

## ESTUDO DOS MECANISMOS FISIOLÓGICOS DE *ILEX PARAGUARIENSIS* A. ST.-HIL. EXPOSTA A DIFERENTES CONCENTRAÇÕES DE CÁDMIO.

LETÍCIA DE OLIVEIRA<sup>1,2\*</sup>, DOUGLAS CARVALHO<sup>3</sup>, EMILY BALBINOT BALESTRIN<sup>4</sup>, SABRINE ONGARATO<sup>5</sup>, KAUÊ DE ALMEIDA STEFANSKI<sup>6</sup>, SUELEN DARIVA<sup>7</sup>, LAÍSA PRESTES<sup>8</sup>, DENISE CARGNELUTTI<sup>2,9</sup>

### 1 Introdução

A intensificação das atividades agrícolas e industriais tem contribuído para o aumento da contaminação ambiental por metais pesados, com efeitos adversos sobre a biodiversidade e riscos significativos à saúde humana. Entre esses metais, destaca-se o cádmio (Cd), altamente tóxico e não essencial, cujos níveis no solo têm se elevado de forma alarmante devido às práticas agrícolas intensivas (ONDRASEK et al., 2025) como o uso de fertilizantes fosfatados, pesticidas, resíduos agroindustriais e lodo de esgoto. O Cd se acumula no solo e é facilmente absorvido pelas raízes das plantas, alcançando a parte aérea e entrando na cadeia alimentar de animais e humanos, onde pode causar sérios problemas à saúde. Além de comprometer o crescimento vegetal, o Cd induz alterações na fotossíntese, estresse oxidativo e danos estruturais nos tecidos (SHAARI et al., 2024).

Frente a essa problemática, a fitorremediação surge como uma estratégia sustentável para mitigar a contaminação por Cd no ambiente, utilizando plantas para remover, estabilizar ou reduzir metais no solo. A espécie selecionada neste estudo foi a *Ilex paraguariensis* A. St-Hil (erva-mate), nativa da América do Sul e de grande importância econômica e cultural. Além

<sup>1</sup> Graduanda em Ciências Biológicas, Universidade Federal da Fronteira Sul, *campus Erechim*, contato: [leticia.oliveira@uffs.edu.br](mailto:leticia.oliveira@uffs.edu.br)

<sup>2</sup> Grupo de Pesquisa: Agricultura Familiar e Transição Agroecológica

<sup>3</sup> Graduando em Ciências Biológicas, Universidade Federal da Fronteira Sul, *campus Erechim*, contato: [douglas.carvalho@uffs.edu.br](mailto:douglas.carvalho@uffs.edu.br)

<sup>4</sup> Graduanda em Ciências Biológicas, Universidade Federal da Fronteira Sul, *campus Erechim*, contato: [emily.balestrin@uffs.edu.br](mailto:emily.balestrin@uffs.edu.br)

<sup>5</sup> Graduanda em Ciências Biológicas, Universidade Federal da Fronteira Sul, *campus Erechim*, contato: [sabrine.ongaratto@uffs.edu.br](mailto:sabrine.ongaratto@uffs.edu.br)

<sup>6</sup> Graduando em Ciências Biológicas, Universidade Federal da Fronteira Sul, *campus Erechim*, contato: [kaue.stefaski@uffs.edu.br](mailto:kaue.stefaski@uffs.edu.br)

<sup>7</sup> Graduanda em Ciências Biológicas, Universidade Federal da Fronteira Sul, *campus Erechim*, contato: [suelen.dariva@uffs.edu.br](mailto:suelen.dariva@uffs.edu.br)

<sup>8</sup> Graduanda em Ciências Biológicas, Universidade Federal da Fronteira Sul, *campus Erechim*, contato: [laisa.prestes@uffs.edu.br](mailto:laisa.prestes@uffs.edu.br)

<sup>9</sup> Doutora em Bioquímica Toxicológica, Universidade Federal da Fronteira Sul, *campus Erechim*, **Orientador(a)**.

disso, destaca-se por sua aparente tolerância a estresses ambientais, como a exposição a metais pesados, o que a torna promissora para pesquisas nessa área.

## 2 Objetivos

Investigar os mecanismos fisiológicos de plantas de *Ilex paraguariensis* A. St.-Hil. cultivada na presença do cádmio.

## 3 Metodologia

Os ensaios foram desenvolvidos em laboratórios e em casa de vegetação da Universidade Federal da Fronteira Sul, campus Erechim. As mudas de *Ilex paraguariensis* A. St.- Hil (três meses de idade) foram obtidas em comércio local e transplantadas em vasos (composto de solo, areia e substrato na proporção de 1: 1: 1), aclimatadas por sete dias e posteriormente expostas a quatro doses de Cd, baseando-se nos valores orientadores da CETESB [0, 1,5, 3, 6 mg (CdCl<sub>2</sub>.H<sub>2</sub>O) kg<sup>-1</sup> de solo]. As plantas permaneceram sob tratamento durante 15 dias, mantidas com irrigação diária em casa de vegetação. Após este período, as plantas foram analisadas quanto aos seguintes parâmetros fisiológicos: eficiência quântica máxima da atividade fotoquímica do fotossistema II (FSII) (Fv/Fm) foi determinada, por meio da adaptação ao escuro, utilizando-se o fluorômetro (modelo OS5p+, Opti-Sciences). Com o mesmo equipamento foram determinadas, no claro, a taxa de transporte de elétrons e o rendimento quântico efetivo do fotossistema II (Y'). A concentração interna de CO<sub>2</sub>, taxa de transpiração, condutância estomática, eficiência de carboxilação, eficiência no uso da água, foram mensurados no terço médio da primeira folha completamente expandida das plantas, utilizando-se um analisador de gases no infravermelho (IRGA).

