as amostras vegetais de cada tratamento foram maceradas em nitrogênio líquido até atingirem a consistência de um pó fino. A maceração foi feita separadamente, macerando primeiramente a parte aérea e depois a raiz. Posteriormente, as amostras foram pesadas e homogeneizadas em tampão fosfato de potássio 50 mM (pH 7,6), seguindo a proporção de 100 mg de tecido vegetal para 1000 μL de tampão. Uma pequena quantidade de PVPP sem peso definido foi adicionada ao macerado para evitar oxidação do material.

O homogeneizado foi submetido à centrifugação a 10.000 rpm por 30 minutos a 4 °C. O sobrenadante resultante foi coletado e distribuído em alíquotas de 200 µL. Os microtubos foram armazenados em ultrafreezer -80 °C até o momento das análises. A concentração de proteínas totais foi determinada pelo método de Bradford (1976), utilizando espectrofotometria no comprimento de onda de 595 nm e *Bovine Serum Albumin* (BSA) como padrão para a construção da curva de calibração. A quantificação foi expressa em mg/mL com duplicata técnica. As leituras das amostras foram feitas em espectrofotômetro.

A composição do tampão de extração é descrita a seguir:

Tampão de extração: Tampão fosfato de potássio 50 mM (pH 7,6), acrescido de 1,0 mM de ácido ascórbico, 1 mM de EDTA (ácido etilenodiamino tetra-acético) e PVPP (Azevedo *et al.*, 1998).

A atividade da catalase (CAT) foi medida em solução de reação formada por 10 mL de tampão fosfato de potássio 100 mM (pH 7,5) e 25 µL de peróxido de hidrogênio, preparada imediatamente antes do uso. A reação foi iniciada com a adição de 25 µL de extrato proteico em 1 mL de solução de reação, e a atividade enzimática foi monitorada através da decomposição de H₂O₂ pelo período de três minutos, observando as alterações na absorbância a 240 nm em cubetas de quartzo, sendo feita duplicata técnica. Os resultados foram expressos em µmol/mg de proteína (Kraus; Mickerse e Fletcher, 1995; Azevedo *et al.*, 1998).

4.8. Análises estatísticas

As variáveis quantitativas foram submetidas à análise de variância unidirecional (ANOVA), e as médias dos tratamentos comparadas pelo teste de Tukey ($p < 0,05$). A normalidade dos dados foi verificada pelo teste de Shapiro-Wilk (Shapiro; WILK, 1965) e a homogeneidade das variâncias pelo teste de Bartlett (Bartlett, 1937). As análises foram conduzidas utilizando a linguagem de programação R (<http://www.r-project.org/>).

5. RESULTADOS

5.1. Crescimento das plantas de açaizeiro solteiro

Quanto ao comprimento da parte aérea e da raiz, não houve diferença entre os tratamentos avaliados após 50 dias de exposição ao Cd (Figuras 9 e 10).

Figura 9 - Comprimento da parte aérea e raiz (cm) das plantas de *Euterpe precatoria* Mart. submetidas ao estresse com cádmio. CCCA: com cádmio e com ácido ascórbico, CCSA: com cádmio e sem ácido ascórbico, SCCA: sem cádmio e com ácido ascórbico, e SCSA: sem cádmio e sem ácido ascórbico. (ns = não significativo).

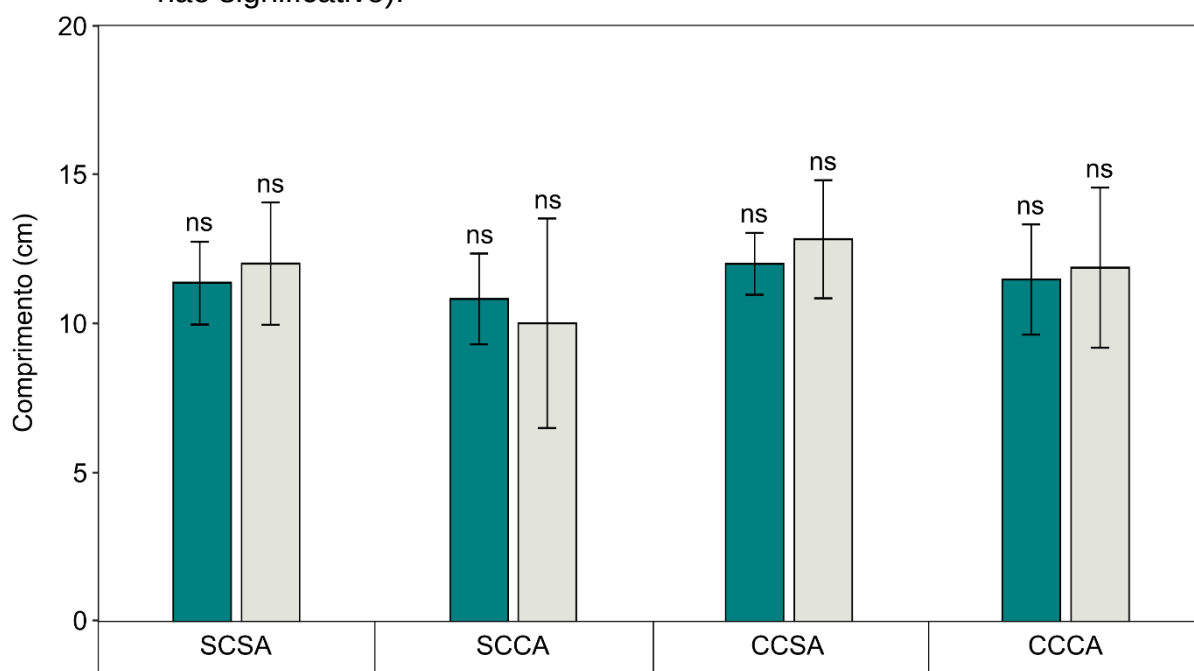
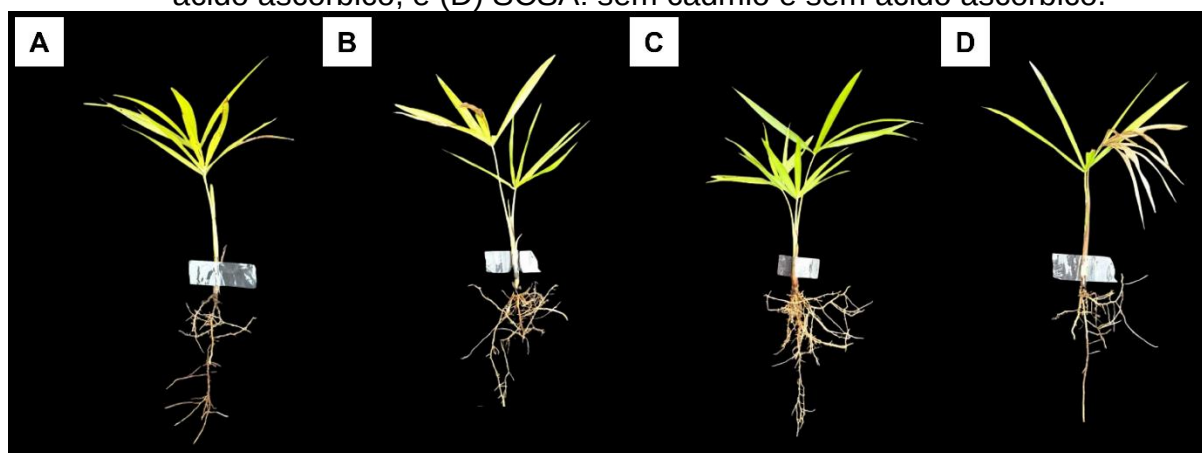
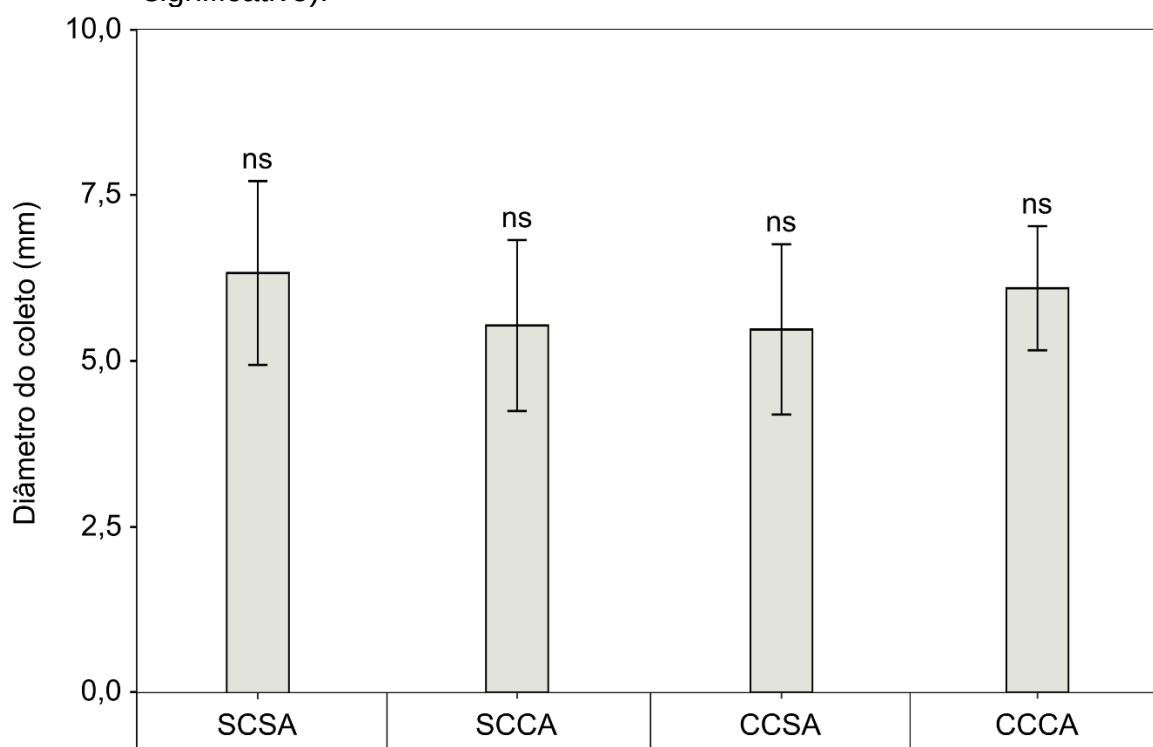


