

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALFENAS**

**MARIA GABRIELA DA SILVA RIBEIRO**

**Capacidade de bioindicação de *Tillandsia recurvata* para poluição por  
partículas suspensas de resíduo de mineração de ferro**

**ALFENAS/MG**

**2025**

**MARIA GABRIELA DA SILVA RIBEIRO**

**Capacidade de bioindicação da epífita *Tillandsia recurvata* para poluição por partículas suspensas de resíduo de mineração de ferro**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como parte dos requisitos para obtenção do título de Bacharel em Ciências Biológicas pela Universidade Federal de Alfenas.

Orientador: Prof. Dr. Fabricio José Pereira

**ALFENAS/MG**

**2025**

Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal de Alfenas  
Biblioteca Central

Ribeiro, Maria Gabriela da Silva.

Capacidade de bioindicação da epífita *Tillandsia recurvata* para poluição por partículas suspensas de resíduo de mineração de ferro / Maria Gabriela da Silva Ribeiro. - Alfenas, MG, 2025.

34 f. : il. -

Orientador(a): Fabricio José Pereira.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Ciências Biológicas) - Universidade Federal de Alfenas, Alfenas, MG, 2025.  
Bibliografia.

1. Cravo do mato. 2. Epífitas. 3. Ecofisiologia. 4. Anatomia foliar. 5. Bromeliaceae. I. Pereira, Fabricio José, orient. II. Título.

Ficha gerada automaticamente com os dados fornecidos pelo autor.

**MARIA GABRIELA DA SILVA RIBEIRO**

**Capacidade de bioindicação da epífita *Tillandsia recurvata* para poluição por partículas suspensas de resíduo de mineração de ferro**

O Presidente da banca examinadora abaixo assina a aprovação do Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como parte dos requisitos para obtenção do título de Bacharel em Ciências Biológicas pela Universidade Federal de Alfenas.

Aprovada em: 12 de Dezembro de 2025

Prof. Dr. Fabricio José Pereira  
Universidade Federal de Alfenas

Assinatura:



Documento assinado digitalmente

FABRICIO JOSE PEREIRA

Data: 15/12/2025 18:40:14-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Vinícius Politi Duarte  
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano

Dr. Jean Paulo Vitor de Oliveira  
Universidade Federal de Lavras

Aos meus pais, que muitas vezes deixaram de viver para me permitir estudar a vida.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço aos meus pais, pois sem eles nada disso seria possível, e a minha família pelas orações e por serem minha motivação. Aos meus amigos que sempre me ouviram, incentivaram e estiveram comigo durante todos esses anos. Apesar da saudade, não foi difícil seguir, porque tudo em mim lembra um tanto de vocês.

Ao meu orientador Fabricio, que fez jus a denominação e me guiou em todas as etapas desse trabalho, me ensinando mais de uma vez, e me permitindo adquirir um vasto conhecimento.

Aos colegas de graduação, Even e Felipe que me auxiliaram durante a etapa experimental, e as técnicas do laboratório de Biotecnologia Ambiental e Genotoxicidade (BIOGEN) por todo o auxílio.

Às amigas biólogas que tornaram a graduação mais compreendida, leve e divertida, em especial as Marias, que me aturaram, cuidaram de mim e compartilharam a vida comigo.

## RESUMO

A matéria particulada suspensa na atmosfera, provenientes de resíduos de mineração, pode ocasionar efeitos na fisiologia e anatomia das plantas. *Tillandsia recurvata* L. é uma bromélia epífita sensível à fatores ambientais e com potencial para utilização como bioindicadora para toxicidade de resíduos e qualidade ambiental. Este trabalho teve como objetivo avaliar a fotoquímica, crescimento e anatomia foliar de *Tillandsia recurvata* exposta a diferentes doses de resíduo de mineração de ferro aplicadas na superfície foliar. O delineamento experimental foi inteiramente casualizado, com cinco concentrações de resíduo: 0 (controle); 5; 10; 15 e 20 mg, e oito repetições. Os indivíduos de *T. recurvata* foram colocados em potes de 100 mL, contendo casca de pinus, e permaneceram em sala de crescimento à  $25 \pm 2$  °C, 64% de umidade relativa, intensidade de radiação de  $40 \text{ Wm}^{-2}$  e fotoperíodo de 12 h por 120 dias. O resíduo foi aplicado na superfície das folhas a cada 15 dias, e a irrigação foi realizada borrifando-se 0,8 mL de água por planta semanalmente. A eficiência quântica do fotossistema (YII) e a taxa de transferência de elétrons (ETR) foram analisadas utilizando-se o fluorômetro modulado portátil MINI-PAM-II. O teor de clorofila foi estimado utilizando um analisador portátil de clorofila atLEAF CHL PLUS. Para essas análises, todas as folhas da planta foram reunidas, devido a pequena área foliar, e a medição realizada na porção mediana deste conjunto de folhas no período da manhã, entre 7 e 9 h. As plantas foram coletadas mensalmente e separadas em raízes, rizoma e folhas, secas em estufa à 60 °C, por 72 h, e pesadas em balança analítica para medir a massa seca. Os dados foram submetidos à análise de variância e ao teste de médias do Scott-Knott para  $P < 0,05$  utilizando-se o software Sisvar. A aplicação de 5 mg de resíduo de mineração de ferro aumentou a massa seca e fresca de *T. recurvata*, mas doses maiores reduziram esta variável sendo as médias semelhantes às observadas para o controle. O resíduo não promoveu modificações significativas para a alocação de biomassa para as folhas e raízes. Já as doses de 10 e 15 mg reduziram a alocação de biomassa para o rizoma, enquanto 20 mg aumentaram esse parâmetro para níveis do controle. O resíduo não modificou o YII das folhas de *T. recurvata*, mas doses de 10 mg ou superiores reduziram a ETR, e o teor de clorofila da espécie foi reduzido por doses de 15 mg ou doses maiores. A análise anatômica das plantas demonstra que a dose de 5 mg de resíduo também aumentou o tamanho das secções foliares, mas doses maiores de resíduo reduziram o tamanho foliar para um tamanho semelhante ao controle. Os resultados demonstram que *T. recurvata* é tolerante ao resíduo, e a dose de 5 mg pode favorecer seu crescimento devido a presença de macro e micronutrientes. A redução de ETR e do teor de clorofila em plantas sob 10 mg ou mais de resíduo de mineração de ferro demonstra potencial como variáveis bioindicadoras da toxicidade pelo poluente para plantas epífitas.

Palavras-chave: Cravo do mato; epífitas; ecofisiologia.

