

EFICIÊNCIA DE ACÚMULO DE BIOMASSA DE PLANTAS FITORREMEIADORAS EM SOLOS CONTAMINADOS COM REJEITOS DE MINERAÇÃO

Marcia Braga Pereira, André Soares de Castro, Laryssa Ferreira Tuelher, Leonan José Emerick Silva, Felipe Augusto Ferreira Cruz, 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,
marciabp25@hotmail.com; andre.s.castro@edu.ufes.br; ferreiratuelher@gmail.com;
emerickleonan@gmail.com; felipeferreira7479@gmail.com; leandropin@yahoo.com.br.

Resumo

A eficiência de acúmulo de biomassa em plantas fitorremediadoras em solos contaminados com rejeitos de mineração refere-se à capacidade dessas plantas de crescer e se desenvolver, acumulando massa vegetal mesmo em condições adversas. O objetivo do trabalho foi aprimorar essa tecnologia ambiental, para potencializar o sucesso da fitorremediação, pois plantas com alta biomassa podem remover maiores quantidades de metais pesados do solo, contribuindo para a recuperação ambiental e possivelmente gerando benefícios econômicos, entre as espécies estudadas, o milho (espécie 3) e o girassol (espécie 2) apresentaram maior acúmulo de biomassa verde e seca, destacando-se principalmente sob concentrações mais elevadas de rejeitos de mineração. Assim, escolha de espécies resilientes e bem adaptadas às condições do solo contaminado é fundamental para otimizar esse processo.

Palavras-chave: Metais pesados. Contaminação. Rejeito de Mineração. Resíduo. Fitodegradação.

Área do Conhecimento: Agronomia.

Introdução

Espécies vegetais com alta eficiência de acúmulo de biomassa são particularmente valiosas em solos contaminados com rejeitos de mineração, pois podem melhorar a estrutura do solo, aumentar a quantidade de matéria orgânica e facilitar a remoção ou estabilização do metal. Além disso, a produção de biomassa pode ser explorada economicamente, tornando o processo de recuperação ambiental ainda mais viável. O acúmulo de biomassa reflete a capacidade da planta de crescer e se desenvolver mesmo em condições adversas, como a presença de contaminantes.

As plantas que conseguem crescer rapidamente em solos contaminados terão uma maior capacidade de acumular biomassa, o que é benéfico para a fitorremediação, o pH, a disponibilidade de nutrientes, a umidade e outros fatores ambientais afetam o acúmulo de biomassa assim como os solos contaminados podem ter alterações nessas condições, impactando o crescimento das plantas assim a adaptação das plantas a esses fatores é crucial (PAULA; RIBEIRO; CAVALCANTE, 2022).

As plantas fitorremediadoras podem acumular biomassa de diferentes formas, como através do crescimento de raízes, caules, folhas e até mesmo da produção de frutos ou sementes. A capacidade de alocar biomassa em diferentes partes da planta pode aumentar a eficácia da fitorremediação.

Elas desenvolvem mecanismos para tolerar e até mesmo se beneficiar da presença de metais pesados, o acúmulo de biomassa é frequentemente relacionado com a capacidade da planta de extrair metais pesados do solo, as plantas com alta biomassa podem ser mais eficazes na remoção desses metais pois há mais material vegetal disponível para sequestrar o metal (MEJÍA et al., 2014).

O acúmulo de biomassa ao longo do tempo pode melhorar a estrutura e a fertilidade do solo, promovendo a recuperação ambiental assim os solos com uma cobertura vegetal densa e saudável podem ter uma menor mobilidade de contaminantes.

A escolha de plantas fitorremediadoras com alta eficiência de acúmulo de biomassa é crucial. Espécies como *Brassica juncea* (mostarda indiana), *Helianthus annuus* (girassol) e *Stizolobium Aterrimum Piper & Tracy* (mucuna-preta) são conhecidas por sua capacidade de crescer em solos contaminados e acumular biomassa significativa.

A utilização de plantas fitorremediadoras que também têm valor comercial pode ser uma estratégia interessante, permitindo a recuperação do solo enquanto se obtém um retorno econômico pela produção agrícola.

Metodologia

O trabalho foi conduzido em uma casa de vegetação na UFES-Alegre, 126 m de altitude. A região apresenta clima com estações secas e chuvosas bem definidas, classificado como Cwa, tropical, pelo sistema de Köppen (1931), com inverno ameno e seco.

