

## POTENCIAL DO DESENVOLVIMENTO RADICULAR DE PLANTAS COMERCIAIS EM RECUPERAÇÃO DE SOLOS CONTAMINADOS COM REJEITO DE MINÉRIO

**André Soares de Castro, Marcia Braga Pereira, Laryssa Ferreira Tuelher, Leonan José Emerick Silva, Maria Luiza Zeferino Pereira, Leandro Pin Dalvi**

Universidade Federal do Espírito Santo/Centro de Ciências Agrárias e Engenharias.  
Alto Universitário. S/N – CEP: 29500-000 - Guararema. Alegre – ES. Brasil,  
andresoares1difes2014@gmail.com; marciabp25@hotmail.com; ferreiratuelher@gmail.com;  
emerickleonan@gmail.com; maluzeferino99@gmail.com; leandropin@yahoo.com.br.

### Resumo

Na fitorremediação de solos contaminados com metais pesados, espécies como mucuna preta, girassol e mostarda são promissoras devido às suas capacidades específicas. A mucuna preta ajuda a mobilizar e estabilizar metais pesados com suas raízes profundas e melhora a fertilidade do solo. O girassol, conhecido por acumular metais pesados, pode extrair contaminantes do solo de maneira eficaz, além de ter valor comercial. O milho, com seu sistema radicular vigoroso, contribui tanto para a extração de titânio quanto para a estabilização do solo. Já a mostarda, uma planta hiperacumuladora, remove rapidamente contaminantes e pode ser utilizada na rotação de culturas. Juntas, essas espécies oferecem uma solução eficiente e sustentável para a recuperação de solos contaminados, aliando remediação ambiental à viabilidade econômica.

**Palavras-chave:** Metais pesados. Contaminação. Titânio. Resíduo. Fitodegradação.

**Área do Conhecimento:** Agronomia.

### Introdução

A recuperação de solos contaminados é uma questão ambiental importante nos dias de hoje, principalmente em regiões afetadas por atividades industriais que levam à concentração de substâncias pesadas, como o rejeito de mineração. Uma das estratégias mais promissoras para reduzir esses impactos é o emprego de espécies vegetais com grande crescimento radicular. Estas plantas possuem a capacidade de absorver, armazenar e, em alguns casos, neutralizar os contaminantes presentes no solo, auxiliando em seu tratamento (Angulo, 2001).

O titânio, embora menos tóxico que outros metais pesados, pode afetar a qualidade do solo e a saúde das plantas, interferindo em processos fisiológicos vitais. Nesse contexto, a seleção de espécies vegetais com sistemas radiculares robustos e adaptáveis é crucial, pois as raízes desempenham um papel fundamental na absorção de nutrientes e na mobilização de contaminantes (Martins, 2024).

Além disso, o emprego de vegetais comerciais proporciona a vantagem extra de unir a restauração ambiental à produção de alimentos ou produtos florestais, incentivando a viabilidade econômica das regiões afetadas. Essa capacidade de restauração está ligada à seleção apropriada das plantas, que precisam ter habilidade para crescer em solos difíceis e colaborar eficazmente na diminuição da quantidade de titânio no meio ambiente (Coutinho; Barbosa, 2014).

Algumas plantas comerciais podem desenvolver tolerância ao titânio e continuar crescendo em solos contaminados. A seleção de plantas que não apenas sobrevivem, mas também prosperam em tais condições, é fundamental para o sucesso da fitorremediação.

O desenvolvimento de raízes profundas e extensas é essencial para a recuperação de solos contaminados. Raízes maiores e mais profundas podem explorar uma maior área do solo, aumentando a capacidade da planta de absorver o titânio e outros metais (INSTITUTO BRASILEIRO DE FLORESTAS, 2015).

Certas plantas têm a capacidade de absorver e acumular metais pesados, incluindo o titânio, em seus tecidos (Magalhães, 2021). Identificar e utilizar essas plantas pode ser eficaz na remoção de metais pesados de solos contaminados por rejeitos de mineração.

As raízes das plantas podem alterar o pH do solo e influenciar a microbiota presente, o que pode afetar a disponibilidade do titânio e de outros nutrientes. Isso pode melhorar a qualidade do solo a longo

prazo. O crescimento radicular também pode melhorar a estrutura do solo, aumentando sua porosidade e capacidade de retenção de água, o que é benéfico para a recuperação do solo contaminado as plantas como gramíneas, leguminosas e algumas espécies arbóreas têm sido estudadas para fitorremediação. A escolha de plantas comerciais adequadas deve considerar sua capacidade de tolerar e acumular titânio, além de sua viabilidade econômica (Accioly; Siqueira, 2000).

