

FITORREMEDIAÇÃO DE ÁREAS CONTAMINADAS COM COBRE UTILIZANDO PLANTAS DE MAMONA

Robson Andreazza¹; Flávio Anastácio deOliveira Camargo²

Resumo: Áreas contaminadas com cobre, como áreas de vitivinicultura e áreas de mineração de cobre, vêm aumentando consideravelmente nos últimos anos, tornando-se um grande problema ambiental. Em virtude disto, técnicas como a fitorremediação podem auxiliar na remoção do cobre, e, conseqüentemente, melhorar as condições ambientais destas áreas. Assim, o objetivo deste trabalho foi avaliar aspectos envolvidos na fitorremediação de áreas de vitivinicultura contaminadas com cobre e áreas de rejeito de mineração de cobre, utilizando Mamona (*Ricinus communis* L.). Para isto, foram coletados dois solos contaminados com cobre em áreas de vitivinicultura (Neossolo e Cambissolo), e um solo coletado em Mata Nativa, em área próxima, todos oriundos de Bento Gonçalves, RS; e um resíduo de rejeito de mineração de cobre, coletado nas Minas do Camaquã, em Caçapava do Sul, RS. Sementes de mamona foram semeadas em potes de cerâmica com 2,5 kg de solo de cada tratamento: 1) Mata Nativa; 2) Neossolo; 3) Cambissolo; 4) 40% Mata Nativa e 60% rejeito de mineração de cobre. As plantas de Mamona mostraram alto índice de tolerância em todos os solos contaminados com cobre. Além do mais, esta espécie apresentou alta produção de massa em todos os tratamentos. Após 57 dias de crescimento em casa de vegetação, as plantas demonstraram uma alta capacidade de fitorremoção e fitoestabilização de cobre nas áreas contaminadas com cobre. Plantas cultivadas em Neossolo, Cambissolo e rejeito de mineração mostraram alto potencial de fitorremoção de cobre, com valores acima de 5.900, 3.052 e 2.805 g ha⁻¹, respectivamente. Em resumo, as Plantas de Mamona mostraram alta produção de fitomassa em solos contaminados com cobre, indicando um alto nível de fitoacumulação, e, juntamente com a produção de óleo para biodiesel, pode ser uma alternativa para a recuperação destas áreas contaminadas com cobre e uma alternativa econômica para os produtores. Estas características indicam que a Mamona é uma planta hiperacumuladora de cobre e uma candidata em potencial à fitorremediação de áreas contaminadas com cobre.

Palavras-Chave: Fitorremediação; áreas contaminadas com cobre; áreas de rejeito de mineração; mamona.

Introdução

A contaminação do solo e corpos d'água com metais pesados tem aumentado nos últimos anos, e, conseqüentemente, tem promovido um problema ambiental. Áreas contaminadas com cobre, tais como vinhedos e locais próximos às minas de cobre, têm sido objeto de estudos de remediação para mitigar os problemas de poluição que afetam negativamente a produção agrícola e qualidade ambiental (Andreazza et al., 2010). Biotecnologias, como a fitorremediação, pode controlar ou diminuir o impacto negativo de contaminação de cobre nessas áreas, permitindo a recuperação dos solos para produção agrícola e na fitoestabilização de altas concentrações de cobre (Andreazza et al., 2010). O emprego de uma cultura de alta capacidade de produção de bioenergia, com fitorremediação, representa uma opção atrativa e viável para os agricultores adotarem, como estratégia de biorremediação em áreas com altos níveis de contaminação de cobre.

Fitorremediação é uma estratégia biotecnológica aplicada à descontaminação de locais poluídos com metais pesados, empregando plantas para extrair, seqüestrar ou descontaminar poluentes em ambientes terrestres ou aquáticos (Kamura & Esposito, 2010). Uma das diversas técnicas de fitorremediação, é a fitoestabilização, que é a incorporação, e/ou a estabilização de metais pesados na lignina ou ao húmus do solo pelas plantas (Kamura & Esposito, 2010). Em estudos examinando a fitorremediação em vinhedos, e locais poluídos com resíduos de mineração de cobre, a fitoestabilização tem sido empregada com sucesso no contexto de outras culturas (Andreazza et al., 2010) e outras situações (Nevel et al., 2011). Portanto, a fitorremediação é uma ferramenta de baixo custo para a remediação de solos contaminados com metais pesados que atualmente tem sido utilizado muitas plantas, tais como *Brachiaria decumbens* (Santos et al., 2006), *Brassica juncea* (Clemente et al., 2006), *Elsholtzia splendens* e *Silene vulgaris* (Song et al., 2004), e plantas bioenergéticas como *Cannabis sativa*, *Linum usitatissimum*, *Ricinus communis*, *Arachis hypogaea* e *Helianthus annuus* (Shi & Cai, 2009). Até o momento, no entanto, estudos que investigam fitorremediação de cobre com *Ricinus communis* apresentaram resultados incompletos e insuficientes.

