

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO
CÂMPUS UNIVERSITÁRIO DE SINOP
INSTITUTO DE CIÊNCIAS NATURAIS, HUMANAS E SOCIAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS AMBIENTAIS**

Camila dos Santos Soares

**Prospecção de plantas pioneiras, no sul da Amazônia, para
Fitorremediação de solos contaminados por mercúrio**

**SINOP
MATO GROSSO - BRASIL
2024**

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO
CÂMPUS UNIVERSITÁRIO DE SINOP
INSTITUTO DE CIÊNCIAS NATURAIS, HUMANAS E SOCIAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS AMBIENTAIS**

Camila dos Santos Soares

**Prospecção de plantas pioneiras, no sul da Amazônia, para fitorremediação
de solos contaminados por mercúrio**

Orientador: Prof. Dr. Ricardo Lopes Tortorela de Andrade
Coorientador: Prof. Dr. Leandro Dênis Battirola
Discente: Camila dos Santos Soares

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais da Universidade Federal de Mato Grosso, Câmpus Universitário de Sinop, na área de concentração Biodiversidade e Bioprospecção, como parte das exigências para a obtenção do título de Mestre em Ciências Ambientais.

Linha de pesquisa: Conhecimento, uso e conservação dos Recursos Naturais

**SINOP
MATO GROSSO - BRASIL
2024**

FICHA CATALOGRÁFICA

Dados Internacionais de Catalogação na Fonte.

S676p Soares, Camila dos Santos Soares.
Prospecção de plantas pioneiras para fitorremediação de solos contaminados por mercúrio [recurso eletrônico] / Camila dos Santos Soares Soares. -- Dados eletrônicos (1 arquivo : 31 f., pdf). -- 2024.

Orientador: Ricardo Lopes Tortorela de Andrade.

Coorientador: Leandro Dênis Battirola.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Mato Grosso, Instituto de Ciências Naturais, Humanas e Sociais, Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais, Sinop, 2024.

Modo de acesso: World Wide Web: <https://ri.ufmt.br>.

Inclui bibliografia.

1. Bioprospecção. 2. Biorremediação. 3. Metal tóxico. 4. Translocação. 5. Bioconcentração e bioacumulação. I. Andrade, Ricardo Lopes Tortorela de, *orientador*. II. Battirola, Leandro Dênis,

Ficha catalográfica elaborada automaticamente de acordo com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Permitida a reprodução parcial ou total, desde que citada a fonte.



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO
PRÓ-REITORIA DE ENSINO DE PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS AMBIENTAIS
FOLHA DE APROVAÇÃO

TÍTULO: "Prospecção de plantas pioneiras para fitorremediação de solos contaminados por mercúrio"

AUTOR (A): MESTRANDO (A) Camila dos Santos Soares

Dissertação defendida e aprovada em **05/09/2024**.

COMPOSIÇÃO DA BANCA EXAMINADORA

Presidente da Banca/Orientador: Doutor(a) Ricardo Lopes Tortorela de Andrade

Instituição : UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO

Examinador(a) Externo(a) Doutor(a) Sandro Estevan Moron

Instituição : UNIVERSIDADE FEDERAL DO TOCANTINS (UFT)

Examinador(a) Interno(a) Doutor(a) Adilson Paulo Sinhorin

Instituição : UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO

Examinador(a) Suplente Doutor(a) Gleyce Alves Machado

Instituição : Universidade Federal de Catalão - UFCAT

Examinador(a) Suplente Doutor(a) Roselene Maria Schneider

Instituição : UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO

SINOP, 05/09/2024.



Documento assinado eletronicamente por **RICARDO LOPES TORTORELA DE ANDRADE, Docente da Universidade Federal de Mato Grosso**, em 06/09/2024, às 12:47, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Sandro Estevan Moron, Usuário Externo**, em 10/09/2024, às 18:02, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **ADILSON PAULO SINHORIN, Docente da Universidade Federal de Mato Grosso**, em 10/09/2024, às 18:12, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site http://sei.ufmt.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **7128404** e o código CRC **72FEB3E7**.

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho ao meu orientador **Ricardo Lopes Tortorela de Andrade** e agradeço por compartilhar com dedicação, amor e paciência todo seu conhecimento e disponibilidade repetidamente nesta longa jornada.

À minha filha **Ananda Yasmin Fernandes** e meu marido **Ademir Martins**, por contribuir com compreensão e o apoio necessária para que esta pesquisa fosse realizada com sucesso. À minha irmã **Aline Heinz** que sempre me ajudou com palavras, afeto e pela compreensão em tantas outras atividades do dia a dia para que essa etapa se concluísse.

À minha mãe **Dalva Palmeiras** pela ajuda em cuidar tão bem da minha filha para que eu conseguisse realizar esta etapa em minha vida.

Dedico com muito amor à Deus por me dar forças para viver esta experiência.

AGRADECIMENTOS

Os meus mais sinceros agradecimentos primeiramente à **Deus**, pela sua bondade e misericórdia em chegar neste momento tão especial e com um enorme significado em minha vida. Gratidão por me dar força, perseverança, capacidade, dedicação e fé para finalizar este ciclo.

Ao Programa da Universidade Federal de Mato Grosso - Câmpus Universitário de Sinop Instituto de Ciências naturais, humanas e sociais - Programa de pós-graduação em ciências ambientais (PPGCAM). Aos coordenadores **Adilson Pacheco de Souza** e **Frederico Terra de Almeida** pela disponibilidade e se colocar à disposição para ajudar em todo o processo.

Aos professores do programa (PPGCAM) pela grandiosidade em conhecimento acrescentado a minha vida.

À minha filha **Ananda Yasmin Fernandes** e meu marido **Ademir Martins** que foram âncora em todo o processo; sempre torcendo e auxiliando desde sempre na realização dos meus sonhos.

Ao meu orientador **Ricardo Lopes Tortorela de Andrade**, que cresceu e muito no crescimento da minha formação dedicação, paciência, empatia... mesmo em momentos tão difíceis, não desistiu de mim. - Você professor me mostrou com muita afeição o quanto a pesquisa é importante e pode transformar o mundo com cada gesto.

Ao meu coorientador **Leandro Dênis Battirola** por contribuir com o aperfeiçoamento e desenvolvimento da dissertação, com um olhar atento, me auxiliando a deixar o contexto objetivo e de forma clara para finalizar com sucesso.

Aos professores **Milton Omar Córdova** e **Larissa Cavalheiro** que com muita dedicação e afeição auxiliou na identificação botânica da pesquisa.

Ao professor **Vinicius José Santos Lopes** pela complacência nas partes das análises, com seriedade, paciência e dedicação, contribuindo com os dados da pesquisa.

À parceira **Juliana Cavaletti** por sua amizade, compaixão e incentivo para iniciar no programa (PPGCAM) além de todos os conselhos e prontidão em partilhar seu grandioso conhecimento.

Muito obrigada a todos que amparam direta ou indiretamente para o fechamento deste ciclo.

EPÍGRAFE

Progresso é a soma dos problemas solucionados.
Evolução é barreira vencida.
Dificuldade é medida de resistência.
Tribulação é o cadinho da fé.
Chico Xavier

RESUMO

O mercúrio (Hg) é um metal tóxico, prejudicial à saúde e ao meio ambiente, que pode contaminar o ar, o solo e a água, com consequências para os seres vivos. Realizou-se a prospecção de plantas pioneiras com características que possam ser úteis em processos de fitorremediação de solos contaminados por Hg. Para a amostragem, foram demarcados 40 pontos amostrais (e.g. terrenos vazios, lotes baldios), distribuídos ao longo de todo o perímetro urbano do Município de Sinop, Mato Grosso, Brasil. Foram identificadas 41 espécies de plantas pioneiras, distribuídas em 12 famílias botânicas e, destas, as 16 que tiveram ocorrência maior ou igual a 7,5% dos locais de coleta foram novamente coletadas em quintuplicada, bem como o solo no entorno das raízes. A concentração de Hg foi determinada no solo, raízes e partes aéreas e, a partir delas, foram calculados os fatores de translocação (FT), de bioconcentração (BCF) e de bioacumulação (BAF). A concentração média de Hg no solo foi homogênea, com média de $94,7 \pm 23,0 \mu\text{g kg}^{-1}$, sem diferença significativa entre os diferentes pontos de coleta, nas raízes foi de $50,19 \pm 31,9 \mu\text{g kg}^{-1}$, com dois grupos estatisticamente diferentes e, nas partes aéreas, de $32,5 \pm 20,5 \mu\text{g kg}^{-1}$, também divididas em dois grupos. As espécies *Conyza bonariensis*, *Emilia sonchifolia*, *Praxelis clematidea*, *Euphorbia hirta* e *Mimosa pudica* apresentaram FT entre 1,2 e 1,84, estatisticamente iguais e, a espécie *Borreria capitata* apresentou o maior FT (3,04), indicando serem promissoras para a remediação de solos contaminados por Hg. O BAF mostrou apenas a espécie *Mimosa pudica* com valor superior a 1 (1,09), mostrando a capacidade desta planta de acumular o metal nas partes aéreas e, a espécie *Panicum dichotomiflorum* a única a apresentar BCF superior a 1,0 (1,11), indicando sua capacidade em acumular Hg nas raízes. Portanto, sete espécies foram selecionadas como promissoras para a fitorremediação por apresentarem ao menos um dos fatores com valor maior que um. Estudos específicos com simulações em laboratório e campo devem ser realizados para a efetiva aplicação da tecnologia com vistas à sustentabilidade dos processos produtivos e a conservação ambiental.

Palavras-chave: bioprospecção, biorremediação, metal tóxico, translocação, bioconcentração, bioacumulação.

ABSTRACT

Mercury (Hg) is a toxic metal, harmful to health and the environment, which can contaminate the air, soil and water, with consequences for living beings. The prospection of pioneer plants with characteristics that may be useful in phytoremediation processes of soils contaminated by Hg was carried out. For sampling, 40 sampling points (e.g. empty lots, vacant lots) were demarcated, distributed along the entire urban perimeter of the Municipality of Sinop, Mato Grosso, Brazil. A total of 41 pioneer plant species were identified, distributed in 12 botanical families and, of these, the 16 that had an occurrence greater than or equal to 7.5% of the collection sites were again collected in quintuplicate, as well as the soil around the roots. The Hg concentration was determined in the soil, roots and aerial parts and, from them, the translocation (TF), bioconcentration (BCF) and bioaccumulation (BAF) factors were calculated. The mean Hg concentration in the soil was homogeneous, with an average of $94.7 \pm 23.0 \mu\text{g kg}^{-1}$, with no significant difference between the different collection points, in the roots it was $50.19 \pm 31.9 \mu\text{g kg}^{-1}$, with two statistically different groups, and in the shoots, from $32.5 \pm 20.5 \mu\text{g kg}^{-1}$, also divided into two groups. The species *Conyza bonariensis*, *Emilia sonchifolia*, *Praxelis clematidea*, *Euphorbia hirta* and *Mimosa pudica* showed TF between 1.2 and 1.84, statistically equal, and the species *Borreria capitata* presented the highest TF (3.04), indicating that they are promising for the remediation of soils contaminated by Hg. The BAF showed only the species *Mimosa pudica* with a value higher than 1 (1.09), showing the ability of this plant to accumulate the metal in the aerial parts, and the species *Panicum dichotomiflorum* was the only one to present BCF higher than 1.0 (1.11), indicating its ability to accumulate Hg in the roots. Therefore, seven species were selected as promising for phytoremediation because they present at least one of the factors with a value greater than one. Specific studies with laboratory and field simulations must be carried out for the effective application of the technology with a view to the sustainability of production processes and environmental conservation.

Keywords: bioprospecting, bioremediation, toxic metal, translocation, bioconcentration, bioaccumulation.

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO GERAL	01
1. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	04
CAPÍTULO I	08
INTRODUÇÃO	08
MATERIAL E MÉTODOS	10
Área de estudo.....	10
Metodologia	11
Coleta e identificação das amostras	11
Análise química.....	11
Determinação dos fatores de translocação, bioacumulação e bioconcentração.....	12
Análise de dados.....	13
RESULTADOS.....	14
Ocorrência das plantas pioneiras.....	14
Acumulação de Hg pelas partes das plantas.....	16
Fatores de translocação, bioacumulação e bioconcentração	17
DISCUSSÃO	20
CONCLUSÃO	26
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	27

1. INTRODUÇÃO GERAL

O avanço do processo de industrialização e o crescimento das cidades têm contribuído significativamente para o aumento da contaminação ambiental em todo o mundo, especialmente por metais pesados. Entre os processos contaminadores estão a queima de carvão, despejos residuais e a exploração garimpeira de ouro por meio da mineração em pequena escala, que constituem fontes importantes de poluição por mercúrio (Hg) (Chen e Driscoll, 2018). Essas atividades contaminam o ar, a água e o solo (Dhaliwal et al., 2010; Silva et al., 2019).