## 4 Resultados e Discussão

Os resultados do presente estudo mostraram incremento de 37% para a eficiência fotossintética do PSII quando *I. paraguariensis* foi exposta a 1,5 mg Cd Kg<sup>-1</sup>, ao passo que na concentração maior ocorreu um decréscimo de 17%, quando comparado com o tratamento controle (Figura 1A). Similarmente, Sacramento et al. (2018) avaliou dois genótipos de girassol tolerante e sensível, expostos a 10 µM de Cd. Os mesmos autores também observaram uma redução significativa nos valores de PS(II) em ambos os genótipos sob estresse por Cd, indicando comprometimento na eficiência fotossintética do PSII.

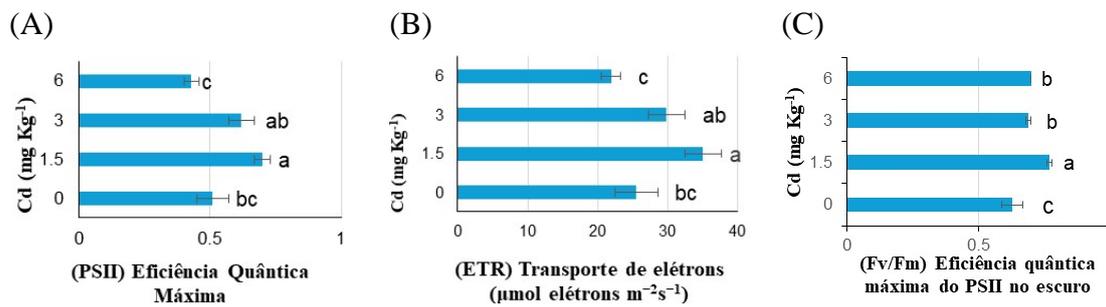


Figura 1. Eficiência quântica máxima do fotossistema II sob luz (PSII), taxa de transporte de elétrons (ETR) e eficiência quântica do PSII (Fv/Fm) de folhas de *Ilex paraguariensis* tratada com diferentes doses de cádmio (0; 1,5; 3 e 6 mg Kg<sup>-1</sup> de substrato) durante quinze dias. Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo teste Tukey a 95% de confiança ( $p \leq 0.05$ ).

Em relação ao transporte de elétrons (ETR), verificou-se que o Cd na concentração de 1,5 mg Kg<sup>-1</sup>, induziu uma variação superior (37%) a observada no tratamento controle (Figura 1B), indicando uma resposta adaptativa da planta, não apenas tolerando essa concentração de Cd, mas também apresentando um estímulo funcional com relação a ETR. Tal resposta indica que houve uma ativação de mecanismos antioxidantes e de reparos que mantiveram a função do PSII o que se verificou em estudos análogos com outras plantas (WANG et al., 2023).

Além disso, em plantas submetidas a 1,5 mg Cd Kg<sup>-1</sup>, verificou-se um aumento de 23% na Fv/Fm quando comparada com o tratamento controle (Figura 1C). Tal dado, revela uma possível resposta adaptativa da *I. paraguariensis* ao estresse por Cd. Estudos com plantas como *Elsholtzia argyi* mostraram que, sob estresse por Cd, há aumento de Fv/Fm em baixas concentrações, seguido de queda em níveis elevados, indicando resposta adaptativa, fenômeno também observado neste estudo.

Em relação a concentração interna de CO<sub>2</sub> (Ci), observou-se uma redução significativa (aproximadamente 12%) em todas as concentrações de Cd (Tabela 1). Essa diminuição na Ci está diretamente associada ao fechamento estomático parcial, induzido pelo estresse.

Tabela 1. Concentração interna de CO<sub>2</sub> (Ci), Taxa de Transpiração (E) e Eficiência de carboxilação da rubisco (A/Ci), taxa de fotossíntese líquida (A) e eficiência no uso da água (WUE) de folhas de *Ilex paraguariensis* tratada com diferentes doses de cádmio (0; 1,5; 3 e 6 mg Kg<sup>-1</sup> de substrato) durante quinze dias. Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo teste Tukey a 95% de confiança ( $p \leq 0,05$ ).