## ABSTRACT

Suspended particles in the atmosphere that originated from iron mining tailings can harm physiological and anatomical traits in plants. *Tillandsia recurvata* L. is an epiphytic bromeliad that is sensitive to environmental stressors, showing potential as a bioindicator species for toxicity from pollutants and environmental quality. This work aimed to study the photochemistry, growth, and leaf anatomy of *T. recurvata* exposed to foliar application of different iron mining tailings doses. The experimental design was completely randomized with five doses of iron mining tailings: 0 (control), 5, 10, 15, and 20 mg, and eight replications. *T. recurvata* individuals were placed in mL pots containing pine bark and were kept in a growth chamber at  $25\pm 2$  °C, 64% relative humidity,  $40 \text{ Wm}^{-2}$  of radiation intensity, and 12 h photoperiod for 120 days. The iron mining tailings were applied on the surface of leaves fortnightly, and irrigation was provided by spraying 0.8 mL of water per plant weekly. The quantum efficiency from the photosystem II (PSII) and the electron transfer rate (ETR) were analysed using a portable modulated fluorometer (MINIPAM-II). The chlorophyll content was estimated using a portable chlorophyll meter (atLEAF CHL PLUS). For these analyses, all leaves of the plant were grouped due to their small leaf area, and the measurements were taken in the central portion of this leaf assemblage in the morning, between 7:00 and 9:00 a.m. Plants were collected monthly and separated into roots, rhizome, and leaves, being oven-dried at 60 °C for 72 h and then weighed on an analytical scale to measure the dry mass. Data was submitted to analysis of variance and to the Scott-Knott test at  $P < 0.05$  using the Sisvar software. The dose of 5 mg of iron mining tailings increased the dry and fresh masses from *T. recurvata*; however, higher doses decreased biomass parameters compared to 5 mg, but means were similar to the control. Iron mining tailings did not modify the biomass allocation to leaves and roots, but 10 and 15 mg of the pollutant reduced the biomass allocation to stems, while 20 mg increased this parameter to levels from control plants. Iron mining tailings did not modify the YII of *T. recurvata* leaves, but 10 mg or higher doses reduced the ETR, and the chlorophyll content of the species was reduced by 15 mg or higher doses. The anatomical analysis revealed that 5 mg of iron mining tailings increased the size of leaf sections, but higher doses of iron mining tailings reduced the leaf size to a similar size as the control. Results showed that *T. recurvata* is tolerant to iron mining tailings, and the dose of 5 mg can even favor its growth due to the presence of macro and micronutrients. The reductions of the ETR and chlorophyll content from plants under 10 mg of iron mining tailings or higher show potential as bioindicators for the toxicity of the pollutant to epiphytic plants.

Keywords: Cravo do mato; epiphytic plants; ecophysiology.

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>10</b>
<b>2 MATERIAL E MÉTODOS .....</b>	<b>11</b>
2.1 MATERIAL VEGETAL E DELINEAMENTO EXPERIMENTAL .....	11
2.2 ANÁLISE DO CRESCIMENTO .....	13
2.3 TEOR DE CLOROFILA E ANÁLISE FOTOQUÍMICA .....	14
2.4 ANÁLISE ANATÔMICA .....	14
2.5 ANÁLISE ESTATÍSTICA .....	15
<b>3 RESULTADOS .....</b>	<b>15</b>
<b>4 DISCUSSÃO .....</b>	<b>19</b>
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>24</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Historicamente, por falta de legislação adequada, a contaminação do solo e da água, decorrente da atividade mineradora aumentou consideravelmente, deixando um legado de grandes problemas ambientais (Lam *et al.*, 2017). Entre as atividades antrópicas, a mineração tem grande participação nesse tipo de contaminação, sobretudo em casos de exploração inadequada ou despejo descontrolado dos resíduos das minas, ocasionando sérios problemas de poluição por elementos potencialmente tóxicos (EPTs) (Sun *et al.*, 2018).

O Brasil tem enfrentado problemas ambientais em que diversos EPTs foram lançados no meio ambiente. Os casos mais recentes aconteceram em 2015 e 2019 nas cidades mineiras de Mariana e Brumadinho (Da Silva *et al.*, 2022). Estima-se que apenas no desastre de Mariana, o colapso da barragem de Fundão tenha liberado cerca de 60 milhões de m<sup>3</sup> de resíduos de mina nas nascentes da bacia do rio São Francisco (IBAMA, 2015; ANA, 2017). Esses resíduos atingiram mais de 600 ha de áreas de preservação permanente, além de afetar rios, riachos, animais e populações humanas (Carmo *et al.*, 2017). De acordo com Segura *et al.*, (2016), os principais EPTs encontrados no resíduo despejado no ambiente foram o bário (Ba), arsênio (As), cádmio (Cd), estrôncio (Sr), ferro (Fe), manganês (Mn) e chumbo (Pb). Além desses, altas concentrações de alumínio (Al) foram detectadas nos resíduos do rompimento da barragem de Fundão em Mariana-MG (De Pádua *et al.*, 2021; Caetano *et al.*, 2021).

Os resíduos de mineração podem ser fontes potenciais de contaminação atmosférica por conta da suspensão de partículas por ação do vento (González-Sánchez *et al.*, 2023) ou de deslocamento de veículos, maquinário (Zhang *et al.*, 2025) e animais na superfície do resíduo depositado. As partículas suspensas na atmosfera podem ser classificadas em função do seu diâmetro, sendo: partículas suspensas totais (diâmetro  $\leq 100 \mu\text{m}$ ), partículas respiráveis (diâmetro  $\leq 10 \mu\text{m}$ ) e partículas finas (diâmetro  $\leq 2,5 \mu\text{m}$ ); sendo que as partículas respiráveis ou finas podem ser inaladas e causar sérios problemas de saúde para humanos e animais (Liu; Ren, 2020). Este é um fator preocupante sobre os resíduos de mineração de ferro da barragem de Fundão, uma vez que as partículas possuem  $1,2 \mu\text{m}$  de diâmetro (De Pádua *et al.*, 2021; Caetano *et al.*, 2021). O aspecto da suspensão destas partículas na atmosfera e o seu efeito, seja em plantas, animais ou humanos,

ainda é pouco investigado. As partículas sólidas de poluentes na atmosfera, incluindo os elementos potencialmente tóxicos, podem ser retidas e absorvidas pelas folhas das plantas, e a anatomia destas pode se relacionar com esta capacidade de retenção e absorção (Yu *et al.*, 2021).

Os efeitos de poluentes gasosos na atmosfera como óxidos de nitrogênio, enxofre e fluoretos, entre outros, e sua toxicidade para plantas são relativamente mais estudados (Heath, 1980; Rossi *et al.*, 2016). Entretanto, a matéria particulada suspensa na atmosfera, bem como poluentes gasosos pode causar efeitos nas plantas como alterações na abertura e fechamento dos estômatos (Robinson *et al.*, 1998; Yu *et al.*, 2021).

As epífitas são espécies de plantas que utilizam árvores, chamadas de forófitos, como suporte durante todo o ciclo de vida ou apenas em parte dele (Zotz, 2016). Espécies epífitas são comuns em todo o território afetado pelo rompimento das Barragens de Fundão e de Brumadinho. Espécies do gênero *Tillandsia* (Bromeliaceae) são comuns em Minas Gerais e demonstram sensibilidade a fatores como excesso de radiação (Silva *et al.*, 2023). *Tillandsia recurvata* L. é uma espécie nativa e amplamente distribuída no Brasil, sendo ainda cultivada como planta ornamental em diferentes regiões (Puente; Bashan, 1994). Esta espécie pode ainda demonstrar modificações no crescimento e na anatomia em função de fatores ambientais (Silva *et al.*, 2023) e pode ser interessante como uma bioindicadora para toxicidade de resíduos.

A hipótese deste trabalho é que partículas de resíduo de mineração de ferro depositadas nas folhas de bromélias podem promover efeitos negativos devido à presença de elementos potencialmente tóxicos, prejudicando a fotossíntese, anatomia e crescimento. Estas características possuem potencial como biomarcadores para indicação da toxicidade de partículas de resíduo de mineração de ferro suspensas na atmosfera. Nesse contexto, o objetivo deste trabalho foi avaliar a fotoquímica, anatomia foliar e crescimento de *Tillandsia recurvata* exposta a diferentes doses de resíduo de mineração de ferro aplicadas na superfície foliar.