Utilizar plantas comerciais na recuperação de solos contaminados pode ser duplamente benéfico, pois além de remediar o solo, essas plantas podem ser colhidas e utilizadas comercialmente, criando uma fonte de renda adicional para agricultores (Tavares;Oliveira;Salgado, 2013).

Nesse processo de descontaminação do solo, são usadas diferentes espécies vegetais para remover, estabilizar ou transformar contaminantes presentes nesse solo, sendo cada espécie escolhida com base em suas características específicas. Algumas plantas comerciais se destacam nesse processo devido ao seu desenvolvimento radicular robusto e à capacidade de acumular metais pesados, como o titânio. Entre essas espécies, a mucuna preta, o girassol, o milho e a mostarda são especialmente promissoras (Andrade;Tavares;Mahler, 2007).

A mucuna preta (*mucuna aterrima*) é uma leguminosa conhecida por sua capacidade de fixar nitrogênio no solo, o que melhora a fertilidade e estrutura do solo contaminado. Além disso, suas raízes extensas e profundas ajudam na extração e estabilização de metais pesados. Em solos contaminados com titânio, a mucuna preta pode desempenhar um papel crucial na mobilização do metal, facilitando sua absorção ou imobilização, e, assim, contribuindo para a recuperação do solo.

O girassol (*Helianthus annuus*) é uma planta amplamente estudada no contexto da fitorremediação devido à sua alta capacidade de acumular metais pesados, como chumbo, cádmio e, possivelmente, titânio. Seu sistema radicular é profundo e eficiente na absorção de contaminantes, o que faz do girassol uma excelente opção para a extração de metais do solo. Além disso, o girassol possui a vantagem de ser uma planta comercialmente viável, permitindo que a área recuperada seja utilizada para a produção de óleo e outros produtos derivados.

O milho (*Zea mays*), uma das culturas mais amplamente cultivadas no mundo, possui um sistema radicular vigoroso e é capaz de crescer em uma variedade de condições de solo. Em solos contaminados com titânio, o milho pode desempenhar um papel duplo: além de contribuir para a extração do metal, suas raízes ajudam na estabilização do solo e na prevenção da dispersão de contaminantes para camadas mais profundas. A viabilidade econômica do milho também torna sua utilização em programas de fitorremediação uma escolha atraente.

A mostarda (*Brassica juncea*), é uma planta hiperacumuladora, conhecida por sua capacidade de acumular grandes quantidades de metais pesados em seus tecidos. No contexto da contaminação por titânio, a mostarda se destaca por seu rápido crescimento e por sua capacidade de remover contaminantes do solo em um curto período de tempo. Além disso, essa planta pode ser utilizada em rotação com outras culturas, o que ajuda a manter a produtividade da área enquanto o solo é recuperado.

A combinação de diferentes espécies vegetais, como mucuna preta, girassol, milho e mostarda, pode ser uma estratégia eficaz na fitorremediação de solos contaminados com titânio. Cada uma dessas espécies contribui de maneira única para a recuperação do solo, seja pela absorção direta do metal, pela melhoria das condições do solo ou pela viabilidade econômica da área. Portanto, o uso integrado dessas plantas pode oferecer uma solução sustentável e eficiente para a remediação de áreas contaminadas (SANTOS et al., 2020)

Dessa forma, o estudo do desenvolvimento radicular de plantas comerciais em solos contaminados com titânio é de grande relevância, pois pode oferecer soluções viáveis e ecologicamente corretas para a remediação de áreas degradadas, ao mesmo tempo em que valoriza o uso econômico do solo recuperado.

## Metodologia

O experimento foi conduzido em uma casa de vegetação no campus da Universidade Federal do Espírito Santo (UFES) em Alegre, situado a uma altitude de 126 metros. A região é caracterizada por um clima tropical com estações secas e chuvosas bem definidas, classificado como Cwa segundo a classificação climática de Köppen (1931), com invernos amenos e secos.

Quatro espécies vegetais foram utilizadas no estudo: mucuna preta (*Mucuna aterrima*), girassol (*Helianthus annuus*), milho (*Zea mays*) e mostarda (*Brassica juncea*). As sementes dessas espécies

foram obtidas da coleção do Laboratório de Análises Vegetais do Departamento de Agronomia do Centro de Ciências Agrárias e Engenharia (CCAUE) da UFES.