Figura 10 - Plantas de *Euterpe precatoria* Mart. submetidas ao estresse com cádmio (ns = não significativo). (A) CCCA: com cádmio e com ácido ascórbico, (B) CCSA: com cádmio e sem ácido ascórbico, (C) SCCA: sem cádmio e com ácido ascórbico, e (D) SCSA: sem cádmio e sem ácido ascórbico.



E quanto ao diâmetro do coleto das plantas, os tratamentos também não diferiram entre si, sendo estatisticamente semelhantes após 50 dias de exposição ao Cd (Figura 11).

Figura 11 - Diâmetro do coleto (mm) das plantas de *Euterpe precatoria* Mart. submetidas ao estresse com cádmio. CCCA: com cádmio e com ácido ascórbico, CCSA: com cádmio e sem ácido ascórbico, SCCA: sem cádmio e com ácido ascórbico, e SCSA: sem cádmio e sem ácido ascórbico. (ns = não significativo).



Quanto ao número de folhas, não houve diferença entre os tratamentos avaliados. Além disso, também não houve diferença nas massas fresca e seca da parte aérea e raiz (Tabela 1) após 50 dias de exposição ao Cd.

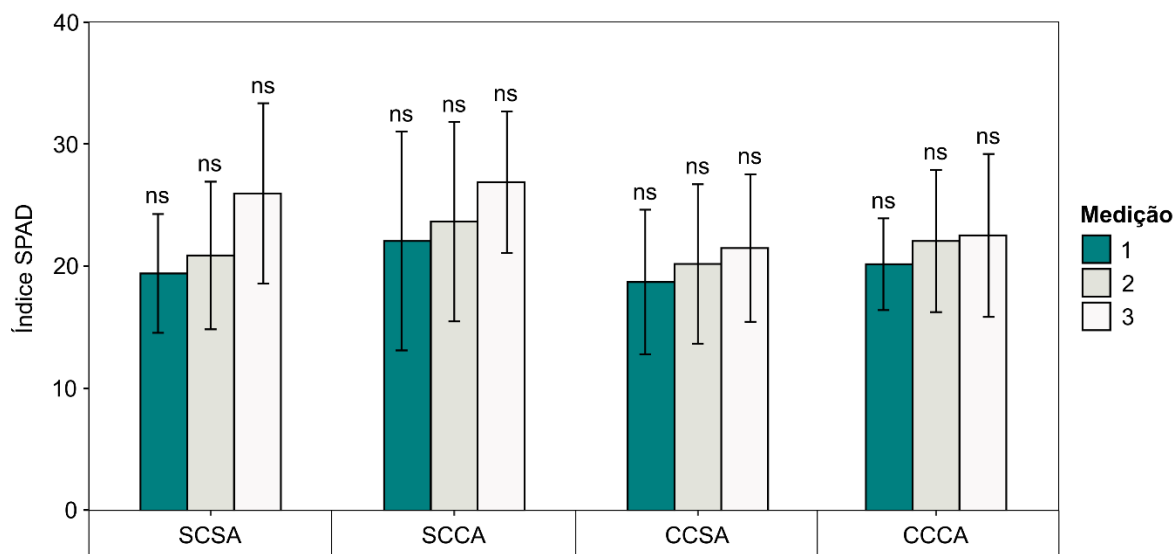
Tabela 1 - Massa fresca e massa seca da parte aérea (MFPA e MSPA) e da raiz (MFR e MSR) das plantas de *Euterpe precatoria* Mart. submetidas ao estresse com cádmio. CCCA: com cádmio e com ácido ascórbico, CCSA: com cádmio e sem ácido ascórbico, SCCA: sem cádmio e com ácido ascórbico, e SCSA: sem cádmio e sem ácido ascórbico. (ns = não significativo).

Tratamento	MFPA	MFR	MSPA	MSR
CCCA	1,09 ± 0,36 ^{ns}	0,45 ± 0,18 ^{ns}	0,49 ± 0,18 ^{ns}	0,23 ± 0,13 ^{ns}
CCSA	1,53 ± 0,58 ^{ns}	0,53 ± 0,32 ^{ns}	0,59 ± 0,18 ^{ns}	0,26 ± 0,11 ^{ns}
SCCA	1,75 ± 0,62 ^{ns}	0,63 ± 0,25 ^{ns}	0,52 ± 0,20 ^{ns}	0,15 ± 0,10 ^{ns}
SCSA	1,36 ± 0,48 ^{ns}	0,34 ± 0,19 ^{ns}	0,64 ± 0,26 ^{ns}	0,24 ± 0,06 ^{ns}

5.1.1. Atividade fotossintética

Quanto à atividade fotossintética, não houve diferenças significativas ($p < 0,05$) entre os tratamentos, avaliando os índices SPAD obtidos neste trabalho (Figura 12).

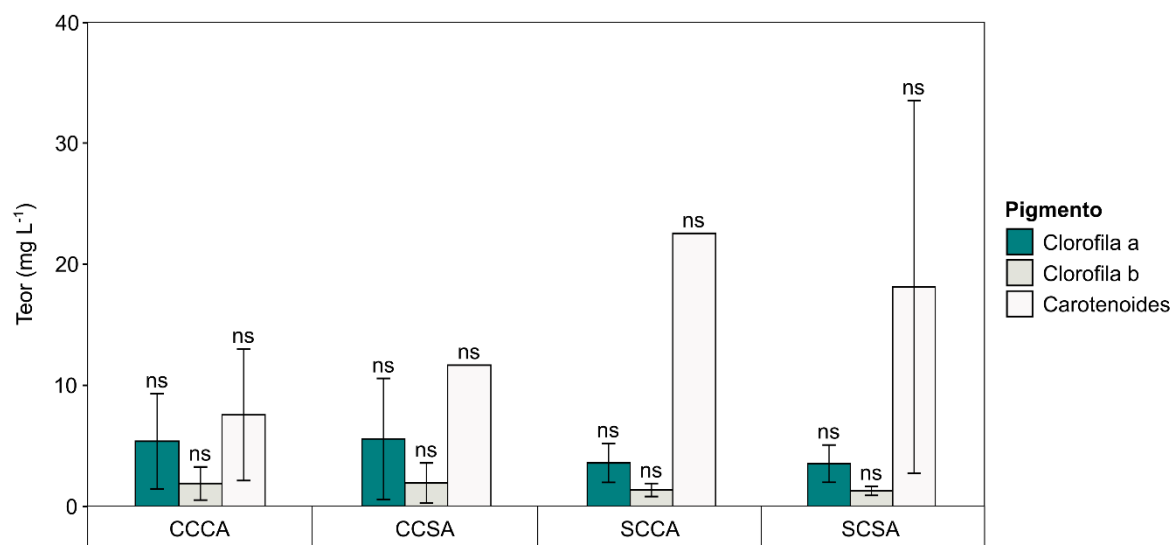
Figura 12 - Índices SPAD das plantas de *Euterpe precatoria* Mart. submetidas ao estresse com cádmio (ns = não significativo). CCCA: com cádmio e com ácido ascórbico, CCSA: com cádmio e sem ácido ascórbico, SCCA: sem cádmio e com ácido ascórbico, e SCSA: sem cádmio e sem ácido ascórbico.



5.1.2. Teores de clorofila e carotenoides

A concentração de clorofila e carotenoides (mg/L) foi avaliada neste estudo. Não houve diferenças significativas ($p < 0,05$) entre os tratamentos (Figura 13).

Figura 13 - Concentração de clorofila e carotenoides (mg/L) das plantas de *Euterpe precatoria* Mart. submetidas ao estresse com cádmio. CCCA: com cádmio e com ácido ascórbico, CCSA: com cádmio e sem ácido ascórbico, SCCA: sem cádmio e com ácido ascórbico, e SCSA: sem cádmio e sem ácido ascórbico. (ns = não significativo).



5.1.3. Concentração de metais pesados nos substratos

A concentração de metais pesados nos substratos variou entre os tratamentos (Tabela 2). Nos substratos avaliados, foi verificada a presença de níquel, cromo e chumbo, além do cádmio. O cromo foi encontrado em pequenas concentrações em todos os tratamentos. Em contrapartida, o níquel e o chumbo apresentaram concentrações maiores em comparação com o cromo. Em relação ao cádmio, ele foi encontrado em baixas concentrações nos tratamentos que não foram contaminados com o metal pesado.