A contaminação por Hg tem gerado grande preocupação devido ao seu amplo espectro de ação em diferentes compartimentos terrestres, aquáticos e da biosfera. Embora os metais possam ser encontrados naturalmente nesses ambientes, suas concentrações aumentaram rapidamente nas últimas décadas em função do crescimento populacional e da maior demanda de consumo, impactando o meio ambiente e a saúde humana (Dhaliwal et al., 2010; Awa e Hadibarata, 2020). Segundo Verma et al. (2021), elementos contaminantes podem alterar a estrutura do solo, nos aspectos físicos, biológicos e químicos, prejudicando seres vivos, o ambiente e os alimentos.

Os metais pesados mais presentes nos solos incluem níquel (Ni), chumbo (Pb), cádmio (Cd), arsênio (As), cromo (Cr), cobre (Cu), cobalto (Co), zinco (Zn), manganês (Mn), alumínio (Al) e mercúrio (Hg). Dentre esses metais, As, Pb, Cd e Hg estão classificados entre as 20 substâncias mais perigosas pela Agência de Substâncias Tóxicas e Registro de Doenças (Atsdr, 2012) e pela Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (US EPA) (Khalid et al., 2017). Os metais pesados no solo reduzem a produção vegetal ao perturbar os processos metabólicos das plantas, interferindo em seu ciclo de vida (Khan et al., 2009).

Esses elementos químicos demoram para se degradar e poluem o ambiente por longos períodos, tornando-se componentes estáveis no solo. Alguns são essenciais para organismos vivos em quantidades pequenas, mas se tornam tóxicos em quantidades elevadas. O Hg, por exemplo, não tem função biológica e é tóxico mesmo em baixas concentrações (Oliveira et al. 2024; Windmöller et al. 2007), e pode ser emitido a partir de fontes naturais como vulcões, degaseificação da crosta terrestre, mares e degelo das geleiras (Mason e Sheu 2002, Fisher, 2003). Este metal é transportado globalmente pela atmosfera, e suas condições de deposição e reemissão estão relacionadas às condições climáticas e às características químicas dos locais de deposição (Pirrone et al., 2010).

O Hg pode ser encontrado na natureza na forma de Hg^0 e sais mercuriais como HgCl_2 e Hg_2Cl_2 (formas inorgânicas) e em formas orgânicas, como metil mercúrio e etil mercúrio (a Asaduzzaman et al, 2015; Zhang et al., 2015). As formas orgânicas são mais tóxicas, sendo facilmente absorvidas pelos seres vivos, aumentando o risco de intoxicação (Armstrong, 2020). Crespo-Lopez et al. (2023) relatam que os sais mercurícos são mais solúveis em água e mais tóxicos que o mercúrio elementar, com meia-vida média no organismo humano de cerca de 40 dias, assim, 50% do Hg consumido é excretado no período de 40 dias. Quando a velocidade de ingestão é maior que a velocidade de excreção, o resultado é a bioacumulação.

O aumento da concentração de metais pesados no ambiente, incluindo Hg, tem sido associado a diversas doenças humanas, afetando também a produção agrícola, plantas, animais e o ambiente como um todo. Doenças cardiovasculares, câncer, comprometimento cognitivo, anemia crônica, danos nos rins, sistema nervoso, cérebro, pele e ossos estão relacionados à toxicidade dos metais (Heinrich, 2017). Além disso, esses metais afetam a resistência de grupos microbianos, impactando a produção de alimentos (Khalid et al., 2017; Tinôco et al., 2010).

De acordo com o Global Mercury Assessment (Futsaeter e Wilson 2013), foram emitidas 727 toneladas de Hg em 2005. Em 2010, as emissões aumentaram para cerca de 1.850 toneladas, representando um aumento de 254%, e em 2015, para 2.500 toneladas, cerca de 344% superior ao ano de 2005. Esse aumento reflete em maiores concentrações de Hg no ambiente, exigindo medidas urgentes para minimizar os danos aos seres vivos.

A remediação é o processo de remoção de poluentes de um ambiente contaminado e pode ocorrer de diversas formas, variando com o meio contaminado e o tipo de poluente (Santos et al., 2017). Métodos tradicionais de remediação incluem adsorção, imobilização, vitrificação, oxidação química, lavagem, diluição, substituição e técnicas eletrocinéticas, que apresentam altos custos (Fu et al., 2017; Lin et al., 2021; Smaranda et al., 2017; Terbouche et al., 2011; Khalid. et al., 2017).

Métodos tradicionais são frequentemente difíceis de executar e caros, exigindo matérias-primas, máquinas e mão-de-obra especializada (Yadav e Kumar, 2019). A fitorremediação, é um processo biológico que utiliza plantas para remover poluentes, e tem se mostrado um método eficaz, de baixo custo e ambientalmente amigável, reduzindo o risco de espalhamento dos metais (Ha, et al 2011). Esse processo pode ocorrer por fitoextração, fitoestimulação, fitoestabilização, fitovolatilização e rizofiltração (Thalikulangara et al.,

2021). Esses processos são medidos pelos fatores de bioconcentração, bioacumulação e translocação (Thalikulangara et al. 2021).

A fitorremediação é uma tecnologia promissora para a remoção de metais do solo e da água, regenerando o ambiente (Yan et al., 2020). Plantas pioneiras têm ganhado destaque por suas características de tolerância aos metais, alta produção de biomassa e capacidade de reprodução rápida (Girdhar et al., 2014, Oliveira et. al., 2024). Para serem eficazes na fitorremediação, essas plantas devem ter características como alta tolerância aos metais, adaptação ao clima, ciclo de vida curto, fácil reprodução por sementes e elevada produção de biomassa (Vangronsveld et al., 2009; Suman et al., 2015; Li et al., 2022). Segundo Obeng-gyasi (2020), a fitorremediação é conhecida como "remediação verde" devido à sua contribuição para a limpeza ambiental.

Chaudhary et al. (2018) relataram que até 2017 havia na literatura cerca de 400 a 500 plantas capazes de absorver metais e acumular na biomassa. Exemplos de plantas com potencial de fitorremediação incluem *Lemna valdiviana* Phil, que pode capturar até 82% do arsênio do ambiente aquático (Souza et al., 2019), *Bixa orellana* L., que absorve até 82% de cromo do solo (Devi et al., 2022), e *Helianthus tuberosus* L., capaz de absorver Hg do solo (Lv et al., 2018). A fitorremediação também é usada para remover agrotóxicos e petróleo, com plantas como *Luffa cylindrica* (L.) M. Roem., *Prototheca zopf*, *Urochloa decumbens* (Stapf) R.D.Webster, *Typha domingensis* Pers. e *Chrysopogon zizanioides* (L.) Roberty (Abplanalp et al., 2017).

No Brasil, plantas pioneiras são diversas devido à grande variação climática do país (Pitelli, 2015). Essas plantas surgem naturalmente em terrenos desmatados, auxiliando na regeneração do ambiente e restaurando o equilíbrio do solo (Procópio, Cintra e Resende, 2017). As plantas pioneiras têm despertado interesse por sua capacidade de remover biopesticidas e metais, além de serem usadas na medicina popular (Patel; Patel; Pandya, 2014). Algumas dessas plantas são consumidas por populações indígenas para fins alimentares e medicinais (Khattak et al., 2014).

Assim, o presente trabalho teve como objetivo prospectar espécies de plantas pioneiras abundantes na área urbana do Município de Sinop, norte de Mato Grosso e avaliar sua capacidade de remover Hg do solo, analisando a translocação do metal entre o solo e as raízes, entre o solo e a parte aérea e entre a parte a raiz e a parte aérea. Nossa hipótese é que plantas pioneiras possuem Alta taxa de produção, rápido desenvolvimento e grande produção de biomassa e são resistentes às condições adversas, características úteis na fitorremediação de solos contaminados por metais tóxicos.

2. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABPLANALP, W.; DEJARNETT, N.; RIGGS, D. W.; CONKLIN, D. J.; MCCRACKEN, J. P.; SRIVASTAVA, S.; XIE, Z.; RAI, S.; BHATNAGAR, A.; O'TOOLE, T. E. Benzene exposure is associated with cardiovascular disease risk. **PLoS One**, v. 12, n. 9, p. e0183602, 2017. Available at: <https://doi.org/10.1371/journal.pone0183602>.

ARMSTRONG RG., The Smell of Air Pollution: Olfactory Senses and the Odour of Canadian Oil, 1858-1885. *Ont Hist* 112(2): 2211–229, 2021. <https://doi.org/10.7202/1072238ar>

ASADUZZAMAN, K.; KHANDAKER, M. U.; AMIN, Y. M.; ZAINUDDIN, Z.; FAROOK, M. S. Measurement of radioactivity and heavy metal levels in edible vegetables and their impact on Kuala Selangor communities of Peninsular Malaysia. **Radiation Protection Dosimetry**, v. 167, p. 165-170, 2015. Disponível em: <https://academic.oup.com/rpd/article-abstract/167/1-3/165/2375253>. DOI: <https://doi.org/10.1093/rpd/ncv237>.

AWA, S. H.; HADIBARATA, T. Removal of Heavy Metals in Contaminated Soil by Phytoremediation Mechanism: a Review. **Environmental Science and Pollution Research**, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11270-020-4426-0>.

CHAUDHARY, K.; AGARWAL, S.; KHAN, S. Role of phytochelatins (PCs), metallothioneins (MTs), and heavy metal ATPase (HMA) genes in heavy metal tolerance. In: **Micoremediation and Environmental Sustainability**. Cham: Springer, 2018, pp. 39-60. DOI: 10.1007/978-3-319-77386-5_2.

CHEN, Celia Y.; DRISCOLL, Charles T. Integrating mercury research and policy in a changing world. **Ambio**, v. 47, pp. 111-115, 2018. DOI: 10.1007/s13280-017-1010-y.

CRESPO-LOPEZ, MARIA ELENA; ARRIFANO, GABRIELA P.; AUGUSTO-OLIVEIRA, MARCUS; MACCHI, BARBARELLA M.; LIMA, RAFAEL R.; NASCIMENTO, JOSÉ LUIZ M. DO; SOUZA, CARLOS B. A. Mercury in the Amazon: The danger of a single story. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, v. 256, 2023. ISSN 0147-6513. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2023.114895>.

DHALIWAL, S. S.; SINGH, J.; TANEJA, P. K.; MANDAL, A. Remediation techniques for removal of heavy metals from the soil contaminated through different sources: a review. **Environmental Science and Pollution Research**, 2010. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11356-019-06967-1>.

FISHER, JOHN F. Elemental mercury and inorganic mercury compounds: human health aspects. Agency for Toxic Substances and Disease Registry (ATSDR), Atlanta, Georgia, USA. **World Health Organization**. Geneva, 2003. ISBN: 9241530502.

FU, E.; HUANG, K.; CAI, H.-H.; LI, J.; ZHAI, D.-L.; DAI, Z.-C. Exploring the Potential of Naturalized Plants for Phytoremediation of Heavy Metal Contamination. **International Journal of Environmental Research**, v. 11, pp. 515-521, 2017. DOI: 10.1007/s41742-017-0045-z.

FUTSAETER, G.; WILSON, S. The UNEP Global Mercury Assessment: Sources, Emissions and Transport. **E3S Web of Conferences**, v. 1, 2013. DOI: 10.1051/e3sconf/20130136001.

GIRDHAR, M.; SHARMA, N. R.; REHMAN, H.; KUMAR, A.; MOHAN, A. Comparative assessment of hyperaccumulatory and phytoremediation potential of three wild weeds. **Biotechnologia**, v. 4, pp. 579-589, 2014. DOI: 10.1007/s13205-014-0194-0.

HA NGUYEN THI HOANG.; SAKAKIBARA MASAYUKI.; SANO SAKAE.; NHUAN MAI TRONG. Uptake of metals and metalloids by plants growing in a lead–zinc mine area, Northern Vietnam, **Journal of Hazardous Materials**, Volume 186, Issues 2–3, 2011, Pages 1384-1391, ISSN 0304-3894, <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2010.12.020>.

HEINRICH, J.; GUO, F.; TREPKA, M. J. Brief report: low-level Mercury exposure and risk of asthma in school-age children. **Epidemiology**, v. 28, n. 91, pp. 116-118, 2017. DOI: 10.1097/EDE.0000000000000576.

KHAN, M. A.; SADIQUE, M.; KHAN, S.; FAROOQ, R.; SHAHB, S. Health risk assessment of heavy metals to the population through vegetable consumption. **World Journal of Applied Sciences**, v. 6, n. 12, pp. 1602-1606, 2009.

KHALID, SANA; SHAHID, MUHAMMAD; NIAZI, NABEEL KHAN; MURTAZA, BEHZAD; BIBI, IRSHAD; DUMAT, CAMILLE. A comparison of technologies for remediation of heavy metal contaminated soils. **Journal of Geochemical Exploration**, v. 182, p. 247-268, 2017. ISSN 0375-6742. DOI: 10.1016/j.gexplo.2016.11.021.