## **2 MATERIAL E MÉTODOS**

### **2.1 MATERIAL VEGETAL E DELINEAMENTO EXPERIMENTAL**

As plantas de *Tillandsia recurvata* L. (Bromeliaceae) foram coletadas em ambiente natural, no município de Alfenas, estado de Minas Gerais, Brasil (21°25'12.6"S 45°56'55.6"W), e transportadas para o Laboratório de Biotecnologia Ambiental e Genotoxicidade (BIOGEN), localizado na Universidade Federal de Alfenas (UNIFAL). As plantas foram coletadas como touceiras naturais, individualizadas e alocadas em potes plásticos transparentes de 100 mL contendo 30 mL de casca de pinus, que serviu como substrato para fixação das plantas e suporte para as raízes, semelhante à metodologia usada por Silva *et al.* (2023). Os indivíduos permaneceram em sala de crescimento a 25±2 °C, 64% de umidade relativa, intensidade de radiação de 40 W m<sup>-2</sup> e fotoperíodo de 12 h por 120 dias.

O resíduo de mineração de ferro foi coletado à 4 Km de distância da barragem de Fundão, localizada em Mariana, estado de Minas Gerais, Brasil (20°11'58"S 43°29'28"W), foi alocado em sacos plásticos e transportado para a Universidade Federal de Alfenas, onde foi armazenado em sala protegida de umidade e radiação até a montagem do experimento.

A composição química do resíduo de mineração foi analisada e os resultados estão apresentados na Tabela 1. Para as análises, 500 mg do resíduo foram secos em estufa à 40 °C por 72 h e então adicionados em 6 ml de HNO<sup>3</sup> em tubos para digestão e mantidos por 12 h nestas condições. Os tubos foram então colocados aquecidos a 140 °C, e mantidos nesta temperatura até que a solução atingisse cerca de 1,0 ml e uma aparência translúcida. Os tubos foram então resfriados e 2,0 ml de HClO<sup>4</sup> foi adicionado e então a solução foi aquecida a 190 °C por 2 h (Abbruzzini *et al.* 2014). As amostras foram removidas do bloco digestor, resfriadas e a concentração de elementos determinada em espectrômetro de absorção atômica Perkin-Elmer Elemental Analyzer 2400 (CHNS/O).

As plantas foram submetidas à aplicação de concentrações crescentes de resíduo de mineração de ferro sendo: 0 (controle, sem aplicação de resíduo); 5, 10, 15 e 20 mg de resíduo por aplicação, por planta. As quantidades de resíduo foram aplicadas na superfície das folhas a cada 15 dias, e a irrigação foi realizada borrifando-se 0,8 mL de água semanalmente, buscando a hidratação da planta ao simular os eventos de chuva e orvalho, além de favorecer a absorção do resíduo. O delineamento experimental foi inteiramente casualizado com cinco concentrações de resíduo e oito repetições (n = 40), sendo que as plantas foram coletadas mensalmente totalizando 160 plantas usadas no experimento.

Tabela 1 - Concentrações de macro e micronutrientes bem como elementos potencialmente tóxicos em resíduo de mineração de Fe resultante do rompimento da barragem de Fundão em Mariana, MG.

<b>Macronutrientes</b>	<b>mg kg<sup>-1</sup></b>
P	400,2
Mg	174,9
K	183,6
Ca	9892,1
<b>Micronutrientes</b>	<b>mg kg<sup>-1</sup></b>
Mn	467,5
Fe	32775,12
Zn	15,2
Cu	6,4
Na	98,8
<b>Elementos potencialmente tóxicos</b>	<b>mg kg<sup>-1</sup></b>
Al	2853,0
Cr	14,1
Cd	3,2
Pb	8,9
<b>Other characteristics</b>	
pH	6.0

Fonte: Elaboração própria, 2025.

## 2.2 ANÁLISE DO CRESCIMENTO

A cada 30 dias, oito indivíduos de cada um dos cinco tratamentos foram coletados para determinação das massas fresca e massas seca. Para isso as plantas foram separadas em folhas, raízes e rizoma sendo a massa fresca avaliada imediatamente em balança analítica AY 220 (Shimadzu, São Paulo, Brasil). Posteriormente, os órgãos foram colocados em estufa com circulação forçada de ar à 60 °C por 72 horas, sendo a massa seca novamente avaliada em balança analítica. A alocação percentual de biomassa em cada órgão foi calculada pela razão entre a massa seca do órgão/massa seca total da planta \* 100 (Hunt *et al.*, 2002;

Silva *et al.*, 2023).

### 2.3 TEOR DE CLOROFILA E ANÁLISE FOTOQUÍMICA

Devido à pequena área foliar, que não preenche a câmara do equipamento e não gera massa suficiente para uma avaliação bioquímica, todas as folhas de um indivíduo foram reunidas e a medição foi realizada na porção mediana deste conjunto de folhas. O teor de clorofila foi estimado durante a manhã (entre 07 e 09 h) utilizando um analisador portátil de clorofila atLEAF CHL PLUS (AtLEAF, Wilmington, EUA). O teor de clorofila foi avaliado em oito plantas por coleta (a cada 30 dias) por concentração de resíduo de mineração de ferro.

A eficiência quântica do fotossistema (YII) e a taxa de transferência de elétrons (ETR) foram analisadas utilizando-se o fluorômetro modulado portátil MINI-PAM-II (Heinz Walz, Effeltrich, Germany). Não foi possível avaliar o rendimento máximo efetivo do fotossistema II (Fv/Fm) pois a área foliar não era suficiente para manter o clipe e realizar as medições em escuro.

### 2.4 ANÁLISE ANATÔMICA

Como *T. recurvata* possui um crescimento lento (Silva *et al.* 2023), foram coletadas cinco folhas completamente desenvolvidas de cada tratamento (n = 25) durante o período experimental (120 dias), sendo marcadas no início de sua formação e acompanhadas para determinar quando poderiam ser coletadas. As folhas foram fixadas e armazenadas em etanol 70% (v v<sup>-1</sup>). Fragmentos da região mediana das folhas foram submetidos à série etanólica para desidratação sendo: etanol 80% por 2 h, etanol 90% por 2 h e etanol 100% por 2 h (Johansen, 1940). Posteriormente, as amostras foram submetidas à solução etanol-historesina na proporção de 1:1 por 12 h e então em historesina ativada por 24 h e então à polimerização segundo recomendações do fabricante (Leica, Wetzlar, Alemanha). As lâminas foram observadas e as imagens capturadas em microscópio de captura Nikon Eclipse Si (Nikon, Tóquio, Japão).

A partir das secções transversais foliares de *T. recurvata*, realizamos uma análise qualitativa da anatomia das folhas expostas as diferentes doses de resíduo de mineração de ferro.

## 2.5 ANÁLISE ESTATÍSTICA

As análises estatísticas foram realizadas utilizando o software SISVAR 5.0 (Ferreira, 2011). Os dados foram testados quanto à sua normalidade pelo teste de Shapiro-Wilk, e as variáveis massa fresca e seca total, percentual de alocação da biomassa para as folhas e raízes, e o teor de clorofila, que não apresentaram distribuição normal, foram transformadas com a equação: raiz quadrada de  $x+1$ . Posteriormente, foram submetidos à análise de variância (ANOVA) e ao teste de médias do Scott-Knott com nível de significância de 5% ( $P < 0,05$ ).