As sementes das espécies selecionadas para o estudo (*mucuna* preta (*mucuna aterrima*), girassol (*Helianthus annuus*), milho (*Zea mays*) e mostarda (*Brassica juncea*) foram adquiridas da coleção do Laboratório de Análises Vegetais do departamento de Agronomia do Centro de Ciências Agrárias e Engenharia (CCA-E-UFES).

O solo utilizado foi um solo típico da região sul do estado do Espírito Santo, sendo um Latossolo Vermelho Amarelo Distrófico, sendo contaminado de forma controlada em laboratório com resíduo sólido de mineração (Rejeito de mineração), sendo adquiridos de jazidas da região sul do estado do Espírito Santo.

O solo foi submetido a análise química pelo Laboratório de Rotina de Análises de Solos do CCAE-UFES, enquanto o rejeito de mineração foi submetido a análise mineralogia e química, para identificação das concentrações de cada componente, assim como caracterização dos minerais.

O plantio de milho, a mucuna preta foram adicionadas 3 sementes por vasos, enquanto o plantio de mostarda e girassol, foram adicionadas aproximadamente 25 sementes por vasos. Foram utilizados vasos de 5L.

Para a avaliação de biomassa foliar verde (BMV), as plantas foram cortadas com tesoura de poda, o material foi trilhado e mensurado em balança de precisão no laboratório. O material coletado foi pesado e as amostras foram secas em estufa de circulação forçada de ar a 60°C até massa constante, para a obtenção de biomassa seca foliar (BMS), sendo submetidas às mesmas condições de pesagem da biomassa foliar verde.

O trabalho foi dividido em 2 etapas, onde na primeira etapa foi avaliado o efeito isolado das espécies em um delineamento experimental adotado foi inteiramente casualizado (DIC) com 6 repetições, avaliando-se as espécies comerciais em solos contaminados com rejeitos de mineração a 100mg.Kg⁻¹, sendo eles: E1- Mostarda; E2- Girassol; E3- Milho e E4- Mucuna. O período experimental foi de 3 meses. Enquanto na segunda etapa, foi conduzido separadamente, onde cada espécie da etapa a1 foi submetida a 6 níveis de dosagem de rejeito de mineração, sendo eles: 0,0 mg.Kg⁻¹, 12,5 mg.Kg⁻¹, 25,0 mg.Kg⁻¹, 50 mg.Kg⁻¹, 100 mg.Kg⁻¹, e 200 mg.Kg⁻¹.

Após a finalização das avaliações e a tabulação do banco de dados gerados a partir do experimento, as médias dos 4 tratamentos foram comparadas pelo teste F a nível de 5% de significância, e após as conclusões, todas as variáveis analisadas foram separadas pelo algoritmo de Tukey ao nível de significância de 5%. Já para os níveis de dosagem, foi aplicado análise de regressão linear. Todos os procedimentos estatísticos foram conduzidos com auxílio do programa R, a partir das funções disponíveis no pacote "ExpDes.pt" e no pacote básico (stats).

Resultados

Para a característica de acúmulo de biomassa, seja verde e seca, apresentaram efeito significativo pelo teste F ($p < 0,05$), sendo que as variáveis apresentaram 29,75% e 20,14% de coeficiente de variação, respectivamente.

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

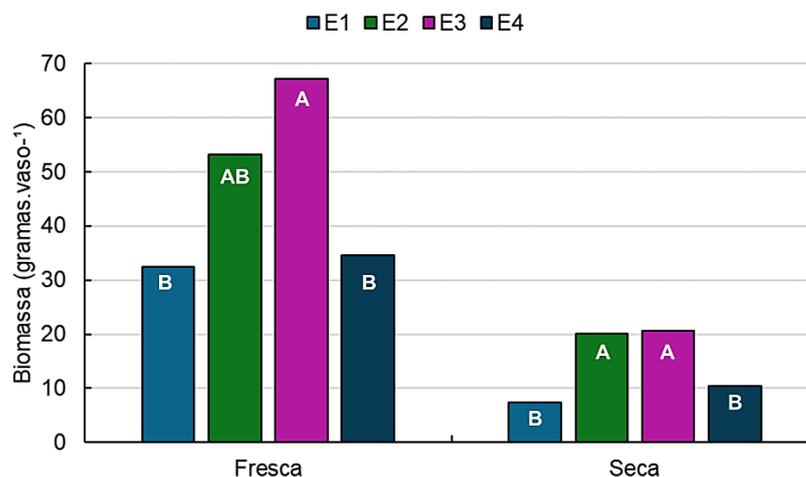
FV	GL	Quadrados Médios	
		BMV	BMS
Doses	3	1616.7*	274.293*
Resíduo	20	194.3	8,738
CV (%)	-	29,75	20,14

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

Fonte: os autores.