KHATTAK, MUSHARAF; SHINWARI, ZABTA; SHAH, MOHIB; MUSHARAF, SHAHANA. An Ethnobotanical Survey of Medicinal and Other Useful Plants of Khattak Tribe in Tehsil Karak, Khyber Pakhtunkhawa, Pakistan. **Medicinal Plant Research**, v. 4, 2014. DOI: 10.5376/mpr.2014.04.0008.

LIN, H.; CHUANG, T.; YANG, P.; GUO, L.; WANG, S. Adsorption and desorption of thallium (I) in soils: the predominant contribution of clay minerals. **Applied Clay Science**, v. 205, 106063, 2021. DOI: 10.1016/j.clay.2021.106063.

LI, H.; JIN, R.; XU, Z.; HU, H.; KALKHAJEH, Y. K.; ZHAO, Y.; et al. Application of GLDA chelate for remediation of Cd-contaminated agricultural lands using Tagetes patula L. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 1–9, 2022. DOI: 10.1007/s11356-022-22470-6.

LV, S.; YANG, B.; KOU, Y.; ZENG, J.; WANG, R.; XIAO, Y.; LI, F.; YING, L.; YUWEN, M.; ZHAO, C. Assessing the tolerance difference and phytoremediation potential in mercury-contaminated soil of a non-food energy crop, Helianthus tuberosus L. (Jerusalem artichoke). **PeerJ**, v. 6, e4325, 2018. DOI: 10.7717/peerj.4325.

MASON, R. P.; SHEU, G.-R. Role of the ocean in the global mercury cycle. **Global Biogeochemical Cycles**, v. 16, n. 4, p. 1093, 2002. DOI: 10.1029/2001GB001440.

OBENG-GYASI, EMMANUEL; OBENG-GYASI, BARNABAS. Chronic Stress and Cardiovascular Disease among Individuals Exposed to Lead: A Pilot Study. **Diseases**, v. 8, p. 7, 2020. DOI: 10.3390/diseases8010007.

OLIVEIRA, E. A.; SILVA, L. C.; ANDRADE, E. A.; BATTIROLA, L. D.; ANDRADE, R. L. T. *Emilia fosbergii* Nicolson, a novel and effective accumulator for phytoremediation of mercury-contaminated soils. **International Journal of Phytoremediation**, v. 26, n. 7, p. 1076–1086, 2024. DOI: 10.1080/15226514.2023.2288906.

PATEL, Yogesh B.; PATEL, Nimisha D.; PANDYA, Himanshu A. Weeds of the major cereal crops and their economic Gujarat, India. **Archives of Applied Science Research**, v. 6, n. 6, p. 34-39, 2014. Available at: <http://scholarsresearchlibrary.com/archive.html>. Access in: 13 jul. 2024.

PITELLI, ROBINSON ANTONIO. O TERMO PLANTA-DANINHA. **Planta Daninha**, v. 33, p. 622-623, set. 2015. DOI: 10.1590/S0100-83582015000300025.

PIRRONE, N.; CINNIRELLA, S.; FENG, X.; FINKELMAN, R. B.; FRIEDLI, H. R.; LEANER, J.; TELMER, K. Global mercury emissions to the atmosphere from anthropogenic and natural sources. **Atmospheric Chemistry and Physics**, v. 10, p. 5951–5964, 2010. DOI: 10.5194/acp-10-5951-2010.

PROCÓPIO, S. DE O.; CINTRA, F. L. D.; RESENDE, R. S. Coberturas de solo para o manejo de plantas daninhas em áreas de produção de coco. In: **SEMINÁRIO SOBRE MANEJO SUSTENTÁVEL PARA A CULTURA DO COQUEIRO**, 2017. Disponível em: <https://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/bitstream/doc/1076346/1/Coberturasdesolo.pdf>.

SANTOS, ALECSANDRA DOS; COSTA, GRAZIELA DA SILVA; PERALTA-ZAMORA, PATRICIO. Remediation of soils contaminated by Fenton processes: a critical review. **Quím. Nova**, São Paulo, v. 40, n. 3, p. 327-333, 2017. Review. Available at: <http://dx.doi.org/10.21577/0100-4042.20160187>.

SMARANDA, C.; POPESCU, M.; BULGARIU, D.; MÏLUÿAN, T.; GAVRILESCU, M. Adsorption of organic pollutants in Romanian soil: Column dynamics and transport. **Process Safety and Environmental Protection**, v. 108, p. 108-120, 2017. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.psep.2016.06.027>.

SILVA, T. J.; HANSTED, F.; TONELLO, P. S.; GOVEIA, D. Fitorremediação de solos contaminados com metais: panorama atual e perspectivas de uso de espécies florestais. **Revista Virtual de Química**, v. 11, n. 1, p. 18-34, 2019. DOI: 10.21577/1984-6835.20190003.

SOUZA, T. D.; BORGES, A. C.; BRAGA, A. F.; VELOSO, R. W.; TEIXEIRA DE MATOS, A. Fitorremediação de água contaminada com arsênico por *Lemna Valdiviana*: Um estudo de otimização. **Química Nova**, v. 234, p. 402-408, 2019. DOI: 10.1016/j.chemosfera.2019.06.004.

SUMAN, J.; UHLIK, O.; SHARMA, S.; SINGH, B.; MANCHANDA, V. K. Phytoremediation: role of terrestrial plants and aquatic macrophytes in the remediation of soil and water contaminated with radionuclides and heavy metals. **Environment. Science. and Pollution Research**, v. 22, p. 946–962, 2015. DOI: 10.1007/s11356-014-3635-8.

TERBOUCHE, A.; RAMDANE-TERBOUCHE, C.; HAUCHARD, D.; DJEBBAR, S. Evaluation of the adsorption capabilities of humic acids extracted from Algerian soil on polyaniline for application in the removal of pollutants such as Cd (II), Zn (II) and Ni (II) and characterization with a cavity microelectrode. **Journal of Environmental Sciences**, v. 23, n. 7, p. 1095-1103, 2011. Available at: [https://doi.org/10.1016/S1001-0742\(10\)60521-9](https://doi.org/10.1016/S1001-0742(10)60521-9).

THALIKULANGARA MADANAN, M.; VARGHESE, G. K.; SHAH, I. K. Phytoremediation potential of heavy metals by *Chloris barbata* Sw. (swollen finger grass) and risk assessment of the forage-cattle-human food chain system. **Environmental Science and Pollution**, v. 28, p. 45096-45108, 2021. Available at: <https://doi.org/10.1007/s11356-021-13840-7>.

Tinôco AAP, Azevedo IC d'AD, Marques EAG, Munteer AH, Martins CP, Nascentes R, Reis EL, Natalino R (2010) Evaluation of mercury contamination in Descoberto, MG. Eng San Ambie 15(4):305314. DOI: <https://doi.org/10.1590/S141341522010000400003>

VANGRONSVELD, J.; HERZIG, R.; WEYENS, N.; BOULET, J.; ADRIAENSEN, K.; RUTTENS, A.; et al. Phytoremediation of contaminated soils and groundwater: Lessons from field studies. **Environmental Science and Pollution Research**, 16, 765–794, 2009. doi: 10.1007/s11356-009-0213-6.

VERMA, ROHIT; SINGH SANKHLA, MAHIPAL; JADHAV, EKTA; PARIHAR, KAPIL; AWASTHI, KUMUD. Phytoremediation of Heavy Metals Extracted from Soil and Aquatic Environments: Current Advances as well as Emerging Trends. **Biointerface Research in Applied Chemistry**, v. 12, p. 5486-5509, 2021. DOI: 10.33263/BRIAC124.54865509.

WINDMÖLLER, CLÁUDIA; SANTOS, REGIS; ATHAYDE, MAYCON; PALMIERI, HELENA. Distribution and speciation of mercury in sediments from gold mining sites in Iron Quadrangle (MINAS GERAIS). **Química Nova**, v. 30, p. 1088-1094, 2007. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-40422007000500007>

YADAV, DEEPAK; KUMAR PRADEEP. Phytoremediation of Hazardous Radioactive Wastes. **Assessment and Management of Radioactive and Electronic Wastes**. IntechOpen. SN - 978-1-78985-117-5, (2019) Available at: <http://dx.doi.org/10.5772/intechopen.88055>.

YAN, A.; WANG, Y.; TAN, S. N.; MOHD YUSOF, M. L.; GHOSH, S.; CHEN, Z. Phytoremediation: a promising approach for revegetation of heavy metal-polluted land. **Frontiers in Plant Science**, v. 11, p. 359, 2020. DOI: 10.3389/fpls.2020.00359.

ZHANG, L.; WANG, S.; WANG, L.; WU, Y.; DUAN, L.; WU, Q.; WANG, F.; YANG, M.; YANG, H.; HAO, J.; LIU, X. Updated emission inventories for speciated atmospheric mercury from anthropogenic sources in China. **Environmental Science and Technology**, v. 49, p. 3185-3194, 2015. DOI: 10.1021/es504840m.

CAPÍTULO I.

PROSPECÇÃO DE PLANTAS PIONEIRAS PARA FITORREMEDIAÇÃO DE SOLOS CONTAMINADOS POR MERCÚRIO

O presente manuscrito foi submetido ao periódico International Journal of Environmental Science and Technology e após avaliação inicial dos revisores foi devolvido para correções.

Camila dos Santos Sores, Franciele de Freitas, Vinicius José Santos Lopes, Milton Omar Córdova, Larissa Cavalheiro, Leandro Dênis Battirola e Ricardo Lopes Tortorela de Andrade.

INTRODUÇÃO

A contaminação por metais tóxicos é uma preocupação crescente para governos e ambientalistas, especialmente devido ao aumento da produção industrial que resulta na acumulação desses metais no meio ambiente, tornando-os tóxicos para seres humanos, animais e vegetação (Oliveira et al., 2024). Os metais pesados, como o mercúrio, causam efeitos adversos nos organismos ao interferirem diretamente no sistema metabólico, impedindo seu funcionamento adequado (Rehman et al., 2021).

Esses metais chegam às plantas por meio do solo contaminado, a partir da decomposição das plantas, da deposição de resíduos líquidos e sólidos, e das águas (Choudhary et al., 2010). Ao absorver os nutrientes, as plantas acabam contaminadas pelos metais, que se fixam nos tecidos vegetais e, assim, entram na cadeia alimentar (Jambhulkar e Juwarkar, 2009; Khan, 2015). O mercúrio (Hg) é um metal pesado considerado não essencial, pois não é usado em nenhuma função metabólica e, quando inserido na cadeia alimentar, se acumula no organismo, não sendo facilmente metabolizado ou eliminado (Windmöller et al., 2007). Este metal é classificado como o terceiro mais tóxico pela Agência de Substâncias Tóxicas e Registro de Doenças, causando efeitos severos no cérebro e rins em altas concentrações (Fonseca et al, 2000; Nurjaya, Ardiansyah e Syofyan, 2023).

Fontes naturais de Hg para a atmosfera incluem solo, vegetação, vulcões, queima de biomassa e oceanos, enquanto as fontes antropogênicas principais são a queima de combustíveis fósseis e a mineração artesanal em pequena escala (Seccatore et al., 2014; Lyman et al., 2020). Cerca de 37,7% das emissões de Hg para a atmosfera são atribuídas à mineração artesanal e em pequena escala de ouro (MAPEO), que utiliza Hg para separar o

ouro da rocha (UN Environment, 2019; Bank, 2020). As atividades mineradoras têm impactos severos na ecologia, biodiversidade e saúde da fauna (Chaulya et al., 2011).

A região norte de Mato Grosso, onde está localizada a cidade de Sinop, é conhecida por suas reservas de ouro e a consequente exploração utilizando Hg. Portanto, identificar espécies de plantas adaptadas ao clima da região é essencial para mitigar futuros problemas de contaminação dos solos decorrentes do uso contínuo de Hg nas atividades mineradoras (Casagrande et al., 2020).

Com a crescente demanda por alimentos, as plantas pioneiras têm ganhado espaço, sendo usadas tanto para fins medicinais quanto na fitorremediação. Estudos têm demonstrado a resistência dessas plantas ao mercúrio, bem como sua capacidade de absorver o metal do solo, reduzindo seu acúmulo no ambiente (Girdhar et al., 2014; Oliveira et al., 2024). A fitorremediação, quando comparada a outros métodos de remediação, é eficaz, econômica e facilmente acessível, sendo uma forma ecológica de tratamento ambiental (Oliveira et al., 2024).