## 3 RESULTADOS

Os resultados da análise de variância (Anava), estão representados na Tabela 1 e demonstram que todas as variáveis apresentaram o coeficiente de variação abaixo de 23% e houve efeito significativo do resíduo de mineração de ferro para a maior parte das variáveis analisadas, exceto para a alocação de biomassa para as folhas e raízes, além da eficiência quântica do fotossistema II.

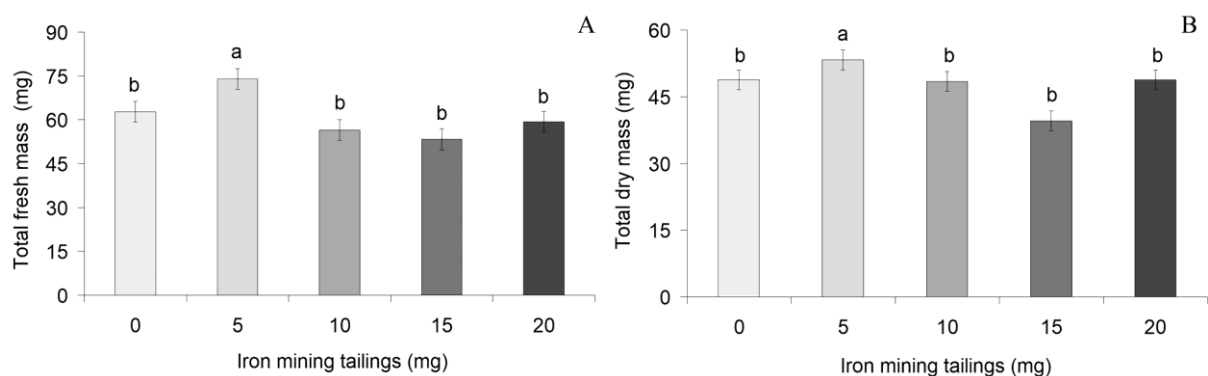
Tabela 2 - Resumo de quadro de ANAVA em *T. recurvata* para as variáveis avaliadas.

<i>Variável</i>	<i>CV%</i>	<i>QM</i>	<i>Fc</i>	(continua)
				<i>P-valor</i>
Massa fresca total	15,76	5,588583	3,737	*0,0067
Massa seca total	9,52	3,271718	7,479	*0,0000
Percentual de alocação da biomassa para as folhas	1,40	0,018011	1,001	*0,4096
Percentual de alocação da biomassa para as raízes	14,74	0,234256	1,664	*0,1620
Percentual de alocação da biomassa para o rizoma	14,64	0,265613	2,916	0,0235
Teor de clorofila	8,81	0,254240	4,906	*0,0010
Eficiência quântica do fotossistema (YII)	10,18	0,007369	1,317	0,2801

Taxa de transferência de elétrons (ETR)	22,51	19,90	2,667	0,0461
---	-------	-------	-------	--------

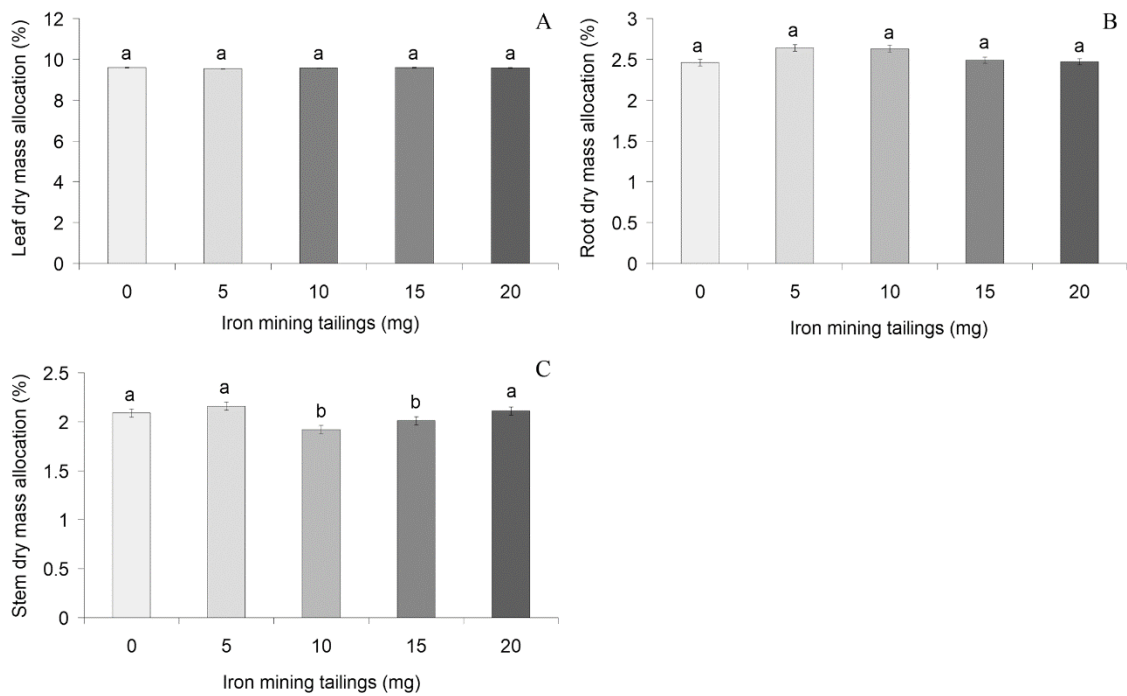
Fonte: Elaboração própria, 2025. Obs. CV%= coeficiente de variação. QM = Quadrado Médio. \* = variáveis transformadas em raiz quadrada de x+1. P-valor significativo adotado de 0,05. A resolução limite de P-valor do software é de 0,0001; valores menores do que este são indicados como P=0,0000.

A aplicação de 5 mg de resíduo de mineração de ferro aumentou a massa fresca total de *T. recurvata* em 25% em relação ao controle, mas doses maiores reduziram esta variável sendo que as médias ficaram semelhantes às observadas para o controle (Fig. 1A). A dose de 5 mg de resíduo de mineração de também aumentou a massa seca de *T. recurvata* em cerca de 11,1% mas as maiores doses reduziram a massa seca para valores semelhantes ao do controle (Fig. 1B).