Tabela 2 - Concentração de metais pesados do substrato utilizado no cultivo das plantas de *Euterpe precatoria* Mart. CCCA: com cádmio e com ácido ascórbico, CCSA: com cádmio e sem ácido ascórbico, SCCA: sem cádmio e com ácido ascórbico, e SCSA: sem cádmio e sem ácido ascórbico.

Tratamento	Cádmio	Níquel	Cromo	Chumbo
	----- mg dm ⁻³ -----			
CCCA	2,69	0,36	0,02	0,80
CCSA	2,80	0,42	0,07	0,74
SCCA	0,09	0,38	0,03	0,44
SCSA	0,08	0,37	0,02	0,44

5.1.4. Concentração de Cd nas plantas de açaizeiro solteiro

A concentração de cádmio (mg kg⁻¹) na parte aérea e nas raízes de plantas de *E. precatoria* foram analisadas neste estudo. Os resultados sugerem que as raízes das plantas contaminadas com cádmio acumularam o metal pesado em seus tecidos, possuindo baixa translocação para a parte aérea (Tabela 3).

Tabela 3 - Concentração de cádmio (mg kg⁻¹) na parte aérea e raiz de *Euterpe precatoria* Mart. e fator de translocação do metal pesado. CCCA: com cádmio e com ácido ascórbico, CCSA: com cádmio e sem ácido ascórbico, SCCA: sem cádmio e com ácido ascórbico, e SCSA: sem cádmio e sem ácido ascórbico.

Tratamento	Cd parte aérea	Cd raiz
	----- mg kg ⁻¹ -----	
CCCA	1,24a	22,85
CCSA	2,00a	24,75
SCCA	0,06b	0,06
SCSA	0,06b	0,06

5.1.5. Caracterização química dos nutrientes das plantas de açaizeiro solteiro

A concentração de nutrientes na parte aérea e na raiz das plantas de açaizeiro solteiro foi avaliada neste estudo (Tabela 4). Somente a parte aérea foi submetida às análises estatísticas. Para todos os nutrientes avaliados, não houve diferença significativa entre os tratamentos. Em relação ao nitrogênio (N), as concentrações na parte aérea variaram entre os tratamentos, com o valor mais alto observado no tratamento SCSA (20,60 g kg⁻¹).

Quanto ao fósforo (P), os valores variaram de 1,50 g kg⁻¹ (CCSA) a 2,25 g kg⁻¹ (SCCA e SCSA) na parte aérea. Para o potássio (K), os tratamentos não apresentaram diferenças significativas na parte aérea, embora as concentrações tenham variado entre 13,95 g kg⁻¹ (CCSA) e 14,75 g kg⁻¹ (CCCA). Os valores de cálcio (Ca), magnésio (Mg) e enxofre (S) na parte aérea também não apresentaram diferença entre os tratamentos avaliados. No caso dos micronutrientes, como boro (B), cobre (Cu), ferro (Fe), manganês (Mn) e zinco (Zn), foi observada variação entre os tratamentos.

Tabela 4 - Caracterização química dos nutrientes das plantas de *Euterpe precatoria* Mart.

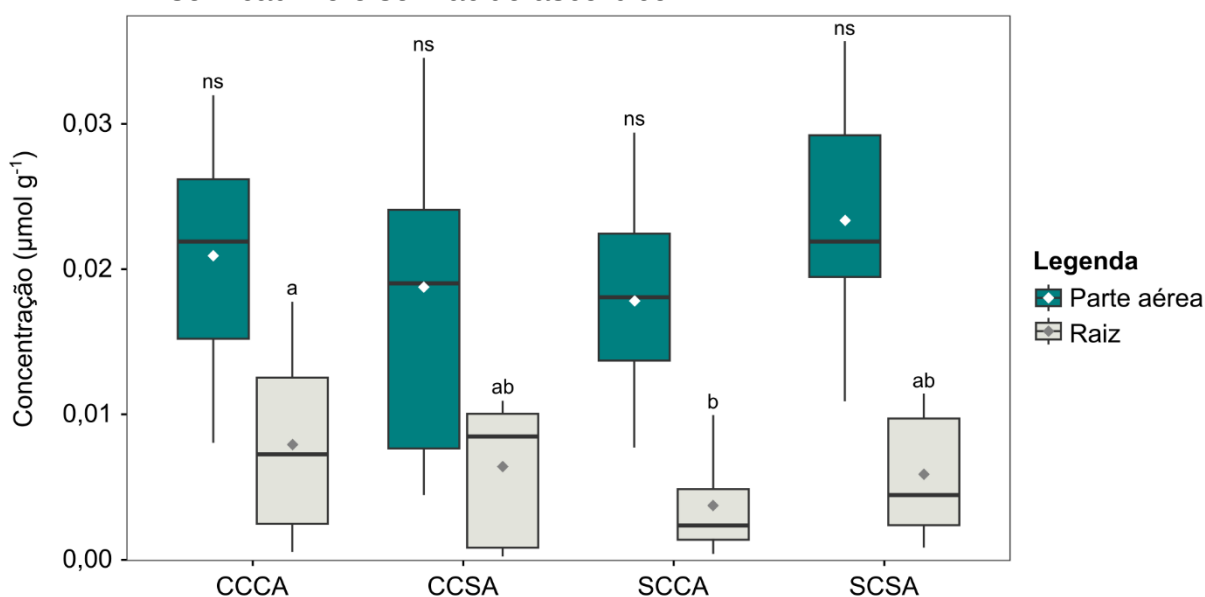
Tratamento	Compartmento vegetal	N	P	K	Ca	Mg	S	B	Cu	Fe	Mn	Zn
		----- g kg ⁻¹ -----						----- mg kg ⁻¹ -----				
CCCA	Parte aérea	8,10 ^{ns}	1,75 ^{ns}	14,75 ^{ns}	4,95 ^{ns}	2,05 ^{ns}	1,30 ^{ns}	41,86 ^{ns}	7,81 ^{ns}	494,84 ^{ns}	587,24 ^{ns}	139,93 ^{ns}
	Raiz	5,80	1,90	11,50	3,80	2,80	0,90	38,19	59,80	16.733,90	1.085,52	56,65
CCSA	Parte aérea	8,10 ^{ns}	1,50 ^{ns}	13,95 ^{ns}	5,10 ^{ns}	1,75 ^{ns}	1,20 ^{ns}	37,47 ^{ns}	5,35 ^{ns}	649,42 ^{ns}	619,27 ^{ns}	114,77 ^{ns}
	Raiz	6,00	1,40	12,60	3,70	2,90	0,80	39,07	58,82	15.186,70	863,38	56,36
SCCA	Parte aérea	10,40 ^{ns}	2,25 ^{ns}	14,30 ^{ns}	5,50 ^{ns}	2,30 ^{ns}	2,05 ^{ns}	44,31 ^{ns}	8,55 ^{ns}	383,33 ^{ns}	607,92 ^{ns}	160,40 ^{ns}
	Raiz	6,40	2,50	11,80	3,60	3,60	1,20	27,96	135,92	7.571,2	544,34	96,29
SCSA	Parte aérea	20,60 ^{ns}	2,25 ^{ns}	13,10 ^{ns}	5,30 ^{ns}	2,20 ^{ns}	1,95 ^{ns}	59,13 ^{ns}	8,89 ^{ns}	446,66 ^{ns}	592,86 ^{ns}	107,76 ^{ns}
	Raiz	6,90	2,50	12,70	3,70	3,50	1,30	11,01	130,59	2.233,72	314,06	94,62

5.2. Análises bioquímicas

5.2.1. Quantificação dos níveis de peróxido de hidrogênio

Quanto aos níveis de peróxido de hidrogênio ($\mu\text{mol g}^{-1}$) nas células, os resultados observados para a parte aérea das plantas não apresentaram diferenças significativas ($p < 0,05$) entre si. Entretanto, observou-se que a concentração de peróxido de hidrogênio na raiz apresentou diferença significativa entre os tratamentos avaliados. O tratamento contaminado com cádmio e que teve aplicação de ácido ascórbico foi o que apresentou maior concentração de peróxido de hidrogênio ($0,0079 \mu\text{mol g}^{-1}$) nas raízes. Em contrapartida, o tratamento que não recebeu cádmio, mas que foi submetido a aplicação de ácido ascórbico, foi o que apresentou menor concentração de peróxido de hidrogênio ($0,0037 \mu\text{mol g}^{-1}$) (Figura 14).