Observou-se que em relação a biomassa verde (Figura1), a espécie 3 (milho) e espécie 2 (girassol), apresentaram maior acúmulo de massa, sendo, 67,17g e 53,16g, respectivamente. Já as espécies 4 (mucuna) e 1 (mostarda), apresentaram menores valores em relação as demais espécies, sendo estatisticamente iguais, com valor de 34,69g e 32,41g, respectivamente.

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

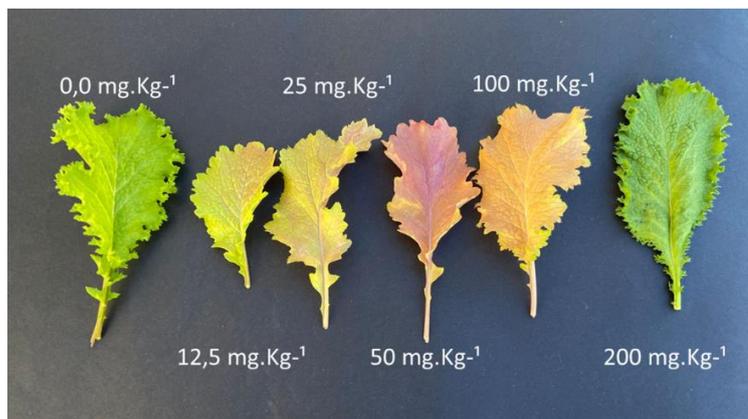


E1- Mostarda; E2- Girassol; E3- Milho e E4- Mucuna-preta. Médias seguidas por uma mesma letra maiúscula, não diferem entre si pelo teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade

Fonte: os autores.

Já em relação a biomassa seca da parte aérea das espécies estudadas (Figura1), nota-se que as espécies 3 e 2, não se diferenciaram entre si, com valores de 20,72g e 20,15g, respectivamente. Observa-se ainda, que as espécies em questão (3 e 2), tiveram uma redução de 46g (69%) e 33g (62%) do seu peso, respectivamente. As espécies 4 e 1, apresentaram semelhança estatísticas entre si, e diferenciaram das demais espécies (2 e 3), tendo valores de 10,40g e 7,43g, respectivamente, assim, seu peso reduziram 70% (25g) e 77% (24g) do seu peso verde.