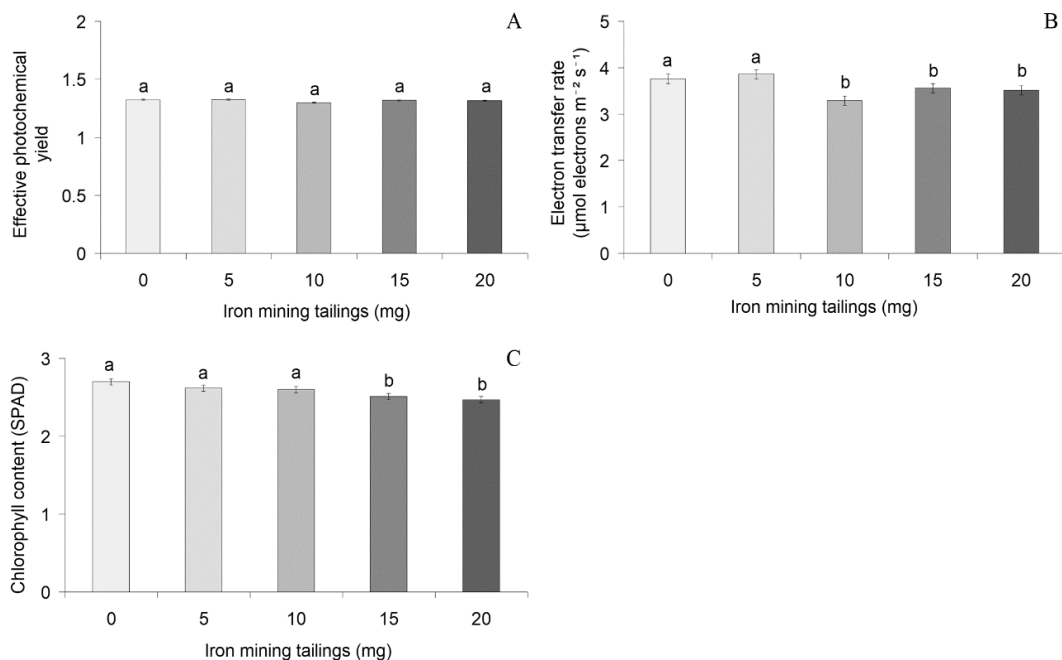
**Figura 1.** Massas fresca (A) e seca total (B) de *Tillandsia recurvata* submetida a diferentes doses de resíduo de mineração de ferro aplicadas na superfície foliar. As médias seguidas de mesma letra não diferem entre si pelo teste de Scott-Knott para  $P < 0.05$ . As barras indicam o erro padrão. Fonte: Elaborada pelo autor (2025) com base no Sisvar (Ferreira, 2011)

O resíduo de mineração de ferro não promoveu modificações significativas para a alocação de biomassa para as folhas (Fig. 2A) ou raízes (Fig. 2B). Contudo, as doses de 10 e 15 mg de resíduo de mineração de ferro reduziram a alocação de biomassa para os rizomas em cerca de 5%, mas esta aumentou novamente na concentração de 20 mg para valores semelhantes ao controle (Fig. 2C).



**Figura 2.** Alocação de biomassa para as folhas (A), raízes (B) e rizoma (C) de *Tillandsia recurvata* submetida a diferentes doses de resíduo de mineração de ferro aplicadas na superfície foliar. As médias seguidas de mesma letra não diferem entre si pelo teste de Scott-Knott para  $P < 0.05$ . As barras indicam o erro padrão. Fonte: Elaborada pelo autor (2025) com base no Sisvar (Ferreira, 2011)

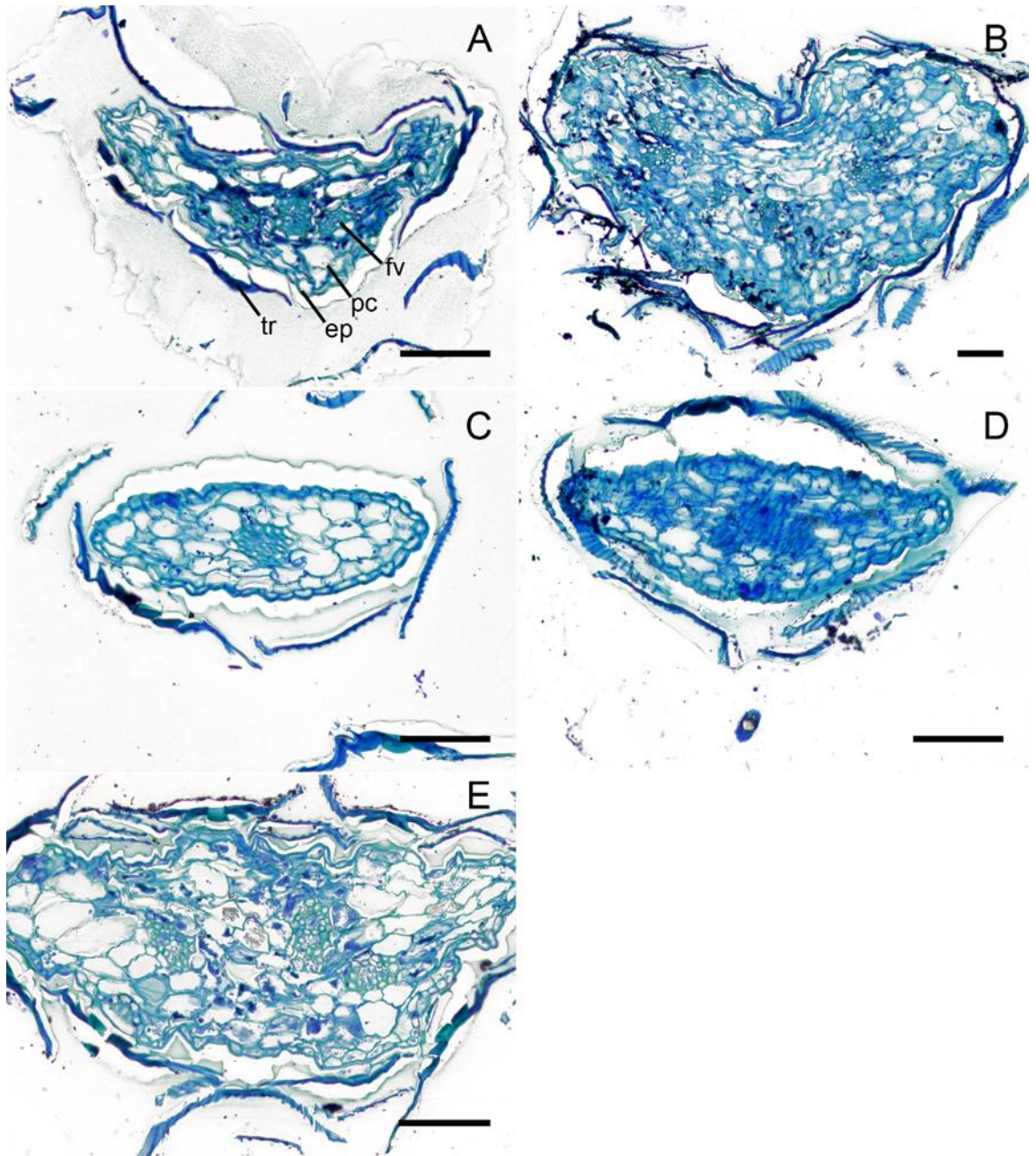
O resíduo de mineração de ferro não promoveu diferenças significativas na eficiência quântica do fotossistema II das folhas (Fig. 3A). Entretanto, a aplicação 10 mg ou mais de resíduo de mineração de ferro reduziu a taxa de transferência de elétrons em 15,4% (Fig. 3B). As doses de 15 e 20 mg de resíduo de mineração de ferro reduziram o teor de clorofila e *T. recurvata* em cerca de 7% (Fig. 3C).