O solo empregado no experimento foi um Latossolo Vermelho-Amarelo Distrófico, típico da região sul do estado do Espírito Santo, contaminado de forma controlada em laboratório com rejeito sólido de mineração rico em titânio, proveniente de jazidas da mesma região. A análise química do solo foi realizada no Laboratório de Rotina de Análises de Solos do CCAUE-UFES, enquanto o rejeito de mineração foi submetido a análises mineralógicas e químicas para identificar as concentrações dos componentes e caracterizar os minerais presentes.

O plantio foi realizado em vasos de 5 litros, onde foram adicionadas três sementes de milho e mucuna preta por vaso, e aproximadamente 25 sementes de mostarda e girassol por vaso. Para a avaliação da biomassa radicular fresca (BMV), as plantas foram cortadas com tesoura de poda, o material foi trilhado em peneiras de 2mm em água corrente e posteriormente foram triturados e pesados em balança de precisão no laboratório. Posteriormente, as amostras foram secas em estufa de circulação forçada de ar a 60°C até atingirem massa constante, para obtenção da biomassa seca foliar (BMS), e pesadas novamente nas mesmas condições.

O experimento foi dividido em duas etapas. Na primeira etapa, foi avaliado o efeito isolado das espécies em solo contaminado com titânio a uma concentração de 100 mg.kg<sup>-1</sup>, utilizando um delineamento experimental inteiramente casualizado (DIC) com seis repetições. As espécies analisadas foram mostarda, girassol, milho e mucuna. O período experimental teve duração de três meses. Na segunda etapa, cada espécie foi submetida a seis níveis de dosagem do rejeito de mineração: 0,0 mg.kg<sup>-1</sup>, 12,5 mg.kg<sup>-1</sup>, 25,0 mg.kg<sup>-1</sup>, 50 mg.kg<sup>-1</sup>, 100 mg.kg<sup>-1</sup> e 200 mg.kg<sup>-1</sup>. Após a conclusão das avaliações, os dados foram tabulados e as médias dos tratamentos comparadas pelo teste F ao nível de 5% de significância. As variáveis analisadas foram submetidas ao teste de Tukey, também ao nível de 5% de significância. Para os níveis de dosagem, foi realizada análise de regressão linear. Todos os procedimentos estatísticos foram realizados utilizando o software R, com o auxílio dos pacotes “ExpDes.pt” e “stats”.

## Resultados

Para a característica de acúmulo de biomassa, seja seca e fresca, apresentaram efeito significativo pelo teste F ( $p < 0,05$ ), sendo que as variáveis apresentaram 33,38% e 27,47% de coeficiente de variação, respectivamente.

Tabela 1- Análise de variância e coeficiente de variação da etapa 1.

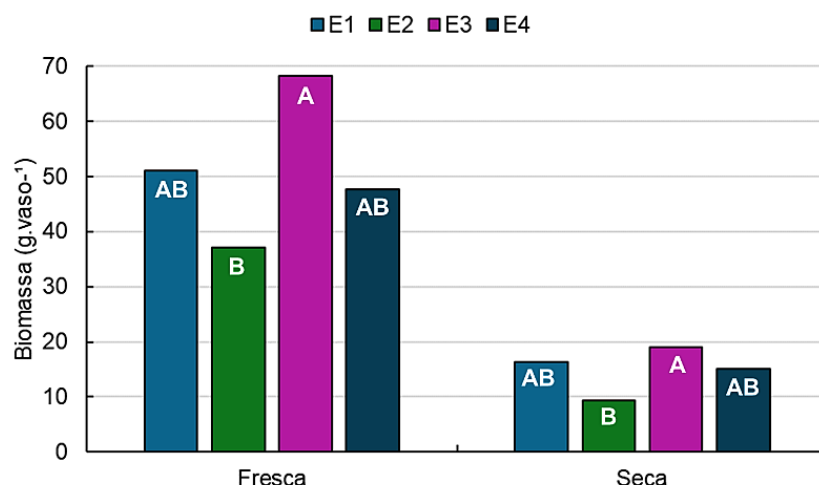
FV	GL	Quadrados Médios	
		BMF	BMS
Espécies	3	1.004,99*	102,225*
Resíduo	20	196,64	24,836
CV (%)	-	27,47	33,38

\*Significativo pelo teste F a 5% de probabilidade. BMV: biomassa radicular fresca; BMS: biomassa radicular seca.

Fonte: os autores.