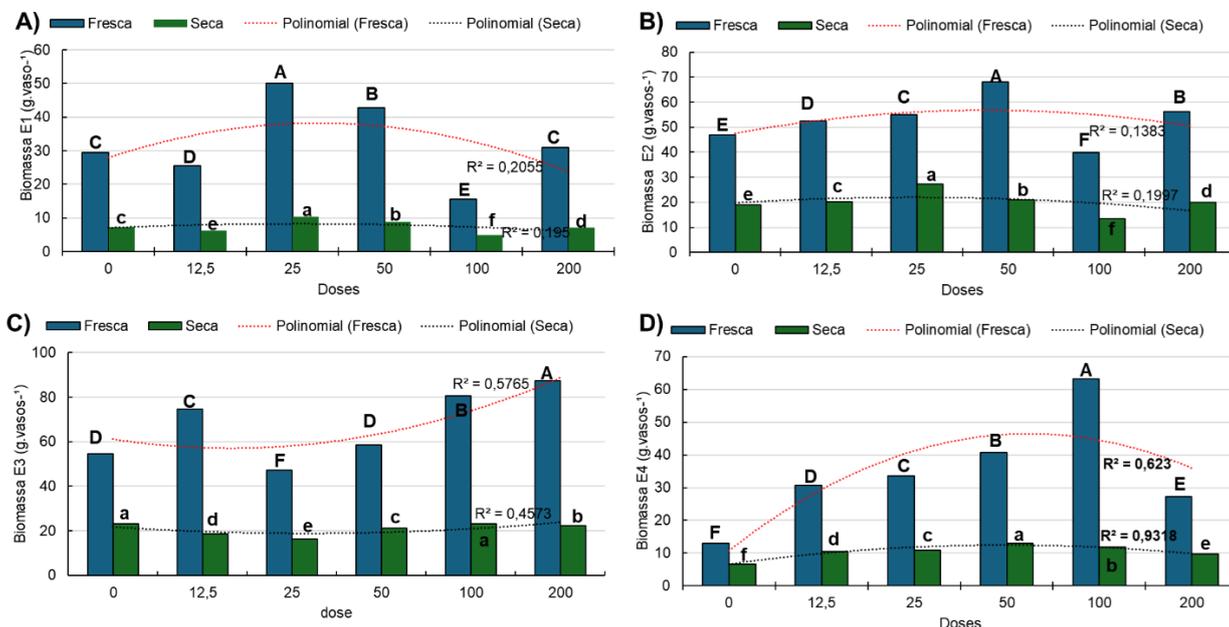
Imagem 1 - Variação na coloração das folhas de mostarda (*Brassica juncea*) cultivadas em solo contaminado com diferentes concentrações de titânio provenientes de rejeitos de minério.



Fonte: os autores

Ao observar o desenvolvimento e eficiência no acúmulo de biomassa verde e seca das espécies em função de diferentes concentrações de rejeitos de mineração (Figura2), ressalta-se que a espécie 1 teve melhor desenvolvimento em biomassa fresca e seca foram na dosagem de 25mg.Kg⁻¹, com 50,13g e 10,23g, respectivamente (Figura2-A). Já a espécie 2 obteve melhor desenvolvimento na BMV na dosagem de 50 mg.Kg⁻¹ (68,13g), enquanto na BMS foi de 25 mg.Kg⁻¹, com 27,2g (Figura2-B).

Figura 2- Biomassa foliar verde e seca de diferentes espécies comerciais, submetidos a diferentes dosagens de solo contaminado com rejeito 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 maior acúmulo de biomassa fresca na dosagem de 200 mg.Kg⁻¹ (80,6g), enquanto a BMS foi na dosagem de 100 mg.Kg⁻¹ (23,14g). Já a espécie 4 (Figura2-D), o ganho de BMV foi mais eficiente sobre a dosagem de 200 mg.Kg⁻¹ (63,2g), enquanto o da BMS foi na dosagem de 100 mg.Kg⁻¹ (11,9g).

Em relação a análise de regressão (Figura2), as espécies 1, 2, nas variáveis de BMV e BMS, nenhuma apresentaram valores de R² maior que 0,21. Já a espécie 3, na variável BMV, apresentou um R² de 0,57, em contra partida, a BMS apresentou menor R² (0,45). A espécie 4, respondeu aos níveis de dosagem de forma mais eficiente em relação as demais espécies, sendo que, na variável de acúmulo de BMV, apresentou um R² de 0,623, enquanto a BMS apresentou um R² de 0,93.

Discussão

A eficiência de acúmulo de biomassa em plantas fitorremediadoras é essencial para a recuperação de solos contaminados com metais pesados. No presente estudo, foi avaliado o desempenho de diferentes espécies vegetais em solos contaminados com rejeitos de mineração, com destaque para o milho (*Zea mays*) e o girassol (*Helianthus annuus*), que demonstraram maior acúmulo de biomassa verde e seca. Esses resultados são consistentes com estudos anteriores que enfatizam a importância da escolha de espécies vegetais com alta produção de biomassa para a fitorremediação. Mendoza et al. (2019) apontam que plantas com maior acúmulo de biomassa tendem a ser mais eficazes na remoção de contaminantes, uma vez que há mais material vegetal disponível para sequestrar os metais do solo.