**Figura 3.** Eficiência quântica do fotossistema II (A), taxa de transferência de elétrons (B) e teor de clorofila (C) de *Tillandsia recurvata* submetida a diferentes doses de resíduo de mineração de ferro aplicadas na superfície foliar. As médias seguidas de mesma letra não diferem entre si pelo teste de Scott-Knott para  $P < 0.05$ . As barras indicam o erro padrão. Fonte: Elaborada pelo autor (2025) com base no Sisvar (Ferreira, 2011)

A partir das secções transversais observa-se que as folhas de *T. recurvata* possuem um formato arqueado na face adaxial e uma projeção da parte abaxial. A epiderme é unisseriada, composta por células tabulares, e tricomas tectores bromeliáceos, além de apresentar um parênquima clorofiliano formado por camadas de células isodiamétricas e poucos cloroplastídeos, os feixes vasculares são colaterais com floema voltado para a face abaxial e xilema para a face adaxial (Fig. 4A).

A análise anatômica das plantas demonstra que a dose de 5 mg de resíduo aumentou significativamente o tamanho das secções anatômicas foliares, que demonstraram mais feixes vasculares e células parenquimáticas em comparação com todos os outros tratamentos (Fig. 4B). Já as doses de 10 mg (Fig. 4C) e 15 mg (Fig. 4D) reduziram o desenvolvimento foliar, uma vez que as folhas demonstram uma morfologia diferente das demais, gerando ainda folhas menores e com poucos feixes vasculares localizados no centro da estrutura. A concentração de 20 mg (Fig. 4E), promoveu a formação de folhas maiores em comparação às doses de 15 e 10 mg, sendo semelhantes ao controle (Fig. 4A).



**Figura 4.** Secções transversais foliares de *Tillandsia recurvata* submetida a 0 mg (A), 5 mg (B), 10 mg (C), 15 mg (D), e 20 mg (E) de resíduo de mineração de ferro. ep= epiderme, pc= parênquima clorofiliano, fv= feixe vascular e tr= tricoma. Barras= 100 µm. Fonte: Elaborada pelo autor (2025).

#### 4 DISCUSSÃO

O ganho de massa de *Tillandsia recurvata* na dose de 5 mg de resíduo de mineração de ferro, bem como a ausência de perda de massa em comparação com o controle (Fig. 1), sugerem que a espécie tem tolerância ao resíduo de mineração de ferro aplicados na superfície foliar. Resultados semelhantes ocorrem em *Schinus*

*molle* L. que apresenta maior germinação de sementes e crescimento das plântulas cultivadas em resíduo de mineração de ferro (Scarpa *et al.*, 2022b). Outras espécies também demonstram essa tolerância, como *Cenostigma pluviosum* var. *peltophoroides* (Benth.) E. Gagnon & GP Lewis, e *Copaifera langsdorffii* Desf, que não apresentam deformações anatômicas nem sintomas de toxicidade, como clorose e necrose, quando cultivadas em resíduo de mineração de ferro (Caetano *et al.*, 2021; De Pádua *et al.*, 2021). Além disso, *Handroanthus serratifolius* e *H. impetiginosus* não exibem mortalidade quando cultivadas em resíduo de mineração de ferro (Scarpa *et al.*, 2022a), enquanto *Acrocomia aculeata* (Jacq.) Lodd. ex. Mart. registra aumento de biomassa quando cultivada em resíduo de mineração (Alves *et al.*, 2024). É importante destacar que estas espécies que apresentaram tolerância são espécies de solo e enraizadas, sendo árvores em sua maioria. Não há, contudo, outro trabalho que estudou o efeito da aplicação de resíduo de mineração de ferro na superfície foliar de plantas epífitas, sendo este o primeiro registro deste tipo de estudo, o que torna difícil comparar aspectos de tolerância com outras epífitas. Assim, as respostas de crescimento de *T. recurvata* assemelha-se ao de espécies enraizadas tolerantes ao resíduo de mineração de ferro e demonstra potencial para a sobrevivência da espécie em locais contaminados pelo poluente, bem como o seu uso como bioindicadora.

Em contraste, o resíduo de mineração de ferro pode prejudicar o desenvolvimento de espécies sensíveis, reduzindo a biomassa, além de afetar a fotossíntese e crescimento devido a presença de elementos potencialmente tóxicos (EPTs) (De Araújo *et al.*, 2022; Alves *et al.*, 2023; Gomes *et al.*, 2025). O resíduo de mineração de ferro reduz o crescimento e emergência de mudas de *Schinus terebinthifolia* Raddi (Da Silva *et al.*, 2024), e EPTs como o Cd, podem diminuir a massa fresca de *Brassica napus* L. (Ali *et al.*, 2015). O Cd está presente no resíduo de mineração de ferro (Tabela 1) e este metal pode gerar espécies reativas de oxigênio (EROs), que podem alterar, e até mesmo danificar, células e moléculas (Møller; Jensen; Hansson, 2007). O alumínio, presente em grande quantidade no resíduo (Tabela 1), também inibe o crescimento radicular e reduz a massa fresca e seca de raízes de *Vigna mungo* (L.) Hepper, além de induzir a produção de EROs e causar danos oxidativos (Chowra *et al.*, 2017). De forma análoga, o chumbo, sendo um EPT presente no resíduo de mineração de ferro (Tabela 1) causa diminuição da massa fresca, massa seca da raiz, e no crescimento radicular, prejudicando o

crescimento da plântula ao afetar a absorção de água e nutrientes (Pereira *et al.*, 2013). A aplicação de resíduo de mineração em *T. recurvata* foi realizada de maneira a simular pequenas quantidades do resíduo que, eventualmente, poderiam estar suspensos na atmosfera em regiões contaminadas. Mesmo a maior dose aplicada (20 mg quinzenais) um total de apenas 160 mg de resíduo de mineração de ferro foi aplicada nas plantas (ou 0,00016 Kg). Portanto, as doses de EPTs foram relativamente baixas em comparação às plantas enraizadas citadas como sensíveis ao resíduo de mineração de ferro. Estas doses totais de EPTs, no tratamento de 20 mg de resíduo de mineração de ferro, corresponderiam a: 0,45 mg de Al, 0,0022 mg de Cr, 0,0014 de Pb e 0,0005 mg de Cd. São quantidades baixas se comparadas às plantas enraizadas expostas à grandes volumes de resíduo de mineração de ferro. Entretanto, para condições particuladas na atmosfera podem ser relativamente altos, mas não há informações disponíveis sobre quais massas de resíduo de mineração de ferro podem acumular em plantas epífitas. Trabalhos futuros podem investigar este tema em áreas contaminadas e estabelecer parâmetros para tolerância ou sensibilidade de epífitas a este poluente, mas a ausência de toxicidade para *T. recurvata* ilustra seu potencial como biondicadora.

Os EPTs, como já discutido, não apresentaram toxicidade suficiente para causar mortalidade para *T. recurvata*. Além disso, a concentração de 5 mg promoveu um aumento de crescimento (Fig. 1) o que pode ser relacionado com a ausência de toxicidade de EPTs e a presença de macro e micronutrientes. A presença de macro e micronutrientes em resíduo de mineração de ferro já foi demonstrada em outros trabalhos e, segundo Scarpa *et al.* (2022a), estas concentrações de nutrientes são suficientes para o crescimento e desenvolvimento de plântulas de espécies arbóreas do gênero *Handroanthus*, sem necessidade de complementação nutricional. A presença de macro e micronutrientes (Tab. 1) pode favorecer o crescimento de *T. recurvata*, pois o hábito epifítico impõe restrições nutricionais a este tipo de planta (Hoeber; Zotz, 2022; Zotz; Hietz, 2001). As epífitas obtêm nutrientes diretamente da atmosfera, por meio da decomposição da matéria orgânica do dossel, da precipitação direta, deposição seca e, posteriormente, da deposição úmida proveniente da chuva e do orvalho (Zotz, 2013, 2016). Esses processos tornam a disponibilidade de nutrientes irregular e de curta duração (Takahashi; Mercier, 2024). Dessa forma, a dose de 5 mg de resíduo de mineração de ferro disponibiliza macro e micronutrientes em níveis adequados e favorece o crescimento de *T. recurvata*.