A fitorremediação mostrou-se eficaz na remoção de metais pesados do solo, especialmente quando utiliza plantas nativas das regiões afetadas, devido à sua adaptação e resistência ao estresse local (Yoon et al., 2006). A presença de metais pesados na cadeia alimentar pode causar diversos problemas fisiológicos, incluindo danos ao sistema nervoso central, renal e reprodutivo, além de serem reconhecidos por suas propriedades cancerígenas, mutagênicas e teratogênicas (Malik E Maurya, 2014).

Para avaliar a capacidade de uma planta em acumular Hg, são utilizados três fatores: o fator de bioconcentração (relação entre a concentração de metal nas raízes e no solo), o fator de translocação (capacidade da planta em translocar os metais das raízes para a parte aérea) e o fator de bioacumulação (relação entre as concentrações do metal nas partes aéreas e no solo) (Tu, Ma, & Bondada, 2002).

Considerando a importância de estudos que identifiquem espécies nativas que apresentem potencial para uso em processos de remediação da contaminação ambiental, o presente estudo prospectou plantas pioneiras na área urbana do Município de Sinop, norte de Mato Grosso, avaliando sua ocorrência e capacidade de absorção do Hg presente no solo. Para tanto foram analisados parâmetros de mobilidade do metal nos tecidos vegetais, como os fatores de translocação, bioacumulação e bioconcentração. Nossa hipótese é que as plantas pioneiras possuem facilidade de reprodução, desenvolvimento rápido, elevada produção de biomassa e resistência às condições adversas, características úteis na fitorremediação de solos contaminados por metais tóxicos.

MATERIAL E MÉTODOS

- Área de estudo

Este estudo foi realizado no perímetro urbano de Sinop, na região norte de Mato Grosso à 500 km da capital Cuiabá ($11^{\circ}50'53''$ de latitude sul $55^{\circ}38'57''$ de longitude oeste), com altitude média de 384 metros (Figura 1). Sinop apresenta área territorial de 3.990,870 km² e população de 196.312 habitantes, gerando a densidade demográfica de 49,19 hab. km⁻² (Ibge, 2022). Apresenta PIB per capita de R\$ 64.607,12 (ano base 2021) e IDH de 0,807. A região norte do Estado, de acordo com a classificação de Köppen, possui clima Tropical de Savana (Aw), caracterizado como chuvoso, com índice pluviométrico anual médio de 1.900 mm, com seca no outono e inverno e temperaturas anuais médias superiores a 24°C (Souza et al. 2013; Climate-Data Sinop).

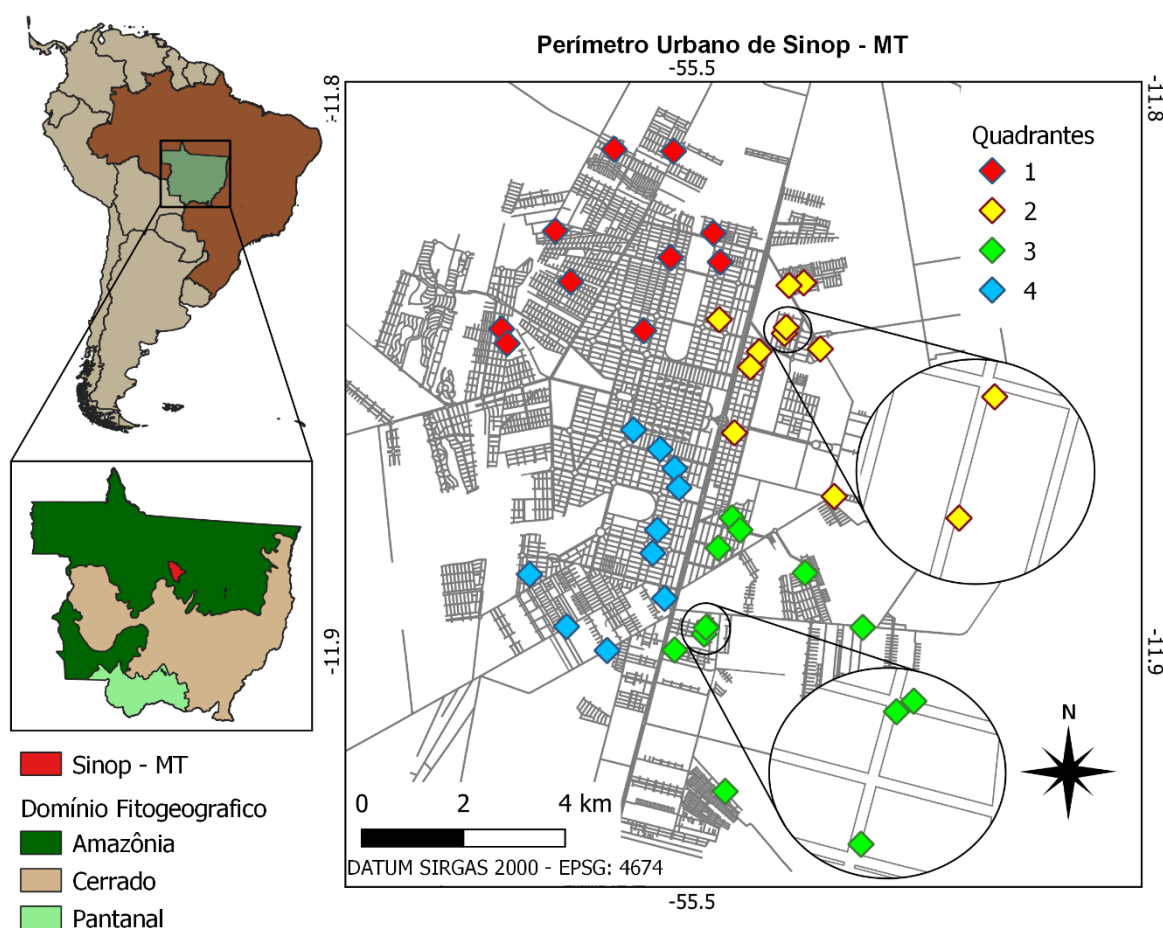


Figura 1 – Área de coleta, com destaque para Mato Grosso e para a área urbana do Município de Sinop. (Mapa elaborado pelos autores).

- Metodologia

- Coleta e identificação das amostras

Para a amostragem de plantas pioneiras foram demarcados 40 pontos amostrais (e.g. terrenos vazios, lotes baldios), distribuídos no perímetro urbano de Sinop. Para garantir uma coleta representativa, o perímetro urbano foi dividido em quadrantes e, em cada quadrante, foram realizadas coletas em 10 pontos amostrais. Todos os pontos foram devidamente georreferenciados e sua localização pode ser observada na Figura 1. A amostragem foi realizada entre fevereiro e abril de 2023, ainda em período chuvoso na região. Em cada ponto amostral foram coletados dois exemplares de cada espécie vegetal pioneira visualizada. Para a identificação do material botânico foram feitas exsicatas que, posteriormente foram depositadas no Herbário Centro-Norte-Mato-Grossense (Herbário CNMT) no Acervo Biológico da Amazônia Meridional (ABAM) da Universidade Federal de Mato Grosso (UFMT), Câmpus Universitário de Sinop.

A partir da determinação botânica, as 16 espécies mais abundantes e com, no mínimo, 7,5% de ocorrência, foram novamente coletadas, entre novembro de 2023 e fevereiro de 2024, para avaliação de seu potencial para o uso na fitorremediação de solos contaminados por Hg. Ao todo foram coletadas cinco réplicas de cada uma das 16 espécies, bem como amostras do solo localizado no entorno das raízes. Para avaliação das plantas, foram separadas as raízes e a parte aérea, totalizando 240 amostras para análise química, sendo 80 amostras de raízes, 80 de partes aéreas e 80 de solo.

Em laboratório as plantas foram lavadas e, ainda frescas, foram separadas em partes aéreas e raízes. Todo o material vegetal e o solo foram acondicionados em sacos de papel e levados para secagem em estufa de circulação de ar forçado, a 50 °C até peso constante. Após a secagem as amostras foram trituradas, embaladas hermeticamente e armazenadas em freezer a -20 °C até a análise química. Com este procedimento pretendeu-se minimizar a perda por volatilização do Hg contido nas amostras, preservando suas características até a análise química.

- Análise química

Para a análise química da concentração de mercúrio, pesou-se cerca de 0,2 g de cada amostra em balança analítica com 0,1 mg de precisão. Esse material foi acondicionado em tubos de digestão, em que foram adicionados 5,0 mL de ácido sulfúrico P.A. (H₂SO₄) e 2,0 mL de solução de ácido nítrico P.A. (HNO₃) e ácido perclórico P.A (HClO₄), na proporção de

1:1 (v/v), de acordo com Akagi e Nishimura (1991). Os tubos foram então submetidos a aquecimento em bloco digestor em um tempo de 30 minutos a 230 °C. Logo após foram transferidos quantitativamente para balões volumétricos de 25 mL e completou-se o volume com água purificada.

O teor de Hg foi determinado por espectroscopia de absorção atômica utilizando o equipamento Agilent AA240FS, acoplado ao acessório para geração de vapor frio VGA77. As soluções de calibração foram preparadas a partir de solução padrão 1000 ppm, marca Specsol® que pode ser rastreada através do NIST (*National Institute of Standards and Technology*), marca Specsol®. O limite de detecção do método foi determinado pela média de 10 brancos mais três vezes desvio padrão destes brancos, correspondendo a 9,7 µg kg⁻¹ de Hg. O limite de quantificação foi determinado pela média de 10 brancos acrescidos de 10 vezes o desvio padrão ou 24,7 µg kg⁻¹. A exatidão e precisão do método analítico foi determinada usando amostras fortificadas com íons Hg antes da digestão, em três concentrações distintas e com sete repetições em cada concentração, cujo coeficiente de recuperação médio foi de 91,5% e coeficiente de variação de 4,6%.

- Determinação dos fatores de translocação, bioacumulação e bioconcentração

Com os resultados da análise química, foram calculados os parâmetros de fitorremediação que indicam a capacidade da planta em mobilizar o Hg do ambiente para suas estruturas e, por consequência, sua capacidade para remover o Hg do ambiente em que está sendo cultivada. Assim, foram calculados os fatores de translocação (TF), de bioconcentração (BCF) e de bioacumulação (BAF) conforme Oliveira et al., (2024).

O TF foi calculado pela razão entre a concentração de Hg na parte aérea e a concentração de Hg na raiz, de acordo com a equação 1:

$$TF = \frac{[Hg]_{aérea}}{[Hg]_{raiz}}, Eq. 1$$

O BCF foi calculado pela razão entre a concentração de Hg nas raízes e a concentração de Hg no solo, conforme a equação 2:

$$BCF = \frac{[Hg]_{raiz}}{[Hg]_{solo}}, Eq. 2$$

O BAF foi calculado pela razão entre a concentração de Hg na parte aérea e a concentração de Hg no solo, de acordo com a equação 3:

$$BAF = \frac{[Hg]_{a\acute{e}ra}}{[Hg]_{solo}}, Eq. 3$$

- Análise de dados

Para a análise de dados foi usado um delineamento inteiramente casualizado em um esquema fatorial com 16 espécies e 3 partes analisadas (solo, raiz e folha). Os dados referentes à concentração de Hg foram normalizados usando a raiz quadrada do valor, de forma a apresentarem normalidade pelo teste de Kolmogorov-Smirnov. Posteriormente, os dados foram submetidos à análise de variância entre as concentrações de Hg nas diferentes partes da planta e do solo, bem como para os fatores TF, BCF e BAF. As análises foram seguidas do teste de Scott-Knott para a comparação das médias usando o software SISVAR (Ferreira, 2010).

RESULTADOS

- Ocorrência das plantas pioneiras

Das 166 plantas coletadas, foram identificadas 41 espécies de plantas pioneiras, distribuídas em 12 famílias botânicas (Tabela 1). Poaceae (13 spp. e frequência de 39,8 %) e Asteraceae (9 spp. e frequência de 27,1 %) corresponderam às famílias com maior porcentagem de ocorrência em relação aos 166 espécimens coletados (Figura 2).

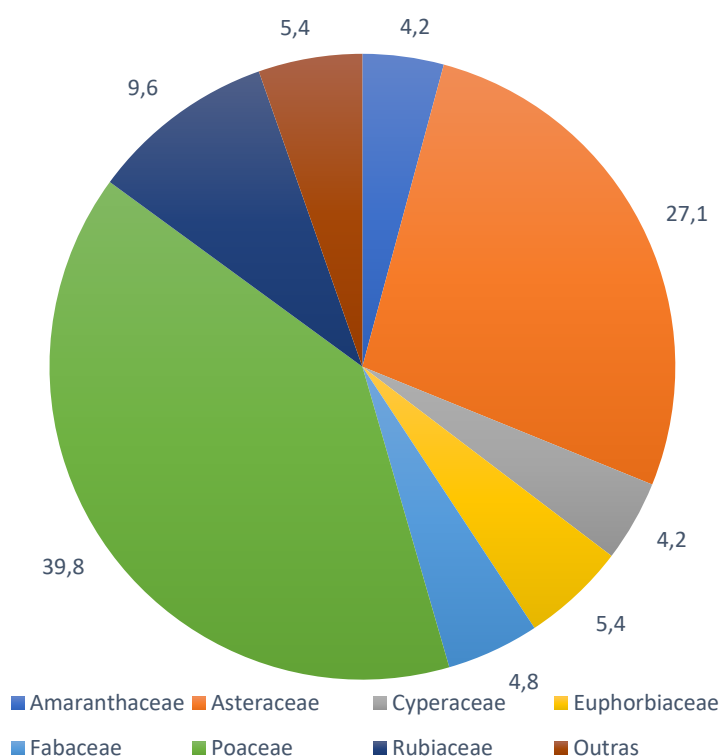


Figura 2 – Porcentagem de ocorrência das Famílias em relação aos 166 espécimens coletados.