Observou-se que em relação a biomassa fresca (Figura1), a espécie 3 (milho), espécie 1 (mostarda) e 4 (mucuna-preta), não diferenciaram entre si, apresentando maiores acúmulo de massa, sendo, 68,25g, 51,14g e 47,68g, respectivamente. Já as espécies 2 (girassol) apresentou menor valor em relação as demais espécies (37,08g).

Figura 1- Biomassa foliar verde e seca de diferentes espécies comerciais, submetidos a solo contaminado com rejeito de minério com alto teor de titânio.



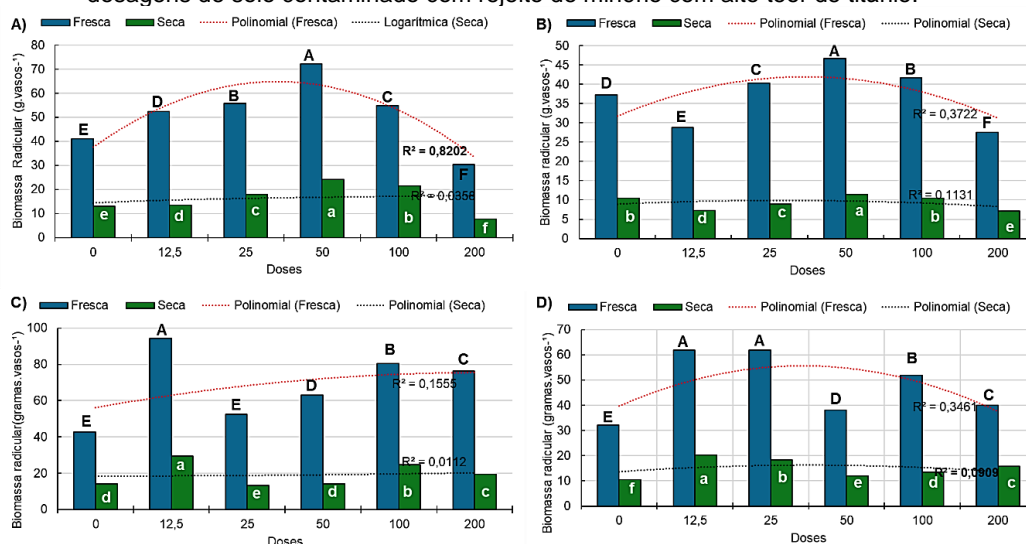
E1- Mostarda; E2- Girassol; E3- Milho e E4- Mucuna. Médias seguidas por uma mesma letra maiúscula, não diferem entre si pelo teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade

Fonte: os autores.

Já em relação a biomassa seca dos sistemas radiculares, apresentaram o mesmo comportamento que a biomassa fresca radicular, destacando-se a espécie 3 com maior valor (19,11g), seguido da espécie 1 (16,27g) e 4 (15,04g), respectivamente, enquanto a espécie 2 apresentou menor acúmulo de massa radicular sob solos contaminados com titânio (9,29g). Observa-se ainda, que as espécies 3, 1 e 4, tiveram uma redução de 49,14g (72%), 34,87g (68,18%) e 32,63g (68,44%) do seu peso, respectivamente, enquanto a espécie 2 (girassol), apresentou uma redução de 74,94% (27,79g).

Ao observar o desenvolvimento e eficiência no acúmulo de biomassa radicular fresca e seca das espécies em função de diferentes concentrações de titânio (Figura2), ressalta-se que a espécie 1 teve melhor desenvolvimento em biomassa radicular fresca e seca foram na dosagem de 50mg.Kg<sup>-1</sup>, com 72,23g e 24,07g, respectivamente, tendo uma redução de 66% do peso. (Figura2-A). A espécie 2 obteve melhor desenvolvimento e eficiência no acúmulo de biomassa radicular fresca e seca na mesma dosagem (50mg.Kg<sup>-1</sup>), com 46,69g e 11,40g, tendo um decréscimo do peso de 76%.

Figura 2- Biomassa radicular fresca e seca de diferentes espécies comerciais, submetidos a diferentes dosagens de solo contaminado com resíduo de minério com alto teor de titânio.



E1- Mostarda; E2- Girassol; E3- Milho e E4- Mucuna-preta. Médias seguidas por uma mesma letra minúscula, não diferem entre si a BMS pelo teste de Tukey ( $p < 0,05$ ), e médias seguidas por uma mesma letra maiúscula, não diferem entre si a BMV pelo teste de Tukey ( $p < 0,05$ ).