¹ Pós-Doutorando REUNI do Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo da Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. E-mail: robsonandreazza@yahoo.com.br

² Orientador, Professor do Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo da Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. E-mail: fcamargo@ufrgs.br

O Sul do Brasil responde pela maior parte da produção vinícola do país. Os vinhedos do sul do Brasil são muitas vezes de propriedade e operados por famílias em pequenas parcelas de terra. Devido a alta demanda por tratamentos para controle de doenças foliares, o uso de produtos contendo cobre nas folhas ao longo dos anos, tem aumentado as concentrações de cobre no solo em taxas que podem ser considerados poluentes. Portanto, a mamona pode representar uma ferramenta importante para mitigar a contaminação de cobre nestas áreas para permitir o crescimento de culturas de cobertura, e no futuro, além do processo de remediação, os agricultores podem aumentar sua renda com a produção de biocombustível a partir da produção mamona. Assim, nosso estudo procurou investigar o uso de uma cultura bioenergética (*Ricinus communis*) como uma planta fitorremediadora de solos contaminados com cobre, como de vitivinicultura e em locais contaminados com rejeitos de mineração de cobre, caracterizando a mamona como uma planta hiperacumuladora.

Metodologia

Um experimento em casa-de-vegetação foi realizado com amostras de solo extraído da camada (0-20 cm superior) de dois solos de vitivinicultura (Neossolo e Cambissolo) que estão sendo utilizados para vitivinicultura por mais de 40 anos no Sul do Brasil na estação experimental da EMBRAPA vinhos localizado em Bento Gonçalves, RS, Brasil. Além disso, uma amostra da camada superficial do solo (0-20 cm) foi extraída de uma floresta nativa (Mata Nativa), área localizada perto dos solos de vitivinicultura. A amostra de rejeito de mineração de cobre foi extraída de uma mina de cobre em Caçapava do Sul, RS, Brasil. Os rejeitos da mineração de cobre e os solos foram completamente caracterizados por Andreatza et al. (2010).

Todas as amostras foram secas ao ar e peneiradas (3 mm) antes da análise físico-química (Andreatza et al., 2010). A análise do solo indicou que o solo de mata nativa, Neossolo, Cambissolo e rejeitos da mineração de cobre, demonstraram valores de cobre extraível (extraído com 0,1 M de HCl) nas concentrações de 3,8, 207, 142 e 576 mg kg⁻¹, respectivamente. Com base nas recomendações de nutrientes para as culturas do sul do Brasil, amostras de solo (2,5 kg) foram tratadas com uma solução nutritiva composta de 4,5 mg B (H₃BO₃) e 25 mg S ((NH₄)₂ SO₄) e foram homogeneizados. Os níveis de outros nutrientes foram classificados como "adequados" e não foram aplicados. O pH do solo foi ajustado para 6,5 utilizando CaCO₃.

Cinco repetições de 2,5 kg de solo foram colocadas em potes de 4000 dm³. Água deionizada foi então adicionado as subamostras para elevar a umidade do solo até 80% da capacidade de campo, e foi mantida durante 57 dias de crescimento das plantas. Quatro tratamentos de solo foram testados: solo de mata nativa (controle), Neossolo, Cambissolo e rejeito de mineração de cobre (40% do solo de mata nativa e 60% do rejeito da mineração de cobre).

As sementes de mamona (*Ricinus communis* L.) foram semeadas a uma taxa de 10 sementes por vaso. Após 10 dias de incubação, foi realizado um desbaste, mantendo uma planta em cada vaso até o final do experimento. Aos 15 e 30 dias após semeadura, foi aplicado nitrogênio (30 mg g⁻¹ de solo) a cada unidade experimental. Os potes foram regados durante o período de crescimento para manter o teor de água do solo perto à 80% da capacidade de campo. Após 57 dias de crescimento, a parte aérea das plantas foi colhida e imediatamente medida a altura de plantas, massa verde e massa seca. A altura de cada planta foi determinada em relação ao tronco principal da base até a ponta das plantas de mamona. A parte aérea foi posteriormente pesada, e seca por 72 h à 60°C. O sistema solo-raiz foi medido para determinar massa verde e seca. Depois da massa verde pesada, cada raiz da planta foi separada por lavagem com água deionizada, secos por 72 h à 60°C e pesadas para posterior análise.