Rubiaceae (4 spp.), Cyperaceae e Fabaceae (3 spp. cada), Euphorbiaceae e Verbenaceae (2 spp. cada), Amaranthaceae, Loganiaceae, Malvaceae, Plantaginaceae e Turneraceae (1 sp. cada) corresponderam as demais famílias (Tabela 1). As espécies mais distribuídas no município, ou seja, aquelas que foram localizadas em mais pontos amostrais, foram *C. echinatus* (distribuída em 19 pontos, 47,5% dos pontos e 11,5% de frequência), *Emilia sonchifolia* L. (DC) (distribuída em 17 pontos; 42,5% dos pontos e 10,2% de frequência), *Digitaria ciliares* (Retz.) Koeler (distribuídas em 14 pontos; 35,0% dos pontos e 8,4% de frequência), *Tridax procumbens* L. e *Chloris barbata* Sw. (ambas distribuídas em 12

pontos, 30,0% dos pontos e 7,2 % de frequência). As demais espécies ocorreram em menos de 10 pontos amostrais (Tabela 1).

Tabela1. Identificação das plantas pioneiras prospectadas nos pontos de coleta em Sinop MT. A Frequência em % Família corresponde a frequência da espécie na família, a distribuição corresponde a % em relação ao número de pontos de coleta em que foram encontradas (nº. de pontos) e, a frequência, corresponde a %, em relação aos 166 espécimes coletados.

Família	Espécie	Frequência % Família	Distribuição (% Pontos)	Frequência (Espécime)
Amaranthaceae	<i>Alternanthera tenella</i> Colla.	100	17,5	4,2
	<i>Acanthospermium hysspidum</i> DC.	2,2	2,5	0,6
	<i>Ageratum conyzoides</i> L.	4,4	5,0	1,2
	<i>Bidens bipinnata</i> L.	4,4	5,0	1,2
	<i>Conyza bonariensis</i> (L.)	6,7	7,5	1,8
	<i>Eclipta prostrata</i> (L.)	2,2	2,5	0,6
	<i>Emilia sonchifolia</i> (L.) DC	37,8	42,5	10,2
	<i>Lepidaploa salzmannii</i> (DC) H.ROB.	4,4	5,0	1,21
	<i>Praxelis clematidea</i> (Griseb.) R.M.King & H. Rob	11,1	12,5	3,0
Asteraceae	<i>Tridax procumbens</i> L.	26,7	30,0	7,2
	<i>Cyperus aggregatus</i> Willd.	71,4	12,5	3,0
	<i>Cyperus esculentus</i> L.	14,3	2,5	0,6
Cyperaceae	<i>Cyperus iria</i> L.	14,3	2,5	0,6
	<i>Euphorbia hirta</i> L.	66,7	15,0	3,6
Euphorbiaceae	<i>Euphorbia hyssopifolia</i> L.	33,3	7,5	1,8
	<i>Mimosa pigra</i> L.	12,5	2,5	0,6
Fabaceae	<i>Mimosa pudica</i> L.	62,5	12,5	3,0
	<i>Senna obtusifolia</i> (L.)	25,0	5,0	1,2
Loganiaceae	<i>Spigelia anthelmia</i> L.	100,0	2,5	0,6
Malvaceae	<i>Sida rhombifolia</i> L.	100,0	5,0	1,2
Plantaginaceae	<i>Scoparia dulcis</i> L.	100,0	5,0	1,2
Poaceae	<i>Cenchrus echinatus</i> L.	28,8	47,5	11,5
	<i>Cenchrus purpureus</i> (Schumach.) Morrone	3,0	5,0	1,2
	<i>Chloris barbata</i> Sw.	18,2	30,0	7,2
	<i>Chloris elata</i> Desv.	1,5	2,5	0,6
	<i>Dactyloctenium aegyptium</i> Beauv.	1,5	2,5	0,6
	<i>Digitaria ciliaris</i> (Retz.) Koeler	21,2	35,0	8,4
	<i>Diplache fusca</i> (L.) P.Beauv	3,0	5,0	1,2
	<i>Eleusine indica</i> (L.) Gaertn.	6,1	10,0	2,4
	<i>Eragrostis bahiensis</i> Schrad. ex Schult.	1,5	2,5	0,6
	<i>Eragrostis pilosa</i> (L.) P.Beauv.	1,5	2,5	0,6
	<i>Leptochloa virgata</i> Beauv.	1,5	2,5	0,6
	<i>Panicum dichotomiflorum</i> Michx.	9,1	15,0	3,6
	<i>Paspalum pilosum</i> Lam.	1,5	2,5	0,60
Rubiaceae	<i>Borreria capitata</i> (Ruiz & Pav).	25,0	10,0	2,4
	<i>Borreria alata</i> (Aubl.)	6,3	2,5	0,6
	<i>Mitracarpus hirtus</i> (L.) DC.	56,3	22,5	5,4
	<i>Oldenlandia corymbosa</i> L.	12,5	5,0	1,2
Turneraceae	<i>Periqueta cistoides</i> (L.) Griseb	100,0	5	1,2
Verbenaceae	<i>Priva lappulacea</i> (L.) Pers.	50,0	2,5	0,6
	<i>Stachytarpheta cayennensis</i> (Rich.) Vahl.	50,0	2,5	0,6

A análise da Tabela 1, por Família, mostra que entre as Asteraceae, a espécie *E. sonchifolia* foi a de maior frequência, e corresponde a 37,8% dos espécimes coletados nesta família, seguido pela *T. procumbens*, com 26,7 % e *P. clematidea* com 11,1 %. Nas Cyperaceae, a espécie *Cyperus aggregatus* Willd apresentou frequência de 71,4 % na família, nas Euphorbiaceae a espécie *Euphorbia hirta* L., apresentou frequência de 66,7 %, nas Fabaceae, a espécie *Mimosa. Pudica* L., apresentou frequência de 66,7 %, nas Poaceae as espécies *C. echinatus*, *Digitaria ciliaris* (Retz.) Koeler e *C. barbata* formas as mais frequentes, com 28,8, 21,2 e 18,2% de frequência na Família. Nas Rubiaceae, as espécies *Mitracarpus hirtus* (L.) DC.e *Borreria capitata* (Ruiz & Pav), apresentaram frequências na Família de 56,3 e de 25 %, respectivamente. Nas demais famílias apenas uma espécie foi encontrada, exceto a Verbanaceae, que teve 2 espécies coletadas, mas que corresponderam a apenas 0,6 % do total, mostrando que a distribuição destas espécies na área urbana está restrita a algumas regiões.

Acumulação de Hg pelas partes das plantas

Os resultados mostram que o Hg foi detectado em todas as amostras analisadas (concentrações acima do limite de detecção de $9,7 \mu\text{g kg}^{-1}$ e que foi quantificado em todas as amostras de solos, e na maior parte das amostras da biomassa das plantas, ou seja, todas amostras que apresentaram concentrações de Hg acima de $24,7 \mu\text{g kg}^{-1}$ foram quantificadas.

Tabela 2 – Concentrações de Hg em $\mu\text{g kg}^{-1}$ para as raízes, partes aéreas e solo das espécies que apresentaram ocorrência em mais de 7,5% dos terrenos visitados no perímetro urbano de Sinop, Mato Grosso

Família	Espécie	[Hg] Raiz ($\mu\text{g kg}^{-1}$)	[Hg] Aéreo ($\mu\text{g kg}^{-1}$)	[Hg] Solo ($\mu\text{g kg}^{-1}$)
Amaranthaceae	<i>A. tenella</i>	19,4 ^{aA}	12,1 ^{aA}	81,0 ^{aB}
Asteraceae	<i>C. bonariensis</i>	22,5 ^{aA}	30,7 ^{aA}	107,0 ^{aB}
	<i>E. sonchifolia</i>	51,0 ^{bA}	52,1 ^{bA}	99,8 ^{aA}
	<i>P. clematidea</i>	15,7 ^{aA}	24,0 ^{aA}	42,2 ^{aA}
	<i>T. procumbens</i>	51,5 ^{bA}	27,4 ^{aA}	108,8 ^{aB}
Cyperaceae	<i>C. aggregatus</i>	69,7 ^{bA}	44,4 ^{bA}	90,3 ^{aA}
Euphorbiaceae	<i>E. hirta</i>	16,5 ^{aA}	25,3 ^{aA}	127,7 ^{aB}
	<i>E. hyssopifolia</i>	24,5 ^{aA}	18,8 ^{aA}	85,7 ^{aB}
Fabaceae	<i>M. pudica</i>	81,3 ^{bA}	94,2 ^{bA}	88,2 ^{aA}
Poaceae	<i>C. echinatus</i>	89,8 ^{bB}	16,8 ^{aA}	111,2 ^{aB}
	<i>C. barbata</i>	68,7 ^{bA}	30,7 ^{aA}	125,9 ^{aB}
	<i>D. ciliaris</i>	66,3 ^{bB}	16,4 ^{aA}	86,6 ^{aB}
	<i>E. indica</i>	38,2 ^{aA}	26,2 ^{aA}	58,9 ^{aA}
	<i>P. dichotomiflorum</i>	125,9 ^{bB}	35,7 ^{aA}	113,2 ^{aB}
Rubiaceae	<i>Borreria capitata</i>	17,1 ^{aA}	50,9 ^{bB}	79,6 ^{aB}
	<i>Mitracarpus hirtus</i>	45,0 ^{bA}	14,9 ^{aA}	109,7 ^{aB}
Média		50,2 ± 31,9	32,5 ± 20,5	94,7 ± 23,0

Obs: Letras minúsculas iguais indicam que não existe diferença significativa ($p < 0,05$) nas médias que estão na mesma coluna enquanto letras maiúsculas iguais indicam que não existe diferença significativa nas médias que estão na mesma linha.

Observa-se que as concentrações ficaram abaixo do limite de quantificação do método nas amostras de raízes e partes aéreas de *Alternanthera tenella* Colla., *Praxelis clematidea* (Griseb.) R.M.King & H. Rob, *E. hirta* e *Euphorbia hyssopifolia*, assim como, nas raízes de *B. capitata* e nas partes aéreas de *C. echinatus*, *D. ciliaris* e *M. hirtus* (Tabela 2).

Os resultados mostram que a concentração média de Hg no solo foi homogênea, com média de $94,7 \pm 23,0 \mu\text{g kg}^{-1}$, sem diferença significativa entre os diferentes pontos de coleta (Tabela 2). A concentração média de Hg encontrada nas raízes foi de $50,19 \pm 31,9 \mu\text{g kg}^{-1}$, com dois grupos significativamente distintos, o primeiro, com amplitude variando de abaixo do limite de detecção até a concentração de $38,2 \mu\text{g kg}^{-1}$, e, o segundo, com concentrações que variaram de 45 a $125,9 \mu\text{g kg}^{-1}$, contemplando *E. sonchifolia*, *T. procumbens*, *C. aggregatus*, *Mimosa pudica* L., *C. echinatus*, *C. barbata*, *D. ciliaris* e *M. hirtus*, com destaque para *Panicum dichotomiflorum* Michx., que apresentou a maior concentração média (Tabela 2).

Da mesma forma que nas raízes, a concentração de Hg encontrada nas partes aéreas apresentou dois grupos significativamente distintos, o primeiro com concentrações de Hg que variaram de acima do limite de detecção até $35,7 \mu\text{g kg}^{-1}$, agregando a maioria das espécies e, o segundo, cujas concentrações variaram de $44,4 \mu\text{g kg}^{-1}$ a $94,2 \mu\text{g kg}^{-1}$ formado somente por *E. sonchifolia*, *C. aggregatus*, *M. pudica* e *B. capitata* (Tabela 2)

Fatores de translocação, bioacumulação e bioconcentração

Os valores médios dos fatores TF, BAF e BCF podem ser observados na Figura 3. Observa-se que a maioria das plantas apresentaram os fatores com valores abaixo de um, indicando que plantas com fatores acima de um são exceções. Seis espécies apresentaram TF maiores que 1, apenas uma apresentou BAF maior que 1 e uma teve o BCF maior que 1

Os valores médios de TF obtidos entre as espécies analisadas podem ser observados na Tabela 3, e permitem a distinção de três grupos. O primeiro, com o TF variando entre 0,21 e 0,93, que engloba 10 das 16 espécies estudadas, o segundo agrupamento, apresenta valores de TF superiores a 1,0 (1,20 a 1,84), formado por *Conyza bonariensis* L., *E. sonchifolia*, *P. clematidea*, *E. hirta* e *M. pudica*. O terceiro grupo, com o maior valor de TF é constituído apenas pela *B. capitata* (TF = 3,04) (Tabela 3).