Fonte: os autores.

A espécie 3 (Figura2-C) obteve maiores acúmulo de biomassa radicular fresca e seca nas mesmas concentrações ( $12,5 \text{ mg.Kg}^{-1}$ ), com valor de 94,48g e 29,48g, ressaltando uma redução de 69%. Já a espécie 4 (Figura2-D), o ganho de biomassa radicular fresca foi mais eficiente na dosagem de 25  $\text{mg.Kg}^{-1}$  (61,95g), enquanto o da biomassa radicular seca foi na dosagem de 12,5  $\text{mg.Kg}^{-1}$  (20,16g).

Em relação a análise de regressão (Figura 2), a espécie 1 (mostarda), apresentou maior  $R^2$  (0,82) para a biomassa radicular fresca em relação as demais espécies, seguido das espécies 2, 4 e 3, com valores de 0,37, 0,34, e 0,15. Já para a biomassa radicular seca, a espécie 4, apresentou maior valor de  $R^2$  (0,90) sob as dosagens de titânio, seguidos das espécies 1 ( $R^2=0,35$ ), 2 ( $R^2=0,113$ ), e 3 ( $R^2=0,112$ ).

## Discussão

Os resultados obtidos no estudo revelam diferenças significativas entre as espécies vegetais quanto à resposta à contaminação por titânio, particularmente em termos de acumulação de biomassa radicular. Essas observações estão em consonância com estudos anteriores que destacam a variação na tolerância e na capacidade de adaptação das plantas a metais pesados, como indicado por Reis et al. (2016) e Guimarães et al. (2019), que discutem a diversidade de respostas fisiológicas entre diferentes espécies quando expostas a ambientes contaminados.

O milho (*Zea mays*), identificado como a espécie 3 no estudo, apresentou a maior acumulação de biomassa radicular, tanto fresca quanto seca. Esses achados corroboram os resultados de trabalhos anteriores que demonstram a eficiência do milho na fitorremediação de solos contaminados, devido à sua robusta estrutura radicular e mecanismos eficientes de detoxificação de metais pesados (Zhang et al., 2014). A capacidade do milho de adaptar-se a ambientes contaminados, possivelmente através de mecanismos de sequestro e compartimentalização de titânio, confirma sua adequação como espécie para programas de fitorremediação.

Em contraste, o girassol (*Helianthus annuus*), ou espécie 2, apresentou a menor acumulação de biomassa radicular. Este resultado está alinhado com as conclusões de Ferreira e Sousa (2015), que identificaram a sensibilidade do girassol a metais pesados, resultando em uma redução significativa no crescimento radicular devido à toxicidade dos metais e à interferência na absorção de nutrientes. A menor eficiência do girassol em condições de solo contaminado destaca a necessidade de selecionar espécies vegetais com base em suas capacidades específicas de tolerância a diferentes tipos de contaminação.

A análise de regressão realizada no estudo revelou que a mostarda (*Brassica juncea*, espécie 1) e a mucuna-preta (*Mucuna aterrima*, espécie 4) têm respostas diferenciadas ao estresse por titânio. Esses resultados estão de acordo com as observações de Kumar et al. (2012), que sugerem que diferentes espécies vegetais adotam estratégias distintas de alocação de biomassa como resposta ao estresse por metais pesados, sendo crucial para o sucesso da fitorremediação selecionar as espécies mais adequadas com base nos objetivos específicos do manejo ambiental.

Em síntese, os achados do estudo reforçam a importância da seleção criteriosa de espécies vegetais para programas de fitorremediação, levando em consideração as respostas específicas de cada planta ao estresse causado por metais pesados. O milho, com sua elevada capacidade de acumulação de biomassa radicular, destaca-se como uma opção viável para a recuperação de solos contaminados por titânio. Esses resultados não apenas ampliam o conhecimento existente sobre fitorremediação, mas também fornecem uma base científica sólida para futuras pesquisas e aplicações práticas em técnicas de manejo de solos contaminados.

## Conclusão

Os resultados indicam que as espécies de plantas estudadas apresentaram variações significativas na acumulação de biomassa radicular fresca e seca sob diferentes concentrações de rejeito de minério.

A espécie 3 (milho) demonstrou maior acumulação de biomassa radicular fresca e seca, seguida pelas espécies 1 (mostarda) e 4 (mucuna-preta), enquanto a espécie 2 (girassol) apresentou menor acumulação de biomassa radicular, tanto fresca quanto seca, sob solos contaminados com rejeito de minério.