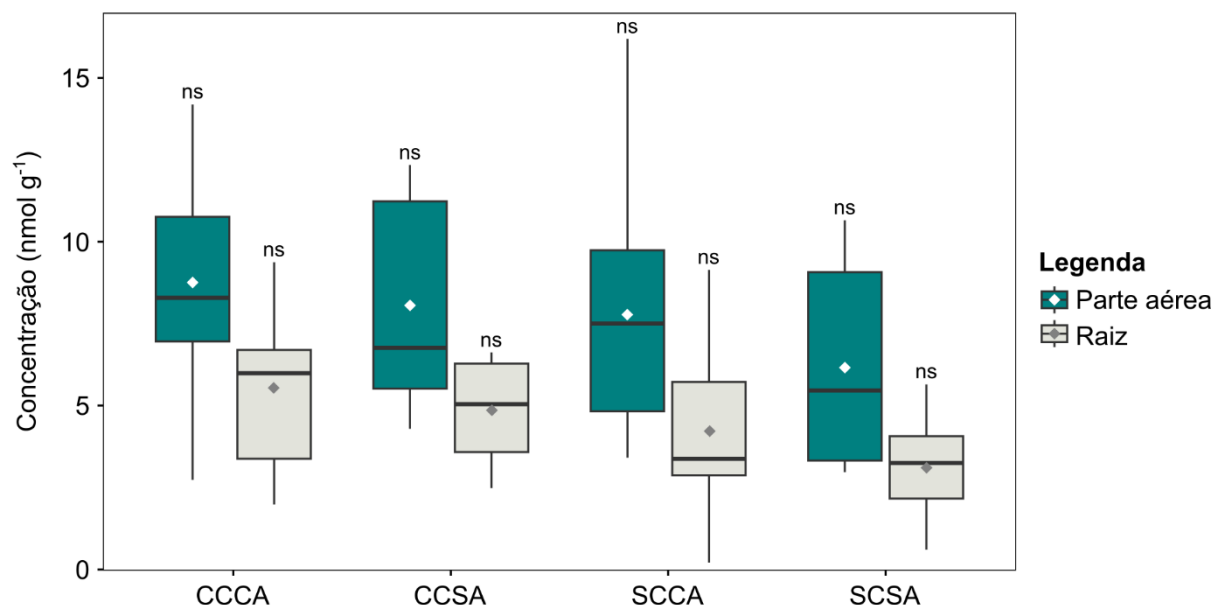
Figura 14 - Concentração de peróxido de hidrogênio ($\mu\text{mol g}^{-1}$) das plantas de *Euterpe precatoria* Mart. submetidas ao estresse com cádmio. (ns = não significativo). Letras diferentes diferem entre si pelo teste de Tukey ($p < 0,05$). CCCA: com cádmio e com ácido ascórbico, CCSA: com cádmio e sem ácido ascórbico, SCCA: sem cádmio e com ácido ascórbico, e SCSA: sem cádmio e sem ácido ascórbico.



5.2.2. Determinação da peroxidação de lipídeos

Para avaliar o efeito da toxicidade do cádmio sob o sistema antioxidante, as plantas tiveram valores de peroxidação lipídica avaliados através da determinação da concentração de MDA (nmol g^{-1}). Os tratamentos não apresentaram diferenças significativas ($p < 0,05$) entre si quanto ao conteúdo de MDA, comparando os tratamentos entre parte aérea e raiz (Figura 15).

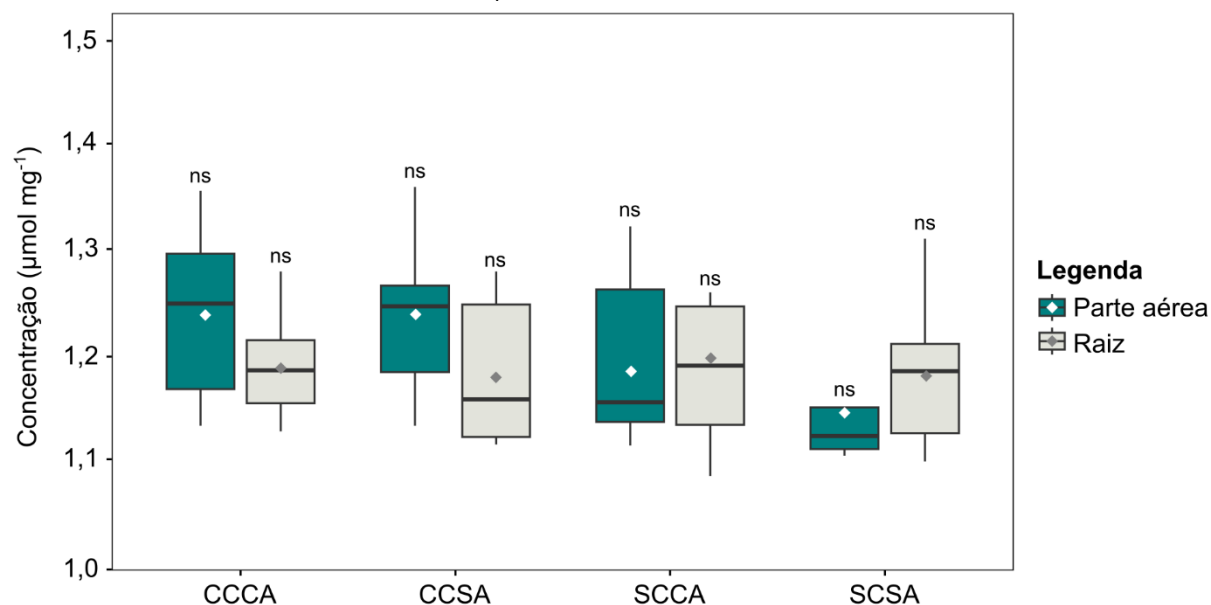
Figura 15 - Conteúdo de MDA (nmol g^{-1}) das plantas de *Euterpe precatoria* Mart. submetidas ao estresse com cádmio. (ns = não significativo). CCCA: com cádmio e com ácido ascórbico, CCSA: com cádmio e sem ácido ascórbico, SCCA: sem cádmio e com ácido ascórbico, e SCSA: sem cádmio e sem ácido ascórbico.



5.2.3. Extração e quantificação da concentração de proteínas totais

Os teores de proteínas solúveis totais para as plantas, avaliadas pelo método de Bradford (1976), não apresentaram diferenças significativas ($p < 0,05$) entre os tratamentos para a parte aérea e raiz (Figura 16).

Figura 16 - Quantificação de proteínas solúveis ($\mu\text{mol mg}^{-1}$) pelo método de Bradford das plantas de *Euterpe precatoria* Mart. submetidas ao estresse com cádmio. (ns = não significativo). CCCA: com cádmio e com ácido ascórbico, CCSA: com cádmio e sem ácido ascórbico, SCCA: sem cádmio e com ácido ascórbico, e SCSA: sem cádmio e sem ácido ascórbico.

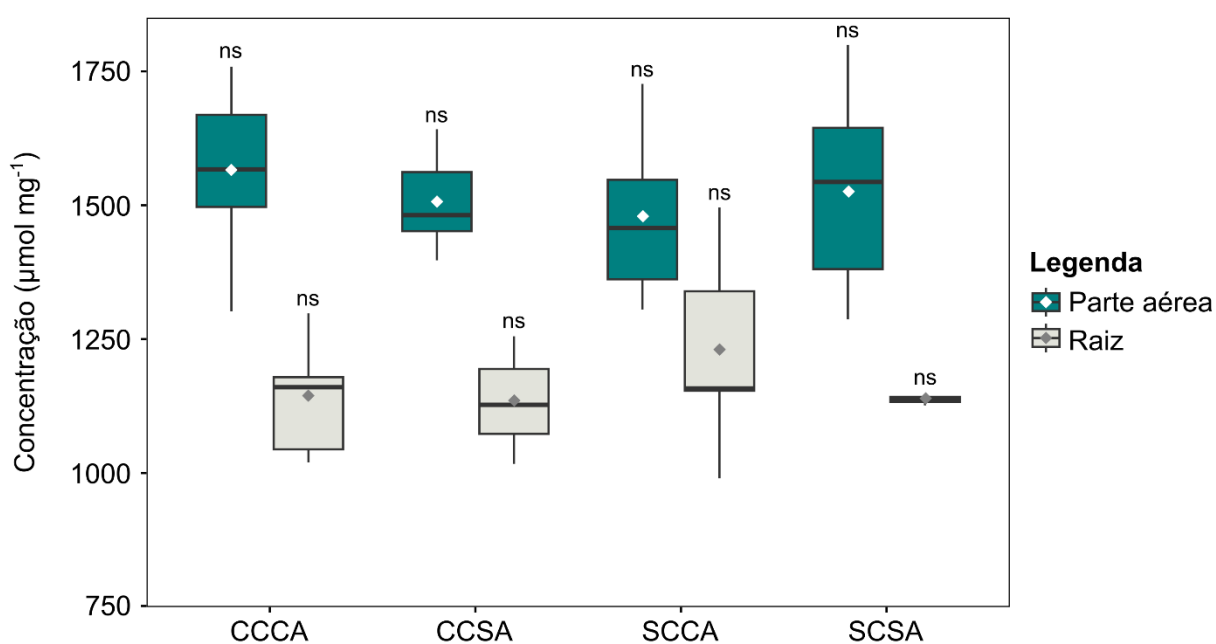


5.2.4. Ensaio de enzimas antioxidantes

5.2.4.1. Atividade da catalase (CAT)

Os níveis da atividade da catalase (CAT) em espectrofotômetro para a parte aérea e raiz de *E. precatoria* não apresentaram diferenças significativas ($p < 0,05$) entre os tratamentos avaliados (Figura 17).

Figura 17 - Atividade da catalase ($\mu\text{mol mg}^{-1}$) em espectrofotômetro das plantas de *Euterpe precatoria* Mart. submetidas ao estresse com cádmio. (ns = não significativo). CCCA: com cádmio e com ácido ascórbico, CCSA: com cádmio e sem ácido ascórbico, SCCA: sem cádmio e com ácido ascórbico, e SCSA: sem cádmio e sem ácido ascórbico.