Assim, a ausência de modificações na eficiência quântica do fotossistema II demonstra que *T. recurvata* possui capacidade de manter a fotossíntese quando exposta ao resíduo de mineração de ferro aplicado nas folhas (Fig. 3A). A exposição ao resíduo de mineração pode prejudicar a fotossíntese, comprometer o desenvolvimento e o crescimento de plantas não tolerantes (Huang *et al.*, 2020; Da Silva *et al.*, 2024). Contudo, a ausência de efeitos negativos na etapa fotoquímica, como o rendimento fotoquímico efetivo, de plantas expostas ao resíduo de mineração de ferro indica a estabilidade da fotossíntese e tolerância da planta (Da Silva *et al.*, 2025). Portanto, a manutenção da fotossíntese em *T. recurvata* exposta ao resíduo de mineração de ferro sugere tolerância da espécie e seu potencial bioindicador.

Os resultados demonstram que maiores doses do resíduo reduz o teor de clorofila (Fig. 3C) e a taxa de transferência de elétrons (Fig. 3B). No processo de fotossíntese, a clorofila absorve a radiação e inicia o processo fotoquímico por meio da dissipação fotoquímica (Croft *et al.*, 2017; Qian *et al.*, 2019). A taxa de transferência de elétrons depende da dissipação fotoquímica da clorofila. Portanto, um menor teor de clorofila reduz a dissipação fotoquímica e a transferência de elétrons no fotossistema II (Croft *et al.*, 2017; Qian *et al.*, 2019). Espécies como *Melia azedarach* L. e *Ligustrum lucidum* W.T.Aiton também apresentam redução no teor de clorofila quando expostas ao resíduo de mineração de Pb-Zn, o que prejudica sua capacidade fotossintética (Huang *et al.*, 2020). É importante ressaltar que o teor de clorofila estimado pelo SPAD e a taxa de transferência de elétrons medida pelo Minipam são características não destrutivas, e que possuem grande potencial para a bioindicação da presença de toxicidade por resíduo de mineração de ferro para plantas de *T. recurvata* presente em áreas contaminadas. Uma vez que são plantas epífitas e sensíveis às perturbações do ambiente (Silva *et al.* 2023), a redução em características não destrutivas e facilmente acessíveis, como a taxa de transferência de elétrons e o teor de clorofila, destacam o potencial de bioindicação da espécie.

As secções transversais das folhas de *T. recurvata* demonstraram maior desenvolvimento foliar na dose de 5 mg, o que pode resultar do aumento do parênquima clorofiliano e dos feixes vasculares (Fig. 4B), o que pode ter favorecido a fotossíntese e o crescimento. Estudos relacionam a etapa fotoquímica às características foliares e mostram que folhas mais espessas, com maior proporção

de parênquima clorofiliano demonstram maior taxa fotossintética (Pereira *et al.*, 2016; Scarpa *et al.*, 2022a). A redução das folhas nas maiores doses do resíduo de mineração de ferro não parece ter causado problemas significativos, uma vez que não houve redução no crescimento nestas concentrações em comparação ao controle. Contudo, o menor desenvolvimento da folha em comparação com a dose de 5 mg pode explicar a redução no teor de clorofila e na taxa de transferência de elétrons observada. É importante ressaltar que avaliações anatômicas quantitativas dos tecidos são necessárias e poderão futuramente auxiliar na compreensão do efeito do resíduo de mineração de ferro nas folhas de *T. recurvata*.

## **5 CONCLUSÃO**

A ausência de redução no crescimento em comparação com o controle, indica que os EPTs não apresentam toxicidade suficiente para causar alterações negativas no crescimento ou eficiência quântica do fotossistema II de *T. recurvata* nas doses testadas. Os macro e micronutrientes presentes no resíduo de mineração de ferro favorecem o crescimento de *T. recurvata* na dose de 5 mg de resíduo por planta. A redução nos tecidos foliares de *T. recurvata* nas doses de 10 mg por planta ou maiores podem explicar a redução no teor de clorofila e na taxa de transferência de elétrons, com potencial para indicar a presença de toxicidade do resíduo.

## REFERÊNCIAS

- ABBRUZZINI, T. F. *et al.* Influence of digestion methods on the recovery of iron, zinc, nickel, chromium, cadmium and lead contents in 11 organic residues. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 38, p. 166-176, 2014.
- ALI, B. *et al.* Deteriorative effects of cadmium stress on antioxidant system and cellular structure in germinating seeds of *Brassica napus* L. **Journal of Agricultural Science and Technology**, v. 17, n. 1, p. 63-74, 2015.
- ALVES, M. C. *et al.* Assessing the feasibility of using *Acrocomia aculeata* (Arecaceae) for the rehabilitation of iron ore tailings. **Acta Botanica Brasilica**, v. 38, p. 1-9, 2024.
- ALVES, O. R. *et al.* Terrestrial species exposed to mining tailings: Assessing the potential ecotoxicological impacts of the Fundão Dam collapse in Brazil. **Journal of Trace Elements and Minerals**, v. 6, p. 1-9, 2023.
- ANA - Agência Nacional das Águas, 2017. **Encarte especial sobre a qualidade das águas do rio doce após 2 anos do rompimento de barragem de fundão - 2015/2017**. Disponível em: <https://www.gov.br/ana/pt-br/sala-de-situacao/rio-doce/documentos-relacionados/encarte-qualidade-da-gua-do-rio-doce-dois-anos-apos-rompimento-de-barragem-de-fundao-1.pdf>. Acesso em 02 de Outubro de 2025.
- CAETANO, A. L. *et al.* Growth, anatomy, and gas exchange of *Cenostigma pluviosum* cultivated under reduced water levels in iron mining tailings. **Journal of Soils and Sediments**, v. 22, n. 1, p. 381-391, 2021.
- CARMO *et al.* Fundão tailings dam failures: the environment tragedy of the largest technological disaster of Brazilian mining in global context. **Perspectives in Ecology and Conservation**, v. 15, p. 145–151, 2017.
- CHOWRA, U. *et al.* Aluminium-induced excessive ROS causes cellular damage and metabolic shifts in black gram *Vigna mungo* (L.) Hepper. **Protoplasma**, v. 254, n. 1, p. 293-302, 2017.
- CROFT, H. *et al.* Leaf chlorophyll content as a proxy for leaf photosynthetic capacity. **Global change biology**, v. 23, n. 9, p. 3513-3524, 2017.
- DA SILVA, P. N. *et al.* Compaction of Iron Mining Tailings Impairs Seedling Emergence of *Schinus terebinthifolia* but Vigor Features Show Tolerance During Early Growth. **Forests**, v. 16, n. 6, p. 1-18, 2025.
- DA SILVA, F. L. *et al.* Relações entre saúde e ambiente: potenciais impactos decorrentes do rompimento de barragens de rejeitos—uma revisão da literatura nos casos de Mariana e Brumadinho, MG. **Desenvolvimento e Meio Ambiente**, v. 59, p. 74469, 2022.
- DA SILVA, P. N. *et al.* Toxicity of iron mining tailings and potential for revegetation using *Schinus terebinthifolia* Raddi based on the emergence, growth, and anatomy of the species. **Mining**, v. 4, n. 3, p. 719-732, 2024.