A análise de regressão revelou que a espécie 1 teve o melhor ajuste para a biomassa radicular fresca, enquanto a espécie 4 mostrou um ajuste superior para a biomassa radicular seca, evidenciando a diferença na resposta fenotípica das espécies às concentrações de rejeito de minério.

Esses achados destacam a importância da seleção de espécies específicas para a remediação de solos contaminados por rejeito de minério, considerando a variabilidade na eficiência de acumulação de biomassa radicular.

## Referências

- ACCIOLY, A. M. A.; SIQUEIRA, J. O. Contaminação química e biorremediação do solo. In: NOVAIS, R. F.; ALVAREZ V.; V. H.; SCHAEFER, C. E. G. R. **Tópicos em ciência do solo** Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, v. 1. p. 299-352, 2000.
- ANDRADE, J.C. M; TAVARES, S.R.L; MAHLER, C.F., 2007, Fitorremediação: o uso de plantas na melhoria da qualidade ambiental. São Paulo. **Oficina de Textos**. 176p, 2007.
- ANGULO, Sérgio Cirelli. Variabilidade de agregados graúdos de resíduos de construção e demolição reciclados. 2001. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.
- COUTINHO, H.C.; BARBOSA, A.R. Fitorremediação: considerações gerais e características de utilização. **Silva Lusitana**, Lisboa, v. 15, n. 1, p. 103-117, 2014.
- DE MAGALHÃES MOREIRA, Joana Teixeira. **Potencial de fitorremediação de culturas oleaginosas para energia em solos contaminados com metais pesados**. 2021.
- FERREIRA, F. R.; SOUSA, L. F. Impacto de metais pesados no crescimento radicular de *Helianthus annuus* em solos contaminados. **Journal of Environmental Management**, v. 146, p. 185-192, 2015.
- GUIMARÃES, P. R.; OLIVEIRA, S. D.; FERREIRA, A. S. Respostas fisiológicas de plantas submetidas a solos contaminados com metais pesados. **Acta Botanica Brasilica**, v. 33, n. 2, p. 205-214, 2019.
- IBF– Instituto Brasileiro de Florestas – **Espécie Nativa**. Disponível em <https://www.ibflorestas.org.br/conteudo/especies-nativas-e-exoticas>. Acesso em 25/07/2024.
- MARTINS, João Pedro Monteiro. Avaliação do efeito da inoculação de espécies forrageiras na produção de biomassa aérea e radicular. 2024. **Trabalho de Conclusão de Curso**. Escola Superior Agrária de Elvas.
- NEGRI, M.C.; GARLIFF, E.G.; QUINN, J.J.; HINCHMAN, R.R. Root development and rooting at depths. In: MCCUTCHEON, S.C.; SCHNOOR, J.L. (Eds.). *Phytoremediation: transformation and control of contaminants*. New York: John Wiley & Sons, Inc., p. 987, 2003.
- PINTO, L.V.A.; SILVA, S.; RESENDE, L.A.; OLIVEIRA, T.M. Seleção de espécies para recuperação de áreas de lixão. *I Congresso Brasileiro de Gestão Ambiental*, 2015. Disponível em: <http://web-resol.org/textos/xi-018.pdf> Acesso em: 01 jul. 2024.
- REIS, H. F.; MARTINS, M. E.; LIMA, R. B. Tolerância diferencial de espécies vegetais ao estresse por metais pesados: uma revisão. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 40, p. 1-15, 2016.
- SANTOS, E. A.; MARIANO, T.L.S.; BARJA, P.R.; AQUINO, M.R. Aplicação Do Processo De Fitorremediação Utilizando Vetiver (*Vetiveria Zizanioides* (L.) Nash.) Na Descontaminação De Solos Tropicais Contaminados Por Chorume. **Revista Univap**, Vol. 26, n. 51, 2020.
- TAVARES, S.R.L., OLIVEIRA, S.A., SALGADO, C.M. **Avaliação de espécies vegetais na fitorremediação de solos contaminados por metais pesados**. HOLOS, ano 29, V.5, 2013.
- ZHANG, X.; ZHAO, F.; ZHOU, Q. The role of maize in the phytoremediation of heavy metal contaminated soils. **Environmental Pollution**, v. 186, p. 96-104, 2014.

## Agradecimentos

O presente trabalho foi realizado com apoio da Universidade Federal do Espírito Santo – Campus de Alegre, em especial ao Centro de Ciências Agrárias e engenharia (CCAUE-UFES).