6. DISCUSSÃO

Um dos principais problemas da atualidade é o acúmulo de altas concentrações de metais pesados no ambiente, provocando estresses que podem afetar o crescimento e desenvolvimento vegetal (Firdous *et al.*, 2023). O cádmio (Cd) é um metal altamente tóxico, retardando o desenvolvimento de atividades morfológicas e metabólicas em plantas (Srivastava *et al.*, 2021).

O acúmulo de metais pesados, particularmente o cádmio (Cd), representa desafios significativos para o crescimento e desenvolvimento das plantas. A espécie *E. precatoria* demonstrou se adaptar ao estresse por Cd, porém, devido ao seu crescimento lento, não a torna candidata à fitorremediação. Em contrapartida, a espécie pode ser cultivada em solos contaminados com Cd, acumulando o metal pesado nas raízes e não translocando o metal pesado para a parte aérea da planta.

O açazeiro solteiro, quando exposto ao Cd, não apresentou incremento das biomassas fresca e seca semelhantes nos tratamentos avaliados. Resultados semelhantes foram observados no estudo de Da Silva *et al.* (2023), onde avaliando plantas de açai-solteiro cultivadas em casa de vegetação expostas ao Cd, não houve inibição do incremento de biomassa da espécie depois de 40 dias. A redução desses parâmetros pode estar relacionada com o aumento de dias de exposição ao metal pesado (Firdous *et al.*, 2023).

A ausência de efeito da exposição das plantas ao Cd no desenvolvimento das raízes pode ser um sinal de alta tolerância em uma planta, já que as raízes são os sítios primários de toxicidade por Cd, uma vez que estão diretamente associadas com a absorção de metais pesados (Firdous *et al.*, 2023), sendo o indicador mais sensível de uma planta (Da Silva *et al.*, 2023).

De acordo com Kabata e Pendias (2001), o nível crítico total de Cd no solo para as plantas é de 3 a 8 mg/kg. Quando os valores excedem este limite, podem começar a aparecer sintomas de toxicidade nos tecidos das plantas. A toxicidade do contaminante pode variar, podendo causar uma série de impactos negativos no crescimento inicial da planta (Accioly e Siqueira, 2000). No entanto, esses efeitos não foram evidenciados neste estudo.

A resistência a metais pesados, como o Cd, está fortemente ligada à capacidade da planta de neutralizar a produção de espécies reativas de oxigênio (ERO) induzida pelo Cd, mediada pela ação de enzimas antioxidantes. Portanto, um

sistema antioxidante enzimático eficaz é crucial para a resistência de plantas (Apel; Hirt, 2004; Harrison *et al.*, 2009).

As plantas de açaizeiro solteiro não apresentaram clorose nas folhas. Mas esse fator não está relacionado com a atividade da enzima catalase (CAT), enzima antioxidante responsável por converter o peróxido de hidrogênio (H_2O_2) em água, sendo uma molécula capaz de causar danos irreversíveis aos cloroplastos (Rossbach *et al.*, 2008), uma vez que os tratamentos apresentaram efeitos semelhantes. A capacidade da planta de neutralizar espécies reativas de oxigênio (ERO) é uma característica importante para sua resistência à toxicidade do Cd (Soni *et al.*, 2023; Asiminicesei *et al.*, 2024).

Embora *E. precatória* mostre tolerância ao estresse de exposição ao Cd, os efeitos de longo prazo da exposição a metais pesados em seus processos metabólicos exigem investigação mais aprofundada para garantir práticas sustentáveis de produção da cultura em solos contaminados com Cd.

7. CONCLUSÃO

O cádmio (Cd) não alterou os parâmetros de crescimento avaliados, não influenciando o incremento das biomassas fresca e seca das plantas de açaizeiro solteiro. *E. precatoria* se mostrou uma espécie tolerante ao cádmio, e por apresentar essa propriedade, deve ser investigado o seu potencial de acumulação de cádmio em condições de campo, bem como os mecanismos antioxidantes envolvidos.

8. REFERÊNCIAS

- ACCIOLY, A.M.A.; SIQUEIRA, J.O. Contaminação química e biorremediação do solo. In: NOVAIS, R. F., ALVAREZ V. V. H.; SCHAEFER, C. E. G. R. **Tópicos em Ciência do Solo**. Viçosa-MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, v. 1, p. 299-352, 2000.
- ADİLOĞLU, S.; SAĞLAM, M.T.; ADİLOĞLU, A.; SÜME, A. Phytoremediation of nickel (Ni) from agricultural soils using canola (*Brassica napus* L.). **Desalination and Water Treatment**, v. 57, n. 6, 2014.
- AGUIAR, M.O.; MENDONÇA, M.S. Aspectos morfológicos da germinação e do desenvolvimento plantular em *Euterpe precatoria* Mart. (Açaí-do-Amazonas). **Acta Amazonica**, v. 31, n. 4, p. 687-691, 2001.
- AHMADZADEH, S.; REZAYI, M.; KASSIM, A.; AGHASI, M. Cesium selective polymeric membrane sensor based on p-isopropylcalix[6]arene and its application in environmental samples. **RSC Advances**, v. 5, n. 49, p. 39209-39217, 2015.
- ALEXIEVA, V.; SERGIEV, I.; MAPELLI, S.; KARANOV, E. The effect of drought and ultraviolet radiation on growth and stress markers in pea and wheat. **Plant, Cell and Environment**, v. 24, p. 1337-1344, 2001.
- ANGELOVA, M.B.; PASHOVA, S.B.; SLOKOSKA, L.S. Comparison of antioxidant enzyme biosynthesis by free and immobilized *Aspergillus nidulans* cells. **Enzyme and Microbial Technology**, v. 26, p. 544-549, 2000.
- APEL, K.; HIRT, H. Reactive oxygen species: metabolism, oxidative stress, and signal transduction. **Annual Review of Plant Biology**, v. 55, p. 373-399, 2004.
- AZEVEDO, R.A.; ALAS, R.M.; SMITH, R.J.; LEA, P.J. Response of antioxidant enzymes to transfer from elevated carbon dioxide to air and ozone fumigation, in the leaves and roots of wild-type and a catalase-deficient mutant of barley. **Physiologia Plantarum**, v. 104, n. 2, p. 280-292, 1998.
- BACCOUCH, S.; CHAOUI, A.; FERJANI, E.E. Nickel-induced oxidative damage and antioxidant responses in *Zea mays* shoots. **Plant Physiology and Biochemistry**, v. 36, p. 689-694, 1998.
- BARCELÓ, J.; VÁSQUES, M.D.; POSCHENRIEDER, C. Structural and ultrastructural disorders in cadmium-treated bush bean plants (*Phaseolus vulgaris* L.). **New Phytologist**, v. 108, p. 37-49, 1988.
- BARTLETT, M.S. Properties of sufficiency and statistical tests. **Proceedings of the Royal Society of London, Series A**, v. 160, p. 268-282, 1937.
- BENAVIDES, M.P.; GALLEGU, S.M.; TOMARO, M.L. Cadmium toxicity in plants. **Brazilian Journal of Plant Physiology**, v. 17, p. 5-52, 2005.
- BETTAIEB, T.; ARBAOUI, S. Heavy metal accumulation in micropropagated plants of kenaf (*Hibiscus cannabinus* L.). **International Journal on Advanced Science, Engineering and Information Technology**, v. 6, p. 32-33, 2018.

BHARGAVA, A.; CARMONA, F.F.; BHARGAVA, M.; SRIVASTAVA, S. Approaches for enhanced phytoextraction of heavy metals. **Journal of Environmental Management**, v. 105, p. 103-120, 2012.

BOEIRA, L.S.; FREITAS, P.H.B.; UCHÔA, N.R.; BEZERRA, J.Á.; CÂD, S.V.; DUVOIS JUNIOR, S.; ALBUQUERQUE, P.M.; MAR, J.M.; RAMOS, A.S.; MACHADO, M.B.; MACIEL, L.R. Chemical and sensorial characterization of a novel alcoholic diferent produced with native acai (*Euterpe precatoria*) from diferente regions of the Amazonas state. **LWT - Food Science and Technology**, v. 117, p. 108632, 2020.

BOUSSAMA, N.; OUARITI, O.; SUZUKI, A.; GHORBAL, M.H. Cd-stress on nitrogen assimilation. **Journal of Plant Physiology**, v. 155, p. 310-317, 1999.

BRADFORD, M.M. A rapid and sensitive method for the quantification of microgram quantities of protein utilizing the principle of protein-dye binding. **Analytical Biochemistry**, v. 72, n. 1, p. 248-254, 1976.

BRUM, H.D.; SOUZA, A.F. Flood disturbance and shade stress shape the population structure of açai palm *Euterpe precatoria*, the most abundant Amazon species. **Botany**, v. 98, n. 3, p. 147-160, 2020.

CARTAXO, C.B.C.; GONZAGA, D.S.O.M.; SILVA, F.A.C.; BAYMA, A.M.A.; PERES, R.T.; MACIEL, V.T. **Caracterização de agroindústrias familiares de frutas do Estado do Acre**. In: CARTAXO, C.B.C.; GONZAGA, D.S.O. M. (Ed.) Perfil das agroindústrias familiares de frutas do Acre. Brasília, DF: Embrapa, 2018.

CARTAXO, C.B.C.; VASCONCELOS, M.A.M.; PAPA, D.A.; GONZAGA, D.S.O.M.; ÁLVARES, V.S. ***Euterpe precatoria* Mart.: boas práticas de produção na coleta e pós-coleta de açai-solteiro**. Rio Branco, AC: Embrapa Acre, 2020.