Os resultados do BAF evidenciam a formação de dois grupos de plantas estatisticamente distintos. O primeiro abrange 10 espécies, com valores de BAF entre 0,14 e 0,35 (Tabela 3). O segundo agrupamento apresenta BAF variando entre 0,49 e 1,09, com

destaque para *M. pudica*, que apresentou o maior BAF dentre todas as espécies analisadas (Tabela 3).

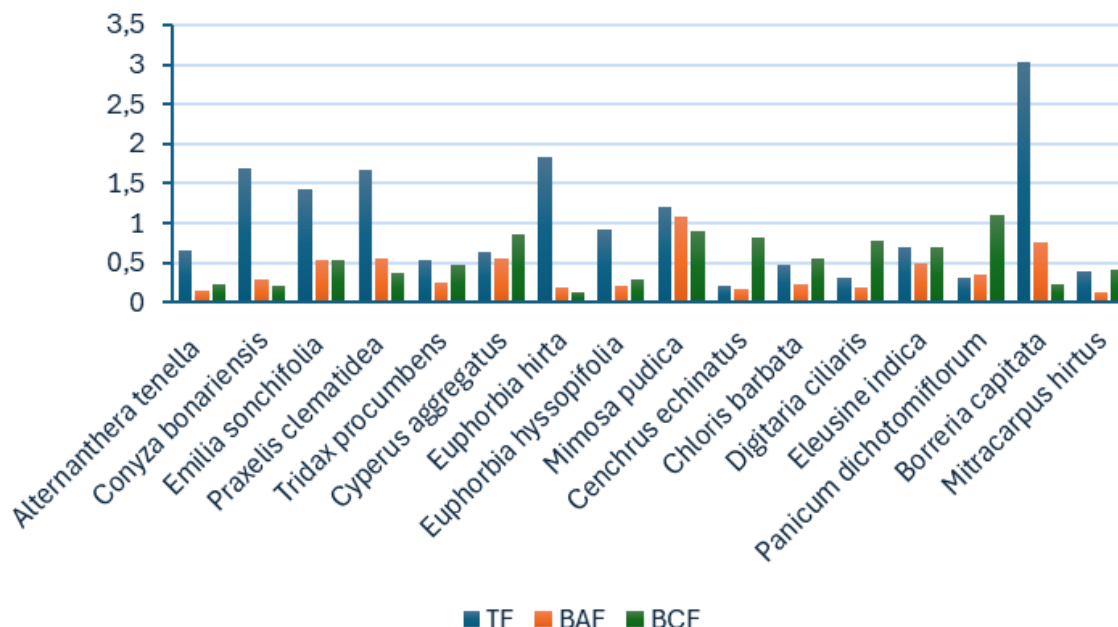


Figura 3 – Valores de TF, BAF e BCF para as 16 plantas de maior ocorrência, em relação ao número de espécimens coletados.

Tabela 3. Fatores de translocação, bioconcentração e bioacumulação obtidos para as espécies que apresentaram ocorrência em mais de 10% dos pontos de coleta no perímetro urbano de Sinop, Mato Grosso

Família	Espécie	TF	BAF	BCF
Amaranthaceae	<i>A. tenella</i>	0,66 a	0,15 a	0,24 a
	<i>C. bonariensis</i>	1,69 b	0,29 a	0,22 a
Asteraceae	<i>E. sonchifolia</i>	1,42 b	0,54 b	0,53 b
	<i>P. clematidea</i>	1,68 b	0,55 b	0,37 b
	<i>T. procumbens</i>	0,54 a	0,25 a	0,47b
	<i>C. aggregatus</i>	0,63 a	0,56 b	0,87 c
Cyperaceae	<i>C. aggregatus</i>	0,63 a	0,56 b	0,87 c
Euphorbiaceae	<i>E. hirta</i>	1,84 b	0,20 a	0,13 a
	<i>E. hyssopifolia</i>	0,93 a	0,22 a	0,29 a
Fabaceae	<i>M. pudica</i>	1,20 b	1,09 b	0,91 c
Poaceae	<i>C. echinatus</i>	0,21 a	0,17 a	0,81 c
	<i>C. barbata</i>	0,48 a	0,24 a	0,55 c
	<i>D. ciliaris</i>	0,31 a	0,20 a	0,77 c
	<i>E. indica</i>	0,69 a	0,49 b	0,69 c
	<i>P. dichotomiflorum</i>	0,32 a	0,35 a	1,11 c
Rubiaceae	<i>B. capitata</i>	3,04 c	0,76 b	0,23 a
	<i>M. hirtus</i>	0,39 a	0,14 a	0,42 b

Obs: Letras minúsculas iguais indicam que não existem diferenças significativas ($p < 0,05$) nas médias que estão na mesma coluna.

Em relação ao BCF, pode-se inferir que três agrupamentos de plantas são estatisticamente distintos. No primeiro, constituído por cinco espécies, os valores de BCF

variaram de 0,13 a 0,29, enquanto no segundo grupo, com quatro espécies, os valores oscilaram entre 0,37 e 0,53. O terceiro agrupamento, possui sete espécies com valores de BCF mais altos, variando entre 0,55 e 1,11, com destaque para *P. dichotomiflorum* a única a apresentar BCF superior a 1,0 (Tabela 3).

DISCUSSÃO

O potencial uso de plantas para a remediação de solos contaminados por Hg compreende uma promissora área de estudo (e.g. Oliveira et al. 2024; Bell 2023). Algumas características são importantes para que a planta seja considerada uma boa fitorremediadora de metais, sendo os fatores de translocação, bioconcentração e bioacumulação fortes indicadores para detectar se a planta tem seu lugar na fitorremediação de metais (Yoon et al., 2006; Lam et al., 2017; Raj et al., 2020).



Figura 4- Espécies com maior potencial para fitorremediação: (A) *B. capitata*; (B) *E. hirta*; (C) *M. pudica* ..; (D) *E. sonchifolia* ; (E) *P. dichotomiflorum*; (F) *P. clematidea*; (G) *C. bonariensis*; (Disponível em <https://identify.plantnet.org>)

Dentre as 16 espécies de plantas pioneiras analisadas neste estudo, evidenciou-se que *M. pudica* (Fabaceae, Tabela 3) se destaca pelo potencial de bioacumulação, conforme os valores apresentados para TF e BAF. Dentre as demais espécies estudadas, resultados promissores também foram obtidos pelo menos para um dos fatores avaliados para *C. bonariensis*, *E. sonchifolia*, *P. clematidea*, *Euphorbia hirta*, *B. capitata* e *P. dichotomiflorum* (Figura 4).

M. pudica é uma erva nativa (Figura 4.c), muito conhecida como “não me toque”, e foi a única planta, neste estudo, a apresentar os fatores TF e BAF maiores que um, evidenciando que possui potencial para fitorremediar Hg do solo, apesar de não serem encontrados registros na literatura para esse fim. Ramadhan et al. (2021) salientam que esta planta não tinha sido estudada para absorver metais de água, entretanto mostrou-se eficiente na absorção de cromo de resíduos da indústria têxtil, por meio da aplicação de seu extrato. Estudos que avaliem o desenvolvimento vegetativo na presença de maiores concentrações de Hg, devem ser executados, considerando o indicativo obtido neste estudo. As Fabaceae apresentam cerca de 20.000 espécies catalogadas no mundo (Flora do Brasil, 2020), e desempenham funções importantes como a fixação de nitrogênio no ecossistema terrestre. Zhao et al. (2021) destacam que essa é a terceira maior família de Angiospermas.

De maneira geral, as espécies vegetais precisam apresentar algumas particularidades para serem consideradas boas fitorremediadoras, como possuir capacidade de acumulação, ter tolerância a metais e metalóides, apresentar biomassa alta e de rápido crescimento, ser repulsiva para os herbívoros, apresentar valores de TF, BAF e BCF superiores a 1,0, bem como sistema radicular tributado e altamente ramificado, seja fácil de cultivar e colher e com ampla distribuição geográfica (Nguyen et al., 2011).

O Brasil é considerado um país com alto grau de diversificação de plantas, principalmente, espécies tropicais (e.g. Paula et al., 2018). Famílias de plantas nativas são abundantes e muitas espécies e suas aplicações já são citadas em estudos de grande importância. Zhao et al. (2020) constataram que as Asteraceae e Poaceae são as mais estudadas com potencial para fitorremediação. Estas mesmas famílias corresponderam às mais frequentes em estudos realizados por Moraes et al. (2017) e Menezes et al. (2019) e Randrianarimanana et al. (2023).

Neste estudo pode-se citar Poaceae, com 65 exemplares coletados, sendo a mais representativa (39,8% dos 166 exemplares estudados). As Poaceae são consideradas ervas nativas, com substrato terrestre (Flora do Brasil, 2020). Neste estudo foram registradas 13 espécies, sendo *C. echinatus*, a mais abundante, encontrada em 47,5% dos pontos de coleta,

representando 11,5% dos espécimes coletados, entretanto apresentou os fatores TF, BAF e BCF menores que um, assim como as demais espécies estudadas nesta família, com exceção de *P. dichotomiflorum* que apresentou BCF de 1,11, mostrando ser útil para acumular Hg nas raízes, evidenciando um mecanismo de defesa da planta para evitar que o Hg atinja os tecidos aéreos.

C. echinatus é muito abundante e de fácil acesso, entretanto, como apresentou TF, BAF e BCF < 1, *a priori*, não demonstrou potencial para a fitorremediação de Hg do solo, porém é citada como uma espécie que possui interação com o cromo, considerando as concentrações detectadas em caule e raízes (Nazareno e Buot, 2015) e precisa ser melhor avaliada quanto ao uso na fitorremediação usando maiores concentrações de Hg no substrato. *P. dichotomiflorum* (Figura 4.e), de acordo com Flora do Brasil (2020), é uma erva nativa, sendo encontrada no solo e nas águas, com grande ocorrência nas Américas. Tem preferência por lugares abertos e úmidos (Baek et al, 2024). É uma planta utilizada para vários fins, suas sementes servindo de alimento, seu caule e folhas utilizados na área da indústria de papel e alimento para animais, além de apresentar funções contra inflamação e tumores (Baek et al., 2024).

A espécie *Eleusine indica* (L.) Gaertn não evidenciou potencial de fitorremediação de mercúrio, entretanto, Wang e Zhang (2020) registraram elevado teor de Al em suas raízes. Em relação à parte aérea das plantas, as maiores concentrações foram registrados para a família Caryophyllaceae na espécie *Cerastium glomeratum* Thuill., em Fabaceae, na espécie *Cassia tora* L, em Poaceae na espécie *E. indica* e para a família Euphorbiaceae, na espécie *E. hirta*, porém, nem sempre as maiores concentrações resultaram em fatores maiores que um. Wang e Zhang (2020) também concluíram que *E. indica* consegue se manter viva e acumular altos teores de Zn e Mn. Dessa maneira, estudos mais aprofundados com essa espécie precisam ser executados usando maiores concentrações de Hg no substrato. *C. barbata* e *D. ciliaris* não evidenciaram potencial para a fitorremediação de mercúrio.

Grande riqueza de espécies também foi verificada para Asteraceae, que foi a segunda mais abundante nos pontos de coleta visitados no perímetro urbano de Sinop. A elevada ocorrência dessa família está associada ao fato de as espécies serem, frequentemente, ervas de origem nativa, geralmente terrestres, com distribuição por todo o território brasileiro (Flora do Brasil, 2020). Estudos evidenciam as Asteraceae como potentes acumuladoras de metais pesados (Guerra Sierra, Muñoz Guerrero E Sokolski, 2021; Ramua et al., 2022). As Asteraceae apresentam, geralmente, facilidade de produção, disseminação de sementes e crescem rapidamente, caracterizando-se como boas fitorremediadoras e indicadoras da

presença de metais no ambiente. Entretanto, algumas espécies como *Lactuca sativa* L. podem apresentar sinais de estresse oxidativo (Vargas Aguirre et al., 2018).