O fator de translocação (TF) de Cu, Zn, Na, Mn e Fe da raiz para a parte aérea e do fator de bioconcentração (BCF) foram calculados de acordo com Shi & Cai (2009). A taxa de extração de metal (MER) é definida como a razão de acumulação de metal na parte aérea à aquele no solo (Mertens et al, 2005). O número de plantas da parte aérea (PENs) e o número de plantas totais (PENT) eficazes para de remover 1 g de metal do solo por plantas hiperacumuladoras foram calculadas de acordo com Sun et al. (2008).

O delineamento experimental neste estudo foi inteiramente casualizado com cinco repetições. Análise estatística foi realizada com ANOVA. Quando uma diferença significativa foi observada entre os tratamentos ($P \leq 0,05$), comparações múltiplas foram realizadas com o teste de Tukey.

Resultados e Discussão

Plantas de mamona apresentaram um alto potencial de fitoacumulação de cobre nas raízes para todos os solos contaminados com cobre (Figura 1). Plantas de mamona cultivadas em Neossolo apresentaram níveis elevados de fitoacumulação de cobre na parte aérea, raízes e planta inteira, com valores de 12, 1131 e 1143 mg kg⁻¹, respectivamente. Além disso, plantas cultivadas no Cambissolo exibiram uma alta capacidade fitoacumulação de cobre na parte aérea, raízes e planta inteira (com 7, 581 e 588 mg kg⁻¹, respectivamente), com os mesmos níveis encontrados quando cultivadas no rejeito de mineração de cobre, com valores de 13, 531 e 544 mg kg⁻¹ na parte aérea, raízes e planta inteira, respectivamente. O cobre é um micronutriente essencial para todos os organismos vivos, no entanto, em altas concentrações, é um metal pesado tóxico e pode causar muitos danos aos organismos e ao meio ambiente (Atlas & Bartha, 1997). Este estudo caracterizou a mamona (uma planta

capaz de produzir bioenergia) como uma planta hiperacumuladora de cobre, e foi testado o seu potencial como biotecnologia, na fitorremediação de áreas contaminadas com cobre. Nossos resultados mostraram um alto nível de crescimento e alta produção de fitomassa de plantas de mamona cultivada em solo contaminado com cobre. Alguns metais pesados, tais como arsênio (As), quando aplicados em altas concentrações na solução nutritiva, diminuiu a produção de fitomassa da parte aérea e raiz (Melo et al., 2009). No entanto, nossos resultados não indicam uma diminuição na produção da fitomassa da mamona, na verdade, nossos resultados sugerem um aumento da massa verde e seca após as plantas serem cultivadas em ambos os solos vitivinicultura, em comparação com o solo nativo.

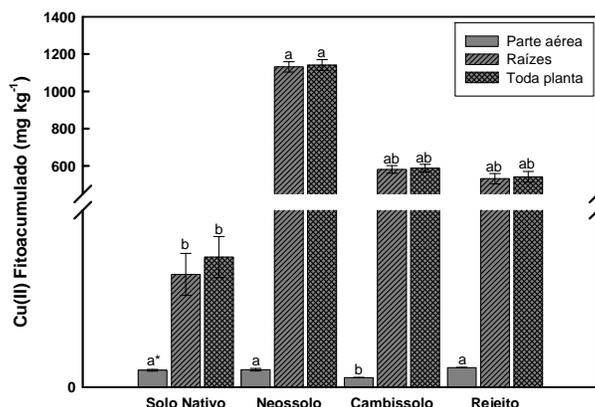


Figura 1. Concentrações de cobre na parte aérea, raízes e toda a planta, fitoacumulados por plantas de mamona em diferentes solos contaminados com sobre: Solo Nativo (Controle); Neossolo; Cambissolo e Rejeito de mineração de cobre (Rejeito). *Letras diferentes representam diferenças significativas ($P \leq 0,05$) em barras de mesma cor com teste de Tukey. Barras de erro é o erro padrão das médias.