A capacidade de diferentes espécies vegetais de acumular biomassa em solos contaminados está diretamente ligada à sua adaptação às condições adversas impostas pela presença de metais pesados. No estudo, verificou-se que, enquanto o milho e o girassol apresentaram os maiores valores de biomassa, a mostarda (*Brassica juncea*) e a mucuna-preta (*mucuna aterrimam*) mostraram-se menos eficazes nesse aspecto. No entanto, a adaptação dessas espécies às concentrações de rejeitos de mineração foi mais pronunciada, com coeficientes de determinação (R^2) mais elevados, sugerindo uma melhor adequação dessas plantas ao ambiente contaminado, especialmente na acumulação de biomassa seca. Esses achados estão alinhados com as observações de Paula, Ribeiro e Cavalcante (2022), que ressaltam a importância da seleção de plantas não apenas pela quantidade de biomassa, mas também pela sua capacidade de adaptação a solos contaminados.

Outro ponto relevante é o impacto das diferentes dosagens de rejeitos de mineração sobre o acúmulo de biomassa. Foi observado que as plantas responderam de maneira variável às concentrações de rejeitos de mineração, com algumas espécies apresentando maior acúmulo de biomassa em concentrações específicas. Por exemplo, o milho obteve maior acúmulo de biomassa seca na dosagem de 100 mg.kg⁻¹, enquanto a mostarda apresentou melhor desempenho em uma dosagem mais baixa, de 25 mg.kg⁻¹. Essa variação no desempenho sugere que a otimização da fitorremediação pode requerer ajustes na dosagem de contaminantes para maximizar a eficiência de remoção de metais, conforme sugerido por estudos sobre a resposta de plantas a diferentes níveis de estresse ambiental (ZENG et al., 2017).

Finalmente, a escolha de plantas com valor comercial pode adicionar uma dimensão econômica à fitorremediação, tornando o processo mais atrativo. Plantas como o milho e o girassol, além de contribuírem para a descontaminação do solo, possuem aplicações econômicas diretas, seja na produção de grãos ou óleo. Isso poderia agregar valor ao processo de recuperação ambiental, como sugerido por diversos estudos que exploram a integração de fitorremediação com agricultura sustentável (LIU et al., 2020). Portanto, a adoção de espécies que combinam eficiência de biomassa com valor econômico pode representar uma estratégia sustentável e economicamente viável para a remediação de solos contaminados.

Conclusão

Conclui-se que, entre as espécies estudadas, o milho (espécie 3) e o girassol (espécie 2) apresentaram maior acúmulo de biomassa verde e seca, destacando-se principalmente sob concentrações mais elevadas de rejeitos de mineração. No entanto, a mostarda (espécie 1) e a mucuna (espécie 4) demonstraram maior eficiência na resposta às dosagens de rejeitos de mineração, com R^2 mais elevados, indicando uma maior adaptação ao ambiente contaminado, especialmente em termos de biomassa seca.

Referências

- LIU, Zhi-Quan et al. Acoplamento de fitorremediação de solo contaminado por cádmio com produção segura de safras com base em um sistema de cultivo de sorgo. **Journal of Cleaner Production**, v. 275, p. 123002, 2020.
- MEJÍA, P.V.L., ANDREOLI, F.D.N., ANDREOLI, C.V., SERRAT, B.M. Metodologia para Seleção de Técnica de Fitorremediação em Áreas Contaminadas. *Revista Brasileira de Ciências Ambientais*.31,97-104, 2014.
- MENDOZA-HERNÁNDEZ, José Carlos et al. Fitorremediação de rejeitos de mineração por *Brassica juncea* inoculada com bactérias promotoras de crescimento vegetal. **Pesquisa microbiológica**, v. 228, p. 126308, 2019.
- PAULA, J. R., RIBEIRO, A. C., CAVALCANTE, L. F. Adaptation and growth of phytoremediation plants in contaminated soils. **Soil and Plant Science**, 2022.
- PAULA, P.F.;RIBEIRO,F.M.L.;CAVALCANTE,L.B.A. Avaliação do Potencial de Espécies Vegetais na Fitorremediação de Solos Tropicais Contaminados por Metais Pesados. **Revista Científica de Pesquisa Aplicada à Engenharia REPAE** - 2021, Brasília, Distrito Federal, Brasil © PET-ENC UnB, 2022.

ZENG, Peng et al. Respostas fisiológicas ao estresse, absorção de elementos minerais e potencial de fitorremediação de *Morus alba* L. em solo contaminado com cádmio. **Ecotoxicologia e segurança ambiental**, v. 189, p. 109973, 2020.

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 (CCA-E-UFES).