Dentre as Asteraceae analisadas neste estudo, observou-se que *C. bonariensis* (Figura 4.c) apresentou $TF > 1$ e BAF e $BCF < 1$. Trata-se de uma espécie subarborescente terrestre, com ciclo de vida anual, e nativa do Brasil (Flora do Brasil, 2020), caracterizada como sendo de fácil disseminação por sementes (Silva et al., 2008; Amaral et al., 2020). Essa espécie pode ser localizada em 70 países, conseguem se espalhar facilmente por produzirem muitas sementes. Pazdiora et al. (2018) destacaram que são produzidas cerca de duzentas mil sementes por planta, ampliando sua capacidade de dispersão em um raio de cem quilômetros. É uma planta resistente a herbicidas, possui um mecanismo de ação interno protetor que evita a translocação do veneno (Qasem et al., 2023). Al-Sallami, Shalabi e Fouda (2021) observaram que o extrato de *C. bonariensis* pode inibir significativamente a corrosão do aço carbono, porém, não foram encontrados na literatura estudos sobre a fitorremediação de solos para esta espécie..

Outras Asteraceae avaliadas no estudo são *E. sonchifolia* (Figura 4.d) e *T. procumbens*. *E. sonchifolia* é abundante, de fácil acesso, com propriedades medicinais, usada há muito tempo pelos índios que a consideram uma planta sagrada. É comestível e usada para tratamento de cortes, feridas, diarreia, asma e entre outros, tendo atividade que inibem a inflamação e o desenvolvimento de tumores (Shylesh e Padikkala, 2000). A espécie *Emilia fosbergii* da mesma família e gênero de *E. sonchifolia*, foi estudada por Oliveira et al. (2024), que relatam o potencial dessa planta como fitorremediadora de solos contaminados por Hg, evidenciando que, quanto maior a quantidade de metal no substrato, maior o acúmulo apresentado pela planta, sem considerações visíveis de toxicidade (Oliveira et al., 2024).

E. sonchifolia, conhecida como serralhinha, avaliada neste estudo, também mostrou ter potencial de fitorremediação, apresentando TF de 1,42, mostrando a capacidade da planta em translocar metal das raízes para a parte aérea, entretanto, com BAF e BCF menores que um. Os fatores BAF e BCF precisam ser estudados em maiores concentrações de Hg no substrato para uma avaliação mais precisa destes valores, uma vez que Oliveira et al. (2024), mostraram que estes valores podem aumentar com o aumento da concentração de Hg no substrato.

A espécie *T. procumbens* conhecida como erva de touro, é uma planta de crescimento anual, originária da América tropical, e disseminada em outras áreas tropicais e subtropicais do mundo, representando ser tolerante a tempos secos, calor e poluição (Policegoudra, 2014). Govarthanan et al. (2016) relataram que essa espécie é facilmente reproduzida, e consegue absorver metais como Cr, Cu, Ni, Pb e Cd de solos contaminados por resíduos industriais. O

estudo revelou que acrescentando bactérias específicas à planta, ela consegue absorver os metais sem prejudicar sua funcionalidade, agindo como hospedeira sem interferir no seu desenvolvimento. A bactéria endofítica *Paenibacillus* sp. RM isolada com cepas muito resistentes foram isoladas nas raízes que quando submetidas a metais como Cu, Pb, Zn e As, apresentaram alta taxa de remoção desses metais do solo (Govarthanan et al., 2016), entretanto, neste estudo apresentou TF, BAF e BCF menores que um, reforçando a necessidade de estudá-la com maiores concentrações de metal no substrato para concluir a análise do seu potencial para fitorremediar solos contaminados por Hg.

P. clematidea (Figura 4.f), também da família Asteraceae, apresentou TF de 1,68, com os fatores BAF e BCF < 1, assim como observado para *E. sonchifolia* e *C. bonariensis*, confirmando que diversas plantas desta família têm potencial para uso na fitorremediação de solos contaminados por Hg. Não foram encontrados registros do uso de *P. clematidea* para a fitorremediação de Hg no solo, entretanto, Wei et al. (2018) observaram que a planta é capaz de acumular cádmio nas raízes, e de translocar este metal para as folhas, confirmando o potencial desta espécie para a fitorremediação de solos contaminados por metais.

Dentre as Rubiaceae foram registradas quatro espécies, sendo a *B. capitata* (Tabela 1) a mais abundante. As Rubiaceae são, em sua maioria, caracterizadas como ervas nativas arbustivas e subarbustivas (Nepomuceno et al., 2018). *B. capitata* apresentou TF maior que 1 (3,04), indicando ser uma possível planta fitorremediadora do Hg do solo, fato inédito na literatura para esta planta, considerando que não existem estudo sobre seu uso na fitorremediação de solos contaminados por metais.

Alternanthera tenella (Amaranthaceae) tem preferência por ambientes mais chuvosos (SILVA et al. 2015), apresenta grande produção de biomassa e consegue acumular metais como cádmio, em pequenas quantidades (Rossini et al. 2022). Neste mesmo estudo, verificou-se que quando submetidas aos experimentos *in vitro*, com grandes quantidades de cádmio, seu desenvolvimento é afetado, refletindo na redução de crescimento de folhas e caule, diminuição no número de estômatos, alterando a absorção de nutrientes (Rossini et al. 2022). Essa espécie não foi estudada em relação a biacumulação de mercúrio, entretanto, é conhecido seu potencial em acumular As, Cd e Pb (Jose, 2021) e, portanto, também precisa ser estudada em maiores concentrações de Hg no substrato para avaliar seu verdadeiro potencial na fitorremediação de solos.

As Euphorbiaceae caracterizam-se por apresentarem rápida e fácil adaptação, não necessitando de lugares específicos para sua sobrevivência, o que as tornam úteis para a programas de fitorremediação, desde que sejam capazes de suportar a contaminação (e.g.

Eljounaidi e Lichman, 2020). Neste estudo *E. hirta* apresentou $TF > 1$. Essa planta é uma herbácea frequentemente usada como medicinal (Iskandar et al., 2021; De e Sharma, 2023).

Investigação realizada por Wang e Zhang (2020) em área de mineração de bauxita cárstica mostrou que *E. hirta* pode ser bioindicadora da contaminação por metais, pois a planta consegue se desenvolver e ter grande tolerância à contaminação por metais do solo, principalmente, Al, Fe, Cu, Mn e Zn. Além dessa espécie, Wang e Zhang (2020) encontraram outras plantas que cresciam no ambiente de mineração representando as Poaceae, Cryophyllaceae, Malvaceae, Verbenaceae, Fabaceae, Polygonaceae, Dipterocarpaceae, Laminaceae, Asteraceae e Euphorbiaceae. Mukhopadhyay et al. (2017) registrou situação similar, e identificou, dentre 29 espécies estudadas, algumas que se mostraram tolerantes a metais. Não existem registros de estudos usando *E. hirta* na fitorremediação de Hg do solo, entretanto os estudo de Wang e Zhang (2020) e de Mukhopadhyay et al. (2017), corroboram que a espécies pode fitorremediar a poluição do solo por metais.

CONCLUSÃO

A fitorremediação com uso de plantas pioneiras vem se tornando cada vez maior, pois com baixo custo e facilidade de manuseio, sua eficácia em conseguir absorver mercúrio do solo se torna um método indispensável e importante para esse problema mundial. Dentre as 16 espécies de plantas pioneiras analisadas neste estudo, evidenciou-se que *M. pudica* (Fabaceae) se destaca pelo potencial de bioacumulação, conforme os valores apresentados para TF e BAF. Dentre as demais espécies, resultados promissores também foram obtidos pelo menos para pelo menos um dos fatores avaliados para as espécies *C. bonariensis*, *E. sonchifolia*, *P. clematidea*, *Euphorbia hirta*, *B. capitata* e *P. dichotomiflorum*, sendo indicado o uso dessas espécies na fitorremediação de solos contaminados por Hg. Entretanto, estudos com maiores concentrações de Hg no solo precisam ser realizados para a avaliação do desenvolvimento vegetativo e da tolerância das espécies ao metal.

As espécies *C. echinatus*, *E. indica* e *T. procubens*, apesar de apresentarem os os fatores TF, BAF e BCF menores que um, precisam ser estudadas com mais profundidade em condições laboratoriais usando maiores concentrações de Hg no substrato, considerando que outros estudos mostraram a capacidade destas espécies em acumular metais no substrato, mas não apresentaram dados sobre a acumulação de Hg. Assim, 10 espécies das 41 estudadas apresentam potencial para a fitorremediação de solos contaminados por metais, evidenciando que a maioria das espécies tende a excluir o Hg do solo, evitando a sua acumulação.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Akagi H, Nishimura H (1991) Speciation of Mercury in the Environment. In: Suzuki, T., Imura, N., Clarkson, T.W. (eds) *Advances in Mercury Toxicology*. Rochester Series on Env Toxi. Springer, Boston, MA. https://doi.org/10.1007/978-1-4757-9071-9_3
- Al-Sallami KJ, SHalabi K, Fouda AS (2021) Impact of *Conyza bonariensis* extract on the corrosion protection of carbon steel in 2 M HCl solution. *Int Jo of El Scien* 16, Id: 210929. <http://www.electrochemsci.org>. doi: 10.20964/2021.09.40
- Amaral GS, De Prado R, Carvalho LB, Alcântara-da-Cruz R, Costa FR, Coelho CMM (2020) Stressful conditions affect the seed quality in glyphosate-resistant *Conyza bonariensis* (L) Agr. 10:1706. <https://doi.org/10.3390/agronomia10111706>
- Bank M (2020) The mercury science-policy interface: History, evolution and progress of the MinamataConvention.ScieofThe Tot Envir722:137-832. doi :10.1016/j.scitotenv.2020.137832
- Baek EB, Hong Eun-Ju, Kim Ji-Hye, Kim Min, Ahn Jongyoon, KWun Hae-jin (2024) Protective Effect of *Panicum dichotomiflorum* in a Rodent Model of Testosterone-Induced Benign Prostatic Hyperplasia. *SciPharm* 92:13.<https://doi.org/10.3390/scipharm92010013>
- Bell MG, Zimmerer KS, Tinoco OSR (2023) Following the Water Uphill? The Spread of Blueberry Cultivation to the Mountains of Áncash, Peru=¿ Siguiendo el agua cuesta arriba? La expansión del cultivo del arándano en la sierra de Áncash, Perú. *Journ of Lat Amer Geogr* 22(1), 156-166. Doi: <https://doi.org/10.1353/lag.0.0195>
- Casagrande GCR, Franco DND, Moreno MIC, Andrade EA, Battirola LD, De Andrade RLT (2020) Assessment of atmospheric mercury deposition in the vicinity of artisanal and small-scale gold mines using glycine max as bioindicators. *Wat Ai So Poll* 234:14. <https://doi.org/10.1007/s11270-020-04918-y>.
- Climate-Data Org Clima Sinop. Disponível em: <<https://pt.climate-data.org/america-do-sul/brasil/mato-grosso/sinop-4077/>>
- Chaulya SK, Tripathi Nimisha, Mandal KK, Singh RS (2011) Assessment of coal mine road dust properties for controlling air pollution. *Int Jo of Env Prot, Int J M Amb Prot*, 1(2):1-7. <https://www.researchgate.net/publication/264856611>
- Choudhary SP, Bhardwaj R, Gupta BD, Dutt P, Gupta RK, Kanwar M, Dutt, P (2010) Changes induced by Cu²⁺ and Cr⁶⁺ metal stress in polyamines, auxins, abscisic acid titers and antioxidative enzymes activities of radish seedlings. *Braz. J. Plant Physiol*, 22(4), 263-270. <https://doi.org/10.1590/S1677-04202010000400006>
- De M, Sharma LA (2023) Comparative physico-chemical, phytochemical, and spectroscopic analysis of two medicinal plants belonging to the Euphorbiaceae family: *Acalypha indica* L. and *Euphorbia hirta* L. growing in Paschim Medinipur district, West Bengal, India. *Inter Jour of Experi Rese and Revi*, 32:206-215. <https://doi.org/10.52756/ijerr.2023.v32.018>

Devi Chinmayee M, Swapna TS (2022) Weed plants: A boon for remediation of heavy metal contaminated soil. In: Kumar V, Shah MP, Shahi SK (Eds) Phytoremediation Technology for the Removal of Heavy Metals and Other Contaminants from Soil and Water. Else. 127-141. ISBN 9780323857635. DOI: 10.1016/B978-0-323-85763-5.00010-6.

Eljounaidi K, Lichman BR (2020) Nature's Chemists: The Discovery and Engineering of Phytochemical Biosynthesis. Front Chem. Nov 9;8:596479. doi: 10.3389/fchem.2020.596479. PMID: 33240856; PMCID: PMC7680914

Ferreira DF (2010) Sisvar - Sistema de análise de variância. (ed) 5 3 Lavras-MG, UFLA.