DE ARAÚJO, B. D. *et al.* Aftershocks of the Samarco disaster: diminished growth and increased metal content of *Raphanus sativus* cultivated in soil with mining tailings. **Acta Scientiarum. Biological Sciences**, v. 44, n. 1, 2022. Disponível em: <https://www.redalyc.org/journal/1871/187174530060/html/>. Acesso em: 27 de Out. 2025.

DE PÁDUA, M. P. *et al.* Ecophysiological responses of *Copaifera langsdorffii* grown in mining tailings under lower water availability. **Water, Air, & Soil Pollution**, v. 232, n. 2, p. 1-12, 2021.

FERREIRA, D. F. Sisvar: a computer statistical analysis system. **Ciência e Agrotecnologia (UFLA)**, v. 35, n.6, p. 1039-1042, 2011.

GONZÁLEZ-SÁNCHEZ, J. F. *et al.* Evaluation of the danger of a tailings pile belonging to an active mine through its characterization and a dispersion model. **Environmental Monitoring and Assessment**, v. 195, n. 7, p. 1-13, 2023.

GOMES, F. S. *et al.* Iron mining tailing toxicity is increased by lower pH affecting lettuce seed germination, seedling early growth, and leaf anatomy. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 32, n. 10, p. 5788-5799, 2025.

HEATH, R. L. Initial events in injury to plants by air pollutants. **Annual Review in Plant Physiology**, 31, p. 395-431, 1980.

HOEBER, V.; ZOTZ, G. Accidental epiphytes: Ecological insights and evolutionary implications. **Ecological Monographs**, v. 92, n. 4, p. 1-26, 2022.

HUANG, X. *et al.* Photosynthesis performance and antioxidative enzymes response of *Melia azedarach* and *Ligustrum lucidum* plants under Pb–Zn mine tailing conditions. **Frontiers in Plant Science**, v. 11, p. 1-17, 2020.

HUNT, R. *et al.* Modern Tool for Classical Plant Growth Analysis. **Annals of Botany**, v. 90, p. 485-488, 2002.

IBAMA- Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis 2015. **Laudo técnico preliminar**: Impactos Ambientais da Ruptura da Barragem do Fundão, em Mariana, Minas Gerais. Disponível em: [https://www.ibama.gov.br/phocadownload/barragemdefundao/laudos/laudo\\_tecnico\\_preliminar\\_ibama.pdf](https://www.ibama.gov.br/phocadownload/barragemdefundao/laudos/laudo_tecnico_preliminar_ibama.pdf). Acessado em 02 de Outubro de 2025.

LAM, E. J. *et al.* Evaluation of the phytoremediation potential of native plants growing on a copper mine tailing in northern Chile. **Journal of Geochemical Exploration**, v. 182, p. 210-217, 2017.

LIU, K.; REN, J. Seasonal characteristics of PM<sub>2.5</sub> and its chemical species in the northern rural China. **Atmospheric Pollution Research**, v. 11, n. 11, p. 1891-1901, 2020.

MØLLER, I. M.; JENSEN, P. E.; HANSSON, A. Oxidative modifications to cellular components in plants. **Annu. Rev. Plant Biol.**, v. 58, n. 1, p. 459-481, 2007.

PEREIRA, M. P. *et al.* Cadmium tolerance in *Schinus molle* trees is modulated by enhanced leaf anatomy and photosynthesis. **Trees**, v. 30, n. 3, p. 807-814, 2016.

- PEREIRA, M. P. *et al.* Fitotoxicidade do chumbo na germinação e crescimento inicial de alface em função da anatomia radicular e ciclo celular. **Agro@ambiente**, v. 7, n. 1, p. 36-43, 2013.
- PUENTE, M. E.; BASHAN, Y. The desert epiphyte *Tillandsia recurvata* harbours the nitrogen-fixing bacterium *Pseudomonas stutzeri*. **Canadian Journal of Botany**, v. 72, n. 3, p. 406-408, 1994.
- QIAN, X. *et al.* C3 plants converge on a universal relationship between leaf maximum carboxylation rate and chlorophyll content. **Biogeosciences Discussions**, v. 2019, p. 1-18, 2019.
- ROBINSON, M. F. *et al.* Disturbances in stomatal behaviour caused by air pollutants. **Journal of Experimental Botany**, v. 49, p. 461-469, 1998.
- ROSSI, Z. T. T. *et al.* Ecophysiological, anatomical and ultrastructural characteristics of *Vitex polygama* Cham. (Verbenaceae) submitted to different concentrations of fluoride. **Acta Scientiarum. Biological Sciences**, v. 38, p. 481-489, 2016.
- SCARPA, A. L. M. *et al.* Growth response, gas exchange, and leaf anatomy of *Handroanthus* spp. seedlings in mine tailings enriched with nutrient solution. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, v. 22, n. 3, p. 3774-3787, 2022a.
- SCARPA, A. L. M. *et al.* Seed germination, initial growth and leaf anatomy of seedlings of four tree species grown in mine tailings in Brazil. **Seed Science Research**, v. 32, n. 2, p. 104-113, 2022b.
- SEGURA, F. R. *et al.* Potential risks of the residue from Samarco's mine dam burst (Bento Rodrigues, Brazil). **Environmental Pollution**, v. 218, p. 813-825, 2016.
- SILVA, B. A. B. *et al.* Survival, and anatomical and ecophysiological changes in isolated individuals of *Tillandsia recurvata* L. (Bromeliaceae) grown under different shading conditions. **Botany**, v. 101, n. 3, p. 65-74, 2023.
- SUN, Z. *et al.* Heavy metal pollution caused by small-scale metal ore mining activities: A case study from a polymetallic mine in South China. **Science of the Total Environment**, v. 639, p. 217-227, 2018.
- TAKAHASHI, C. A.; MERCIER, H. New insights into the role of the root system of epiphytic bromeliads: comparison of root and leaf trichome functions in acquisition of water and nutrients. **Annals of Botany**, v. 134, n. 5, p. 711-724, 2024.
- YU, J. *et al.* Comparative analysis of the dust retention capacity and leaf microstructure of 11 *Sophora japonica* clones. **Plos one**, v. 16, n. 9, p. 1-19, 2021.
- ZHANG, Y. *et al.* Optimization and field application of an eco-friendly molasses-based dust suppressant for open-pit coal mine haul roads. **Scientific Reports**, v. 15, n. 1, p. 1-16, 2025.
- ZOTZ, G.; HIETZ, P. The physiological ecology of vascular epiphytes: current knowledge, open questions. **Journal of experimental botany**, v. 52, n. 364, p. 2067-2078, 2001.

ZOTZ, G. **Plants on plants-the biology of vascular epiphytes**. Berlin: Springer, 2016.

ZOTZ, G. The systematic distribution of vascular epiphytes—a critical update. **Botanical Journal of the Linnean Society**, v. 171, n. 3, p. 453-481, 2013.