Cd (mg Kg <sup>-1</sup> )	Ci (μmol CO <sub>2</sub> mol ar <sup>-1</sup> )	E (mmol H <sub>2</sub> O m <sup>-2</sup> s <sup>-1</sup> )	A/Ci (μmol (μmol/mol) m <sup>2</sup> s <sup>-1</sup> )/	A (μmol m <sup>2</sup> s <sup>-1</sup> )	WUE (μmol CO <sub>2</sub> mmol <sup>-1</sup> H <sub>2</sub> O)
0	437.33 a	1.10 c	0.008 b	3.78 b	3.42 b
1,5	387.00 b	1.46 ab	0.017 ab	6.70 a	4.59 a
3	385.33 b	1.56 a	0.019 a	7.19 a	4.55 a
6	388.33 b	1.23 bc	0.014 ab	5.44 ab	4.31 a
CV (%)	3.09	8.24	26.33	15.22	7.35

A exposição de *I. paraguariensis* a 1,5 e 3 mg Cd kg<sup>-1</sup> aumentou a taxa de transpiração (E) em 33% e 42%, respectivamente, em relação ao controle. Esse incremento sugere um mecanismo adaptativo de tolerância, semelhante ao observado em *Brachiaria decumbens* por Melo et al. (2007), no qual o aumento da densidade estomática favorece a transpiração e a troca gasosa sob estresse. Assim, a espécie apresenta limiar de tolerância ao Cd até 3 mg Cd kg<sup>-1</sup>, acima do qual (6 mg Cd kg<sup>-1</sup>) a capacidade adaptativa é superada.

Na dose de 3 mg Cd kg<sup>-1</sup>, a A/Ci apresentou incremento de 137%, enquanto a assimilação de CO<sub>2</sub> (A) foi cerca de 1,8 vezes maior em relação ao controle. Esses resultados indicam uma resposta hormética, na qual baixas e moderadas concentrações de Cd estimulam processos metabólicos, possivelmente por meio do aumento da atividade de enzimas antioxidantes e fotorrespiratórias. Fenômeno semelhante foi descrito em *Lonicera japonica* (LIU et al., 2023), que exibiu maior taxa fotossintética e sequestro de carbono sob concentrações subletais de Cd.

Os resultados do presente estudo para a eficiência do uso da água (WUE) mostraram um incremento de aproximadamente 130% para todas as plantas tratadas com Cd (Tabela 1). Isso indica que a *I. paraguariensis* apresenta plasticidade fisiológica e mecanismos compensatórios eficientes diante do estresse por Cd.

## 5 Conclusão

Com base nos resultados do presente estudo foi possível concluir que a *Ilex paraguariensis* apresenta uma aparente tolerância a concentrações subletais de cádmio, sobretudo quando expostas a concentrações de 1,5 e 3 mg Kg<sup>-1</sup>.

## Referências Bibliográficas

ONDRASEK, G., SHEPHERD, J., R, S., DHARAVATH, R., RASHID, M. I., BrRTNICKY, M., SHAHID, M. S., HORVATINEC, J., & RENGEL, Z. Metal contamination – a global

environmental issue: sources, implications & advances in mitigation. **RSC Advances**, 15(5), 2025. <https://doi.org/10.1039/D4RA04639K> Disponível em:

<https://pubs.rsc.org/en/content/articlelanding/2025/ra/d4ra04639k>

SHAARI, NEM. Sintomas de toxicidade de cádmio e mecanismo de absorção em plantas: uma revisão. **Revista Brasileira de Biologia**, 84: 1-17, 2024. <https://doi.org/10.1590/1519-6984.252143> Disponível em:

<https://www.scielo.br/j/bjb/a/Jz3BCcHF7fXNfzg5Prdt4SH/?lang=en>

do SACRAMENTO, B. L., NETO, A. D. de A., ALVES, A. T., MOURA, S. C., & RIBAS, R. F. Photosynthetic parameters as physiological indicators of tolerance to cadmium stress in sunflower genotypes. **Revista Caatinga**, 31(4). 2018. <https://doi.org/10.1590/1983-21252018V31N413RC> Disponível em:

<https://www.scielo.br/j/rcaat/a/Zdv57VfQNHg54kSfPxQHlFw/?lang=en>

LI, S., YANG, W., YANG, T., CHEN, Y., & NI, W. Effects of Cadmium Stress on Leaf Chlorophyll Fluorescence and Photosynthesis of *Elsholtzia argyi*-A Cadmium Accumulating Plant. **International Journal of Phytoremediation**, 17(1) 2015.

<https://doi.org/10.1080/15226514.2013.828020> Disponível em:

<https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/15226514.2013.828020>

LIU, Z., TIAN, L., CHEN, M., ZHANG, L., LU, Q., WEI, J., & DUAN, X. Hormesis Responses of Growth and Photosynthetic Characteristics in *Lonicera japonica* Thunb. to Cadmium Stress: Whether Electric Field Can Improve or Not? **Plants**, 12(4). 2023.

<https://doi.org/10.3390/plants12040933> Disponível em: <https://www.mdpi.com/2223-7747/12/4/933>

**Palavras-chave:** Metais pesados, solo, erva-mate, toxicidade

**Nº de Registro no sistema Prisma:** PES-2024-0364

### Financiamento