CHANEY, R.L.; MALIK, M.; LI, Y.M.; BROWN, S.L.; BREWER, E.P.; ANGLE, J.S.; BAKER, A.J. Phytoremediation of soil metals. **Current Opinion in Biotechnology**, v. 8, n. 3, p. 279-284, 1997.

CHAO, D.Y.; SILVA, A.; BAXTER, I.; HUANG, Y.S.; NORDBORG, M.; DANKU, J.; LAHNER, B.; YAKUBOVA, E.; SALT, D.E. Genome-wide association studies identify heavy metal ATPase3 as the primary determinant of natural variation in leaf cadmium in *Arabidopsis thaliana*. **PLOS Genetics**, v. 8, p. e1002923, 2012.

CHEN, S.C.; LIN, H.C.; CHEN, W.Y. Risks of consuming cadmium-contaminated shellfish under seawater acidification scenario: estimates of PBPK and benchmark dose. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, v. 201, p. 110763, 2020.

CHEN, S.L.; KAO, C.H. Glutathione reduces the inhibition of rice seedlings root growth caused by cadmium. **Plant Growth Regulation**, v. 16, p. 49-252, 1995.

CHENG, F.; ZHAO, N.; XU, H.; LI, Y.; ZHANG, W.; ZHU, Z.; CHEN, M. Cadmium and lead contamination in japonica rice grains and its variation among the different locations in southeast China. **Science of The Total Environment**, v. 359, n. 1-3, p. 156-166, 2006.

CLEMENS, S.; MA, J.F. Toxic Heavy metal and metalloid accumulation in crop plants and foods. **Annual Review of Plant Biology**, v. 67, p. 489-512, 2016.

S. CLEMENS. Molecular mechanisms of plant metal tolerance and homeostasis. **Planta**, v. 212, n. 4, p. 475-486, 2001.

CUYPERS, A.; PLUSQUIN, M.; REMANS, T.; JOZEFCHAK, M.; KEUNEN, E.; GIELEN, H.; OPDENAKKER, K.; NAIR, A.R.; MUNTERS, E.; ARTOIS, T.J.; NAWROT, T.; VANGRONSVELD, J.; SMEETS, K. Cadmium stress: an oxidative challenge. **Biomaterials**, v. 23, n. 5, p. 927-940, 2010.

DA SILVA, T.A.; DE MELO, W.S.; DA SILVA, B.K.A. Desempenho de crescimento do açaí solteiro (*Euterpe precatoria* Mart.) em solos com diferentes níveis de cádmio e matéria orgânica. **Scientia Naturalis**, v. 5, n. 1, p. 80-92, 2023.

DAS, P.; SAMANTARAY, S.; ROUT, G.R. Studies on cadmium toxicity in plants: a review. **Environmental Pollution**, v. 98, p. 29-36, 1997.

FERREIRA, J.C.B.; SILVA-CARDOSO, I.M.; MEIRA, R.O.; SCHERWINSKI-PEREIRA, J.E. Somatic embryogenesis and plant regeneration from zygotic embryos of the palm tree *Euterpe precatoria* Mart. **Plant Cell, Tissue and Organ Culture (PCTOC)**, v. 148, p. 667-686, 2022.

FERREIRA, M.P.; ALMEIDA, D.R.A.; PAPA, D.A.; MINERVINO, J.B.S.; VERAS, H.F.P.; FORMIGHIERI, A.; SANTOS, C.A.N.; FERREIRA, M.A.D.; FIGUEIREDO, E.O.; FERREIRA, E.J.L. Individual tree detection and species classification of Amazonian palms using UAV images and deep learning. **Forest Ecology and Management**, v. 475, p. 118397, 2020.

FIRDOUS, K.A.; VIVEK, P.J.; NEETHU, K.; RESMI, M.S. Physio-anatomical modifications and element allocation pattern in *Alternanthera tenella* Colla. associated with phytoextraction of chromium. **Environmental Science and Pollution Research**, 2023.

FRIDOVICH, I. Superoxide Radical and Superoxide Dismutases. **Annual Review of Biochemistry**, v. 64, n. 97, p. 112, 1995.

GARG, N.; MANCHANDA, G. ROS generation in plants: Boon or bane? **Plant Biosystems**, v. 143, n. 1, p. 81-96, 2009.

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

GOMES-JUNIOR, R.A.; MOLDES, C.A.; DELITE, F.S.; POMPEU, G.B.; GRATÃO, P.L.; MAZZAFERA, P.; LEA, P.J.; AZEVEDO, R.A. Antioxidant metabolism of coffee cell suspension cultures in response to cadmium. **Chemosphere**, v. 65, n. 8, p. 1330-1337, 2006.

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

GUPTA, A.K. GUPTA, S.K. VERMA, K. KHAN.; R.K. VERMA, Phytoremediation using aromatic plants: A Sustainable approach for remediation of heavy metals polluted sites. **Environmental Science & Technology**, v. 47, p. 10115-10116, 2013.

GUTSCH, A.; KEUNEN, E.; GUERRIERO, G.; RENAUT, J.; CUYPERS, A.; HAUSMAN, J.F.; SERGEANT, K. Long-term cadmium exposure influences the abundance of proteins that impact the cell wall structure in *Medicago sativa* stems. **Plant Biology**, v. 20, n. 6, p. 1023-1035, 2018a.

GUTSCH, A.; ZOUAGHI, S.; RENAUT, J.; CUYPERS, A.; HAUSMAN, J.F.; SERGEANT, K. Changes in the proteome of *Medicago sativa* leaves in response to long-term cadmium exposure using a cell-wall targeted approach. **International Journal of Molecular Sciences**, v. 19, n. 9, p. 2498, 2018b.

HAAG-KERWER, A.; SCHAFER, H.J.; HEISS, S.; WALTER, C.; RAUSCH, T. Cadmium exposure in *Brassica juncea* causes a decline in transpiration rate and leaf expansion without effect on photosynthesis. **Journal of Experimental Botany**, v. 50, p. 1827-1835, 1999.

HALLIWELL, B. Reactive species and antioxidants. Redox biology is a fundamental theme of aerobic life. **Plant Physiology**, v. 141, n. 2, p. 312-322, 2006.

HANSBERG, W.; SALAS-LIZANA, R.; DOMÍNGUEZ, L. Fungal catalases: function, phylogenetic origin and structure. **Archives of Biochemistry and Biophysics**, v. 525, n. 2, p. 170-180, 2012.

HARRISON, J.J.; TREMAROLI, V.; STAN, M.A.; CHAN, C.S.; VACCHI-SUZZI, C.; HEYNE, B.J.; PARSEK, M.R.; CERI, H.; TURNER, R.J. Chromosomal antioxidant genes have metal ion-specific roles as determinants of bacterial metal tolerance. **Environmental Microbiology**, v. 11, n. 10, p. 2491-2509, 2009.

HE, Q.X. Research progress of screening cadmium hyperaccumulators. **Circular economy and environmental protection**, v. 33, p. 46-49, 2013.

HEATH, R.L.; PACKER, L. Photoperoxidation in isolated chloroplasts. I. Kinetics and stoichiometry of fatty acid peroxidation. **Archives of Biochemistry and Biophysics**, v. 125, p. 189-198, 1968.

HENDERSON, A.; GALEANO, G. *Euterpe*, *Prestoea*, and *Neonicholsonia* (Palmae). **The New York Botanical Garden**, 1996.

HENDERSON, A.; GALEANO, G.; BERNAL, R. Field guide to the palms of the Americas. **Princeton University Press**, 2019.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Produção de Açaí (cultivo)**, 2022.

IKHAJIAGBE, B.; OGWU, M.C.; LATO, N.F. Growth and yield responses of soybean (*Glycine max* [L.] Merr.) accessions after exposure to cadmium. **Vegetos**, v. 34, p. 107-118, 2021.

ISAURE, M.P.; HUGUET, S.; MEYER, C.L.; CASTILLO-MICHEL, H.; TESTEMALE, D.; VANTELON, D.; SAUMITOU-LAPRADE, P.; VERBRUGGEN, N.; SARRET, G. Evidence of various mechanisms of Cd sequestration in the hyperaccumulator *Arabidopsis halleri*, the non-accumulator *Arabidopsis lyrata*, and their progenies by combined synchrotron-based techniques. **Journal of Experimental Botany**, v. 66, n. 11, p. 3201-3214, 2015.

JINADASA, N.; COLLINS, D.; HOLFORD, P.; MILHAM, P.J.; CONROY, J.P. Reactions to cadmium stress in a cadmium-tolerant variety of cabbage (*Brassica oleracea* L.): is cadmium tolerance necessarily desirable in food crops? **Environmental Science and Pollution Research**, v. 23, p. 5296-5306, 2016.

KABATA, P.A.; PENDIAS, H. **Trace elements in soils and plants**. 3. ed. Flórida: CRC, p. 413, 2001.

KANG, J.; XIE, C.; LI, Z.; NAGARAJAN, S.; SCHAUSS, A. G.; WU, T.; WU, X. Flavonoids from acai (*Euterpe oleracea* Mart.) pulp and their antioxidant and anti-inflammatory activities. **Food Chemistry**, v. 128, p. 152-157, 2011.