Fonseca JCL, Marchi MRR, Fonseca JCL (2000) Substâncias Químicas Perigosas à Saúde e ao Ambiente. Prog Inter de Segur Quím, Organização Mundial da Saúde. CDD: 363.11. CDU: 614.8.086.4

Girdhar M, Sharma NR, Rehman H, Kumar A, Mohan A (2014) Comparative evaluation of hyperaccumulation and phytoremediation capacity of three wild weeds. Biotech 4:579-589. DOI: 10.1007/s13205-014-0194-0

Govarthanan M, Mythili R, Selvankumar T, Kamala-Kannan S, Rajasekar A, Chang YC (2016) Bioremediation of heavy metals using an endophytic bacterium *Paenibacillus* sp. RM isolated from the roots of *Tridax procumbens*. 3 Biotech. Dec;6(2):242. doi: 10.1007/s13205-016-0560-1

Guerra Sierra B.E, Muñoz Guerrero J, Sokolski S (2021) Phytoremediation of heavy metals in tropical soils: an overview. *Sustain* 13:2574. <https://doi.org/10.3390/su13052574>

Iskandar Benni, Lukman Anita, Syaputra Sandika, Al-abrori Ucy NH, Surboyono Meircurius DC, Lee Ching-Kuo (2021) Formulation, characteristics and anti-bacterial effects of *Euphorbia hirta* L. mouthwash. *Jou of Tai Univ Medi Scie* 17(2):271282. DOI: 10.1016/j.jtum.2021.08.009

Jambhulkar HP, Juwarkar AA (2009) Assessment of bioaccumulation of heavy metals by different plant species grown on fly ash dump. *Ecotox and Envi Safe* 72(4):1122-1128. doi: 10.1016/j.ecoenv.2008.11.002

Jardim Botânico do Rio de Janeiro (2020) Flora do Brasil em construção. Disponível em: <http://floradobrasil.jbrj.gov.br/consulta/>

Jose Neetha (2021) Comparative Study of Heavy metals accumulation by Plants belongs to Amaranthaceae family. *Inter Adva Rese Jour in Scie, Engi and Tech*, 8(2):117. DOI: 10.17148/IARJSET.2021.81221. Available at: <https://iarjset.com>

Khan A, Khan S, Khan Ma (2015) Heavy metals uptake and bioaccumulation by edible plants, their effects on plant nutrients and associated health risks: a review. *Envir Scie and Pollu Rese* 22:13772–13799. DOI: 10.1007/s11356-015-4881-0

Lam EJ, Cánovas M, Gálvez ME, Montofré ÍL, Keith BF, Faz Ángel (2017) Evaluation of the phytoremediation potential of native plants growing on a copper mine tailing in northern Chile. *Jou of GeoExplo* 182:210-17. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2017.06.015>

Lyman SN, Cheng I, Gratz LE, Weiss-Penzias P, Zhang L (2020) An updated review of atmospheric mercury. *Sci Total Environ* 10;707:135575. doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.135575. Epub 2019 Nov 20. PMID: 31784172.

Malik DS, Maurya PK (2014) Concentration of heavy metals in water, sediments, and tissues of fish species (*Heteropneustis fossilis* and *Puntius ticto*) from the Kali River, India. *ToxiEnviChem* 96(8):1195-206. DOI:10.1080/02772248.2015.1015296

Menezes PHS, Albuquerque JAA, Smiderle JO, Medeiros RD, Alves JMA, Gianluppi D (2019) Occurrence of weeds in areas submitted to tillage managements for soybean cultivation in the Cerrado of Roraima. *Plan dan* 37. e019193014. DOI: 10.1590/S0100-83582019370100079

Moraes RP, Carvalho WAC, Pereira JAA, Nascimento GO, Barros DA (2017) Effect of topsoil stockpiling on the viability of seed bank in field phytophysiological fields of altitude. *CER* 23(3):339-347. DOI: 10.1590/01047760201723032340

Mukhopadhyay S, Rana V, Kumar A, Maiti SK (2017) Biodiversity variability and metal accumulation strategies in plants spontaneously inhabiting fly ash lagoon, India. *Envir Sci and Pollu Rese*. <https://doi.org/10.1007/s11356-017-9930-4>

Nazareno PAG, Buot IE Jr (2015) The response of plants growing in a landfill in the Philippines towards cadmium and chromium and its implications for future remediation of metal-contaminated soils. *Jour of Ecol and Envir* 38(2):123-131. DOI: <http://dx.doi.org/10.5141/ecoenv.2015.014>

Nepomuceno FÁA, Souza EB, Nepomuceno IV, Miguel LM, Cabral EL, Loiola MIB (2018) O gênero *Borreria* (Spermacoceae, Rubiaceae) no estado do Ceará, Brasil. *Rodrig* 69(2):715-731. Disponível em: DOI: 10.1590/2175-7860201869232

Nguyen Thi Hoang Haa, Masayuki Sakakibara, Sakae Sano, Mai Trong Nhuan (2011) Absorption of metals and metalloids by plants growing in a lead-zinc mine area, Northern Vietnam. *Jour of Haza Mate* 186:1384–1391. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2010.12.020

Nurjaya W, Ardiansyah W, Syofyan Y (2023) Analysis of Ambient Air Mercury Levels in The Mercury Laboratory and Metrology Centre for Environmental Quality Instrumentation Standardization. In: *IOP Conf. Series: Ear and Envi Sci* 1203:012013. IOP Publishing. DOI: 10.1088/1755-1315/1203/1/012013.

Oliveira EA, Silva LC, Andrade EA, Battistola LD, Andrade RLT (2024) *Emilia fosbergii* Nicolson, a novel and effective accumulator for phytoremediation of mercury-contaminated soils. *Internat Jou of Phytor* 26(7):1076–1086. DOI: 10.1080/15226514.2023.2288906

Paula CC, Martins DTO, Arunachalam K, Balogun SO, Borges QI, Picone MG, Barros WM, Prado RMS (2018) Antimicrobial Screening of Medicinal Plants Commonly Used in Mato Grosso for Infection Treatment: Advances in the Evaluation of in vitro and in vivo Antibacterial Activities of *Conyza bonariensis* (L.) Cronquist. *Pharm J* 10(6) s152-s166. DOI: 10.5530/pj.2018.6s.28

Pazdiora PC, Piasecki C, Dorneles KR, Agostinetto D, Vargas L, Dallagnol LJ (2018) Glyphosate-resistant *Conyza bonariensis* is susceptible to powdery mildew caused by *Podosphaera erigerontis-canadensis*. Plant Dise, St. Paul 102(2):448-453. <https://doi.org/10.1094/PDIS-05-18-0732-PDN>

Policegoudra RS, Chattopadhyay P, Aradhya SM, Shivaswamy R, Singh L, Veer V (2014) Inhibitory effect of *Tridax procumbens* against human skin pathogens, Jour of Herb Medicine, 4(2) : 83-88, ISSN 2210-8033, <https://doi.org/10.1016/j.hermed.2014.01.004>.

Qasem Jr, Alfalahi A, Alsubeie MS, Almehemdi Af, Synowiec A (2023) Genetic variations among flea (*Conyza bonariensis* (L.) Cronquist) populations in Jordan and their susceptibility levels to contact herbicides. Agric 13:435. <https://doi.org/10.3390/agriculture13020435>

Raj D, Kumar A, Maiti SK (2020) Mercury remediation potential of *Brassica juncea* (L.) Czern. for cleanup of flyash contaminated sites. Chemo 248:125857.DOI: 10.1016/j.chemosp here.2020.125857

Ramadhan Yanuar, Sabrina Aida, Kwartiningsih Endang (2021) Biosorption of Chromium from Textile Wastewater Using *Mimosa pudica* Tannin Gel. Equili Jou of Chem Engi 5:51.<https://doi.org/10.20961/equilibrium.v5i1.54012>

Ramua YL, Jagadeesha K, Shivalingaswamy T, Raghu A, Ramegowda M (2022) Effect of inter-molecular hydrogen bond on ESIHT in 2, 2'-dihydroxychalcone. Egy Jou of Chem 65(5):131-138.<https://doi.org/10.21608/EJCHEM.2021.94010.4428>

Randrianarimanana NFH, Rakotomalala NH, Mackinnon L, Rakotoarinivo M, Randriamampianina Jean-Augustin, Ralimanana Hélène, Ryan P, Vorontsova MS (2023) Local perceptions of the benefits versus negative impacts of weedy grasses in central Madagascar, with a focus on the genus *Digitaria*. Plan Peo Plan 6:710728. <https://doi.org/10.1002/ppp3.10495>.

Rehman AU et al (2021) Toxicity of heavy metals in plants and animals and their uptake by magnetic iron oxide nanoparticles. J. Mol. Liq 321:114455.DOI: 10.1016/j.molliq.2020.114455.

Rossini FP, Martins JPR, Moreira SW, et al (2022) In vitro morphophysiological responses of *Alternanthera tenella* colla (Amaranthaceae) to stress induced by cadmium and the attenuating action of silicon. Plant Cell Tiss Organ Cult 150:223–236. <https://doi.org/10.1007/s11240-022-02263-y>

Seccatore Jacopo, Veiga Marcello, Origliasso Chiara, Marin Tatiane, DE Tomi Giorgio (2014) An estimation of the artisanal small-scale production of gold in the world. Scie of The Tot Envir 496:662-667. ISSN 0048-9697. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2014.05.003

Shylesh BS, Padikkala J (2000) In vitro cytotoxic and antitumor property of *Emilia sonchifolia* (L.) DC in mice. .Jou of Ethno 73:495-500. [https://doi.org/10.1016/S0378-8741\(00\)00317-2](https://doi.org/10.1016/S0378-8741(00)00317-2)

Silva Ana Maria Alves Da, Coelho Ivan Dantas, Medeiros Paulo Roberto De (2008) Levantamento florístico das plantas daninhas em um parque público de Campina Grande, Paraíba, Brasil. Rev Brasi de Bioc 21(4). <https://doi.org/10.5007/21757925.2008v21n4p7>

Silva MRM, Cantanhede JD, Correa MJP, Mesquita MLR (2015) Fitossociologia e interferência de plantas daninhas no arroz de terras altas no estado do Maranhão, nordeste do Brasil. Journ Afric de Agric 10(34):3412-3420. DOI: 10.5897/AJAR2015.9916

Souza Adilson, Mota Luan, Zamadei Tamara, Campoe Martim Charles, Almeida Frederico, Paulino J (2013) Classificação climática e balanço hídrico climatológico no estado de Mato Grosso/Climate classification and climatic water balance in Mato Grosso state. Braz Nati 01:34-43. DOI: 10.14583/2318-7670.v01n01a07

Tu C, Ma LQ, Bondada B (2002) Arsenic accumulation in the hyperaccumulator Chinese brake and its utilization potential for phytoremediation. Jour of Envir Qual 31(5):1671-1675. DOI: 10.2134/jeq2002.1671

Un Environment.N. Environment Programme, Chemicals and Health Branch. Geneva, Switzerland (2019) .Glo merc assess.ISBN: 978-92-807-3744 8. <https://www.unenvironment.org/resources/publication/global-mercury-assessment-2018>

Vargas Aguirre Carlos Fernando, Rivera Páez Fredy Arvey, Escobar Vargas Sebastián (2018) Effect of arbuscular mycorrhizae and mercury on *Lactuca sativa* (Asteraceae) seedling morpho-histology. Envir and Exper Bot 156:197-202. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2018.09.005>.

Wang DF, Zhang ZH (2020) Higher plants as bioindicators of metal contamination from abandoned karst bauxite in Shangdong, southwest China. Plant Biology 22:323-330. DOI: <https://doi.org/10.1111/plb.13062>

Wei Hui, Huang Mingyu, Quan Guoming, Zhang Jiaen, Liu Ziqiang, Ma Rui (2018) Turn bane into a boon: Application of invasive plant species to remedy soil cadmium contamination. Chemos 210:1013-1020. ISSN 0045 6535. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2018.07.129>

Windmöller CC, Santos RC, Athayde M, Palmieri HEL (2007) Distribution and speciation of mercury in sediments from gold mining sites in iron quadrangle (Minas Gerais). Quím. Nova 30(5):1088-1094. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-40422007000500007>

Yoon Joonki, Cao Xinde, Zhou Qixing, Ma Lena Q (2006) Accumulation of Pb, Cu, and Zn in native plants growing on a contaminated Florida site. Scie of The Tot Envir, 368: 456-464. ISSN 0048-9697. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2006.01.016

Zhao M, Zeng S, Liu S, Li Z, Jing L (2020) Metal accumulation by plants growing in China: capacity, synergy, and moderator effects. Ecolo Engin 148:105790. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2020.105790>

Zhao Y, Zhang R, Jiang KW, Qi J, Hu Y, Guo J, Zhu R, Zhang T, Egan AN, Yi TS, Huang C.-H, Ma H (2021) Nuclear phylotranscriptomics and phylogenomics support numerous

polyploidization events and hypotheses for the evolution of rhizobial nitrogen-fixing symbiosis in Fabaceae. *Mole Plant* 14(5):748-773. ISSN 1674-2052. <https://doi.org/10.1016/j.molp.2021.02.006>