Plantas de mamona apresentaram um forte potencial de fitorremocção de cobre dos solos contaminados com cobre (Figura 2). O maior potencial foi observado quando as plantas foram cultivadas em Neossolo, com mais de 5.900 g ha^{-1} de cobre removido. No Cambissolo e no rejeito de mineração de cobre, as plantas de mamona apresentaram um alto potencial para fitorremocção, com valores de 3.052 e 2.805 g ha^{-1} , respectivamente. Esses resultados indicam uma potencial aplicação desta planta na mitigação da contaminação de cobre nesses ambientes.

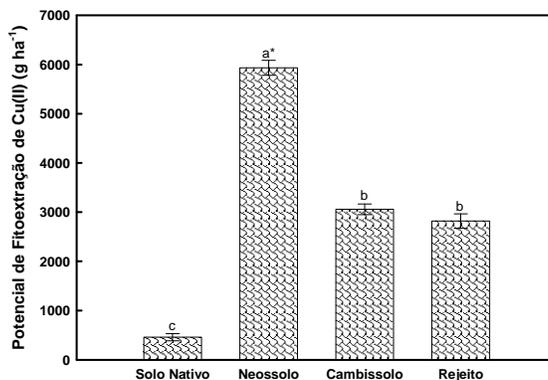


Figura 2. Potencial de fitorremocção de cobre por plantas de mamona em diferentes solos contaminados com cobre: Solo Nativo (Controle); Neossolo; Cambissolo e Rejeito de mineração de cobre (Rejeito). *Letras diferentes representam diferenças significativas ($P \leq 0,05$) em barras de mesma cor com teste de Tukey. Barras de erro é o erro padrão das médias.

Plantas de mamona apresentaram um baixo TF de cobre quando as plantas foram cultivadas no rejeito de mineração, Neossolo e Cambissolo, com valores de TF de 0,01, 0,01 e 0,03, respectivamente (Tabela 1). Entretanto, as plantas de mamona exibiram alta BCF, com valores de 5,47 e 4,10 nos solos de vitivinicultura, Neossolo e Cambissolo, respectivamente (Tabela 1). O rejeito de mineração de cobre promoveu o menor valor de BCF, com 0,97 em plantas de mamona (Tabela 1). O índice MER indicou valores elevados para Neossolo e

Cambissolo, com 2,59 e 1,07%, respectivamente, demonstrando o forte potencial de plantas de mamona para a extração de cobre a partir do solo e acumulação na biomassa. Plantas de mamona apresentaram o menor índice de MER para as plantas cultivadas em rejeito de mineração de cobre, com um valor de 0,49% (Tabela 1). A remoção de cobre mais eficiente pelas plantas de mamona foi observado quando as plantas foram cultivadas no Neossolo. Nossos resultados indicaram a necessidade de crescer 31.136 mudas de plantas (PENs) ou 187 plantas inteiras (PENt) por 57 dias para remover 1,0 g de cobre no Neossolo (Tabela 1). Plantas cultivadas no Cambissolo também indicaram altos valores de PENs e PENt, com 52.662 e 321 plantas, respectivamente, necessárias para remover 1,0 g de cobre a partir deste solo de vitivinicultura. Plantas de mamona cultivadas em rejeito de mineração de cobre apresentaram a menor capacidade para a remoção de cobre entre os solos contaminados com cobre, com valores de PENs e PENt de 72.752 e 781 plantas, respectivamente, necessária para remover 1,0 g de cobre a partir de rejeito da exploração de cobre, mas o valor de PENt ainda foi relativamente elevado.

Tabela 1. Fator de translocação (TF), fator de bioacumulação (BCF) ao cobre, relação de extração do cobre (MER), número efetivo de plantas da parte aérea (PENs) e número efetivo de toda planta (PENt) de plantas de mamona em diferentes solos contaminados com cobre: de Mata Nativa (Controle, sem contaminação); Neossolo, Cambissolo e rejeito de mineração de cobre (rejeito).

Soils	TF	BCF	MER	PENs	PENt
			----- % -----		
Native Soil	0.15	20.13	9.25	56306	3805
Inceptisol	0.01	5.47	2.59	31136	187
Mollisol	0.01	4.10	1.07	52662	321
Waste	0.03	0.92	0.49	72752	781

*Valores são o número médio de plantas de mamona capazes de remover 1 g de cobre após 57 dias de crescimento.