KANG, J.; THAKALI, K.M.; XIE, C.; KONDO, M.; TONG, Y.; OU, B.; JENSEN, G.; MEDINA, M.B.; SCHAUSS, A.G.; WU, X. Bioactivities of acai (*Euterpe precatoria* Mart.) fruit pulp, superior antioxidant and anti-inflammatory properties to *Euterpe oleracea* Mart. **Food Chemistry**, v. 133, p. 671-677, 2012.

KANWAR, V.S.; SHARMA, A.; SRIVASTAV, A.L.; RANI, L. Phytoremediation of toxic metals present in soil and water environment: a critical review. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 27, n. 36, p. 44835-44860, 2020.

KASHEM, A.; KAWAI, S.; KIKUCHI, N.; TAKAHASHI, H.; SUGAWARA, R.; SINGH, B.R. Effect of Iherzolite on chemical fractions of Cd and Zn and their uptake by plants in contaminated soil. **Water, Air and Soil Pollution**, v. 207, p. 241-251, 2010.

KELEPERTSIS, A.E.; ANDRULAKIS, I. Geobotany-biogeochemistry for mineral exploration of sulphide deposits in northern Greece. Heavy metal accumulation by *Rumex acetosella* L. and *Minuartia verna* (L.) Hiern. **Journal of Geochemical Exploration**, v. 18, 267-274, 1983.

KHAN, M.A.; KHAN, S.; KHAN, A.; ALAM, M. Soil contamination with cadmium, consequences and remediation using organic amendments. **Science of the Total Environment**, p. 1591-1605, 2017.

KORENKOV, V.; KING, B.; HIRSCHI, K.; WAGNER, G.J. Root-selective expression of AtCAX4 and AtCAX2 results in reduced lamina cadmium in field-grown *Nicotiana tabacum* L. **Plant Biotechnology Journal**, v. 7, n. 3, p. 219-226, 2009.

KRÄMER, U. Metal hyperaccumulation in plants. **Annual Review of Plant Biology**, v. 61, p. 517-534, 2010.

KRAUS, T.E., MCKERSIE, B.D., FLETCHER, R.A. Paclobutrazol induced tolerance of wheat leaves to paraquat may involve increased antioxidant enzyme activity. **Journal of Plant Physiology**, v. 145, n. 4, 570-576, 1995.

KÜCHMEISTER, H.; SILBERBAUER-GOTTSBERGER, I.; GOTTSBERGER, G. Flowering, pollination, nectar standing crop, and nectaries of *Euterpe precatoria* (Arecaceae), an Amazonian rain forest palm. **Plant Systematics and Evolution**, v. 206, n. 1, p. 71-97, 1997.

LIU, Z.; TRAN, K.Q. A review on disposal and utilization of phytoremediation plants containing heavy metals. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, v. 226, p. 112821, 2021.

LIU, H.; ZHAO, H.; WU, L.; LIU, A.; ZHAO, F.J.; XU, W. Heavy metal ATPase 3 (HMA3) confers cadmium hypertolerance on the cadmium/zinc hyperaccumulator *Sedum plumbizincicola*. **New Phytologist**, v. 215, n. 2, p. 687-698, 2017.

LOPES, E.; SOARES-FILHO, B.; SOUZA, F.; RAJÃO, R.; MERRY, F.; RIBEIRO, S.C. Mapping the socio-ecology of Non Timber Forest Products (NTFP) extraction in the Brazilian Amazon: The case of açai (*Euterpe precatoria* Mart) in Acre. **Landscape and Urban Planning**, v. 188, p. 110-117, 2019.

LOZANO-RODRIGUEZ, E.; HERNÁNDEZ, L.E.; BONAY, P.; CARPENA-RUIZ, R.O. Distribution of cadmium in shoot and root tissues of maize and pea plants: physiological disturbances. **Journal of Experimental Botany**, v. 48, p. 123-128, 1997.

LU, L.L.; TIAN, S.K.; YANG, X.E.; WANG, X.C.; BROWN, P.; LI, T.Q.; HE, Z.L. Enhanced root-to-shoot translocation of cadmium in the hyperaccumulating ecotype of *Sedum alfredii*. **Journal of Experimental Botany**, v. 59, n. 11, p. 3203-3213, 2008.

LUO, J.S.; HUANG, J.; ZENG, D.L.; PENG, J.S.; ZHANG, G.B.; MA, H.L.; GUAN, Y.; YI, H.Y.; FU, Y.L.; HAN, B.; LIN, H.X.; QIAN, Q.; GONG, J.M. A defensin-like protein drives cadmium efflux and allocation in rice. **Nature Communications**, v. 9, n. 1, p. 645, 2018.

MAHMOOD, Q.; ASIF, M.; SHAHEEN, S.; HAYAT, M.T.; ALI, S. Cadmium Contamination in Water and Soil. **Cadmium Toxicity and Tolerance in Plants**, 2019.

MALLICK, N.; MOHN, F.H. Reactive oxygen species: response of algal cells. **Journal of Plant Physiology**, v. 157, n. 2, p. 183-193, 2000.

MENCH, M.; MARTIN, E.; SOLTA, P. After effects of metals derived from a highly metalpolluted sludge on maize (*Zea mays* L.). **Water, Air and Soil Pollution**, v. 75, p. 277-291, 1994.

MIGOCKA, M.; KOSIERADZKA, A.; PAPIERNIAK, A.; MACIASZCZYK-DZIUBINSKA, E.; POSYNIK, E.; GARBIEC, A.; FILLEUR, S. Two metal-tolerance proteins, MTP1 and MTP4, are involved in Zn homeostasis and Cd sequestration in cucumber cells. **Journal of Experimental Botany**, v. 66, n. 3, p. 1001-1015, 2015a.

MIGOCKA, M.; PAPIERNIAK, A.; KOSIERADZKA, A.; POSYNIK, E.; MACIASZCZYK-DZIUBINSKA, E.; BISKUP, R.; GARBIEC, A.; MARCHEWKA, T. Cucumber metal tolerance protein CsMTP9 is a plasma membrane H⁺-coupled antiporter involved in the Mn²⁺ and Cd²⁺ efflux from root cells. **The Plant Journal**, v. 84, n. 6, p. 1045-1058, 2015b.

MIYADATE, H.; ADACHI, S.; HIRAIZUMI, A.; TEZUKA, K.; NAKAZAWA, N.; KAWAMOTO, T.; KATOU, K.; KODAMA, I.; SAKURAI, K.; TAKAHASHI, H.; SATOH-NAGASAWA, N.; WATANABE, A.; FUJIMURA, T.; AKAGI, H. OsHMA3, a P1B-type of ATPase affects root-to-shoot cadmium translocation in rice by mediating efflux into vacuoles. **New Phytologist**, v. 189, n. 1, p. 190-199, 2011.

MOCQUOT, B.; VANGRONVELD, J.; CLIJSTERS, H.; MENCH, M. Copper toxicity in young maize (*Zea mays* L.) plants: effects on growth, mineral and chlorophyll contents, and enzyme activities. **Plant and Soil**, v. 182, p. 287-300, 1996.

MORENO, J.L.; HERNANDEZ, T.; GARCIA, C. Effects of a cadmium-contaminated sewage sludge compost on dynamics of organic matter and microbial activity in an arid soil. **Biology and Fertility of Soils**, v. 28, p. 230-237, 1999.

MUNIRA, S.; FARENHORST, A.; FLATEN, D.; GRANT, C. Phosphate fertilizer impacts on glyphosate sorption by soil. **Chemosphere**, v. 153, p. 471-477, 2016.

NASCIMENTO, C.W.A.; PEREIRA, J.B.M. Absorção e distribuição de cádmio e micronutrientes em cultivares de feijoeiro expostas a doses de cádmio. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 32, p. 1303-1308, 1997.

NAWROT, T.S.; HECKE, E.V.; THIJS, L.; RICHART, T.; KUZNETSOVA, T.; JIN, Y.; VANGROSVELD, J.; ROELS, H.A.; STAESSEN, J.A. Cadmium-related mortality and long-term secular trends in the cadmium body burden of an environmentally exposed population. **Environment Health Perspectives**, v. 116, p. 1620-1628, 2008.

LIANGJIE NIU, CHUNYANG LI, WEI WANG, JINGHUA ZHANG, MONICA SCALI, WEIQIANG LI, HUI LIU, FUJU TAI, XIULI HU, XIAOLIN WU. Cadmium tolerance and hyperaccumulation in plants – A proteomic perspective of phytoremediation. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, v. 256, p. 114882, 2023.

NOCTOR, G.; GOMEZ, L.; VANACKER, H.; FOYER, C.H. Interactions between biosynthesis, compartmentation and transport in the control of glutathione homeostasis and signalling. **Journal of Experimental Botany**, v. 53, p. 1283-1304, 2002.

PACHECO-PALENCIA, L.A.; DUNCAN, C.E.; TALCOTT, S.T. Phytochemical composition and thermal stability of two commercial açai species, *Euterpe oleracea* and *Euterpe precatoria*. **Food Chemistry**, v. 115, p. 1199-1205, 2009.

PAN, L.B.; MA, J.; WANG, X.L.; HOU, H. Heavy metals in soils from a typical county in Shanxi Province, China: Levels, sources and spatial distribution. **Chemosphere**, v. 148, p. 248-254, 2016.

PARK, J.; SONG, W.Y.; KO, D.; EOM, Y.; HANSEN, T.H.; SCHILLER, M.; LEE, T.G.; MARTINOIA, E.; LEE, Y. The phytochelatin transporters AtABCC1 and AtABCC2 mediate tolerance to cadmium and Mercury. **The Plant Journal**, v. 69, n. 2, p. 278-288, 2012.

PETERS, L.P.; PRADO, L.S.; SILVA, F.I.N.; SOUZA, F.S.C.; CARVALHO, C.M. Selection of endophytes as antagonists of *Colletotrichum gloeosporioides* in açai palm. **Biological Control**, v. 150, p. 104350, 2020.

QADIR, A.M.; GHAFOR, G.; MURTAZA, G. Cadmium concentration in vegetables grown on urban soils irrigated with untreated municipal sewage. **Environment, Development and Sustainability**, v. 2, p. 11-19, 2000.

RASHEED, R.; ASHRAF, A.; KAMRAN, S.; IQBAL, M.; HUSSAIN, I. Menadione sodium bisulphite mediated growth, secondary metabolism, nutrient uptake and oxidative defense in okra (*Abelmoschus esculentus* Moench) under cadmium stress. **Journal of Hazardous Materials**, 2018.

REHMAN, M.; FAHAD, S.; DU, G.; CHENG, X.; YANG, Y.; TANG, K.; LIU, L.; LIU, F.H.; DENG, G. Evaluation of hemp (*Cannabis sativa* L.) as an industrial crop: a

review. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 28, n. 38, p. 52832-52843, 2021.

REZAYI, M.; HENG, L.Y.; KASSIM, A.; AHMADZADEH, S.; ABDOLLAHI, Y.; JAHANGIRIAN, H. Immobilization of ionophore and surface characterization studies of the titanium(iii) ion in a PVC-membrane sensor. **Sensors**, v. 12, n. 7, p. 8806-8814, 2012.

ROSSBACH, S.; MAI, D.J.; CARTER, E.L.; SAUVIAC, L.; CAPELA, D.; BRUAND, C.; DE BRUIJN, F.J. Response of *Sinorhizobium meliloti* to elevated concentrations of cadmium and zinc. **Applied and Environmental Microbiology**, v. 74, n. 13, p. 4218-4221, 2008.

SADOWSKY, M.J. Phytoremediation: Past Promises and Future Practices. **Microbial Biosystems: New Frontiers**, 1999.

SALT, D.E.; PRINCE, R.C.; PICKERING, I.J.; RASKIN, I. Mechanisms of cadmium mobility and accumulation in Indian mustard. **Plant Physiology**, v. 109, p. 1427-1433, 1995.

SCANDALIOS, J.G. Response of plant antioxidant defense genes to environmental stress. **Advances in Genetics**, v. 28, p. 1-41, 1990.

SCHICKLER, H.; CASPI, H. Response of antioxidative enzymes to nickel and cadmium stress in hyperaccumulator plants of the genus *Alyssum*. **Physiologia Plantarum**, v. 105, p. 39-44, 1999.

SEBASTIAN, A.; PRASAD, M.N.V. Mitigation of cadmium stress in cereals: molecular signaling and agronomic aspects. HASANUZZAMAN, M.; PRASAD, M.N.V.; NAHAR, K. (Eds.), Cadmium Tolerance in Plants. **Academic Press**, p. 401-422, 2019.

SHAPIRO, S.S.; WILK, M.B. An analysis of variance test for normality (complete samples). **Biometrika**, v. 52, n. 3-4, p. 591-611, 1965.

SHEHATA, S.M.; REHAM, K.; BADAWEY, Y.; ABOULSOUD, I.E. Phytoremediation of some heavy metals in contaminated soil. **Bulletin of the National Research Centre**, v. 43, n. 189, 2019.

SILVA, T.A.; MELO, W.S.; SILVA, B.K.A. Desempenho de crescimento do açaí solteiro (*Euterpe precatoria* Mart.) em solos com diferentes níveis de cádmio e matéria orgânica. **Scientia Naturalis**, v. 5, n. 1, p. 80-92, 2023.

SINGH, S.; PARIHAR, P.; SINGH, R.; SINGH, V.P.; PRASAD, S.M. Heavy metal tolerance in plants: role of transcriptomics, proteomics, metabolomics, and ionomics. **Frontiers in Plant Science**, v. 6, p. 1143, 2016.

ŞOLOMONEA, B.G.; JINGA, L.I.; ANTOHE, V.A.; SOCOL, G.; ANTOHE, I. Cadmium ions' trace-level detection using a portable fiber optic-surface plasmon resonance sensor. **Biosensors (Basel)**, v. 12, n. 8, p. 573, 2022.

SONG, Y.; JIN, L.; WANG, X. Cadmium absorption and transportation pathways in plants. **International Journal of Phytoremediation**, v. 19, n. 2, p. 133-141, 2017.

SRIVASTAVA, D.; TIWARI, M.; DUTTA, P.; SINGH, P.; CHAWDA, K.; KUMARI, M.; CHAKRABARTY, D. Estresse de cromo em plantas: toxicidade, tolerância e fitorremediação. **Sustentabilidade**, v. 13, n. 4629, 2021.

TROUTNER A. **Cadmium: the highly toxic metal that powers the world**, 2022.

TUOMAINEN, M.H.; NUNAN, N.; LEHESRANTA, S.J.; TERVAHAUTA, A.I.; HASSINEN, V.H.; SCHAT, H.; KOISTINEN, K.M.; AURIOLA, S.; MCNICOL, J.; KÄRENLAMPI, S.O. Multivariate analysis of protein profiles of metal hyperaccumulator *Thlaspi caerulescens* accessions. **Proteomics**, v. 6, n. 12, p. 3696-3706, 2006.

UENO, D.; IWASHITA, T.; ZHAO, F.J.; MA, J.F. Characterization of Cd translocation and identification of the Cd form in xylem sap of the Cd-hyperaccumulator *Arabidopsis halleri*. **Plant and Cell Physiology**, v. 49, p. 540-548, 2008.

URAGUCHI, S.; MORI, S.; KURAMATA, M.; KAWASAKI, A.; ARAO, T.; ISHIKAWA, S. Root-to-shoot Cd translocation via the xylem is the major process determining shoot and grain cadmium accumulation in rice. **Journal of Experimental Botany**, v. 60, p. 2677-2688, 2009.

VERBRUGGEN, N.; HERMANS, C.; SCHAT, H. Mechanisms to cope with arsenic or cadmium excess in plants. **Current Opinion in Plant Biology**, v. 12, n. 3, p. 364-372, 2009.

WANG, K.; YU, H.; ZHANG, X.; YE, D.; HUANG, H.; WANG, Y.; ZHENG, Z.; LI, T. A transcriptomic view of cadmium retention in roots of cadmium-safe rice line (*Oryza sativa* L.). **Journal of Hazardous Materials**, v. 418, p. 126379, 2021a.

WANG, N.; WU, X.; LIAO, P.; ZHANG, J.; LIU, N.; ZHOU, Z.; HUANG, H.; ZHANG, L. Morphological transformation of heavy metals and their distribution in soil aggregates during biotransformation of livestock manure. **Biocatalysis and Agricultural Biotechnology**, v. 32, p. 101963, 2021b.

YAMAGUCHI, K.K.L.; PEREIRA, L.F.R.; LAMARÃO, C.V.; LIMA, E.S.; VEIGA-JUNIOR, V.F. Amazon acai: Chemistry and biological activities: A review. **Food Chemistry**, v. 179, p. 137-151, 2015.

YEŞİLYURT, S. Phytoremediation method and Brassica family: Removal of chromium, cadmium and lead accumulation with broccoli (*Brassica oleracea* var. *italica*). **Results in Chemistry**, v. 6, p. 101005, 2023.

ZHANG, Z.; ZHOU, H.; YU, Q.; LI, Y.; MENDOZA-CÓZATL, D.G.; QIU, B.; LIU, P.; CHEN, Q. Quantitative proteomics analysis of leaves from two *Sedum alfredii* (*Crassulaceae*) populations that differ in cadmium accumulation. **Proteomics**, v. 17, n. 10, p. e1600456, 2017.

ZHANG, S.; SONG, J.; WU, L.; CHEN, Z. Worldwide cadmium accumulation in soybean grains and feasibility of food production on contaminated calcareous soils. **Environmental Pollution**, v. 269, p. 116153, 2021.

ZHAO, F.J.; JIANG, R.F.; DUNHAM, S.J.; MCGRATH, S.P. Cadmium uptake, translocation and tolerance in the hyperaccumulator *Arabidopsis halleri*. **New Phytologist**, v. 172, n. 4, p. 646-654, 2006.

ZHAO, H.; WANG, L.; ZHAO, F.J.; WU, L.; LIU, A.; XU, W. SpHMA1 is a chloroplast cadmium exporter protecting photochemical reactions in the Cd hyperaccumulator *Sedum plumbizincicola*. **Plant, Cell & Environment**, v. 42, n. 4, p. 1112-1124, 2019.

ZHU, Y.; QIU, W.; LI, Y.; TAN, J.; HAN, X.; WU, L.; JIANG, Y.; DENG, Z.; WU, C.; ZHUO, R. Quantitative proteome analysis reveals changes of membrane transport proteins in *Sedum plumbizincicola* under cadmium stress. **Chemosphere**, v. 287, p. 132302, 2022.