Nossas plantas apresentaram altas concentrações de cobre nas raízes e baixas concentrações de cobre na parte aérea. Um estudo prévio em que as soluções nutritivas foram contaminadas com várias concentrações de As, indicou que as concentrações de cobre na massa seca da parte aérea estava na faixa de 2-11 mg kg⁻¹ (Melo et al., 2009). Valores que o estudo são consistentes com nossos valores e sugerem uma faixa de segurança na biomassa da parte aérea das plantas de mamona. Plantas com um BCF superior a 1,0 podem ser consideradas como plantas hiperacumuladoras (Cluis, 2004). Assim, a mamona pode ser considerada como uma planta hiperacumuladora, com forte potencial de fitorremediação, como os nossos valores foram entre 5,47 e 4,10 nos solos de vitivinicultura. Além disso, nossos resultados para o BCF da mamona foram muito superiores aos de outras plantas hiperacumuladoras, como *Solanum nigrum* para As, que indicaram valores de BCF entre 0,09 e 0,48, mas valores semelhantes para Cd, variando entre 5,23 e 18,5 (Sun et al., 2008). A taxa de extração de metal (MER) é um índice que avalia a relação entre a acumulação do metal na parte aérea com relação sobre o acúmulo do metal no solo (Mertens et al., 2005). Nossos resultados indicaram uma alta MER para as plantas de mamona, quando foram cultivadas em solos contaminados com cobre, como nos solos de vitivinicultura e solo contaminado com resíduos da mineração de cobre. Nossos resultados foram superiores aos de outra planta hiperacumuladora (*Solanum nigrum*) em outros metais pesados, tais como As e Cd (Sun et al., 2008). O número de plantas efetivas (PEN) é definido como o número de plantas necessárias para extrair 1,0 g do metal quando a biomassa da parte aérea e total de plantas são considerados (García et al., 2004). *Piptatherum miliaceum*, uma grama hiperacumuladora, exibiu PENs para Pb de cerca de 1000 partes aéreas, e seu valor para o Cd era de aproximadamente 4300 plantas totais (PENt) (García et al., 2004). Entretanto, as plantas de mamona foram muito mais eficientes quando PENt foi analisado após 57 dias de crescimento, como o TF é baixo nesta espécie. Estes resultados indicam um forte potencial de plantas de mamona para fitoacumulação de cobre em toda a planta.

Conclusões

A mamona apresenta características de uma cultura bioenergética, rusticidade, alta produção do óleo, alta produção de fitomassa e alta tolerância à ambientes contaminados com metais pesados. Além disso, nossos resultados indicam um forte potencial para o crescimento das plantas de mamona em solos de vitivinicultura contaminados com cobre e resíduos da mineração de cobre. Nossos resultados apresentam a mamona como uma planta altamente hiperacumuladora de cobre. Estas características, juntamente com um forte potencial para fitoextração de cobre e fitoestabilização, promove a mamona como uma candidata muito útil, que é altamente aplicável como uma planta de biotecnologia para a fitorremediação de áreas contaminadas com cobre.

Agradecimentos

À CAPES pela concessão da Bolsa de Pós-Doutorado REUNI e ao CNPq pelo auxílio financeiro.

Referências

- ATLAS, R.M.; BARTHA, R. **Microbial Ecology: Fundamentals and Applications**. 4.ed. Menlo Park : Benjamin/Cummings Science Publishing, 1997. 694p.
- ANDREAZZA, R.; OKEKE, B.C.; LAMBAIS, M.R.; BORTOLON, L.; MELO, G.W.B.; CAMARGO, F.A.O. Bacterial stimulation of copper phytoaccumulation by bioaugmentation with rhizosphere bacteria. **Chemosphere**, v.81, p.1149-1154, 2010.
- CLEMENTE, R.; ALMELA, C.; BERNAL, M.P. A remediation strategy based on active phytoremediation followed by natural attenuation in a soil contaminated by pyrite waste. **Environmental Pollution**, v.143, p.397-406, 2006.
- CLUIS, C. Junk-greedy greens: phytoremediation as a new option for soil decontamination. **Biotechnology Journal**, v.2, p.60-67, 2004.
- GARCÍA, G.; FAZ, Á.; CUNNA, M. Performance of *Piptatherum miliaceum* (Smilo grass) in edaphic Pb and Zn phytoemediation over a short growth period. **International Biodeterioration and Biodegradation**, v.54, p.245-250, 2004.
- KAVAMURA, V.N.; ESPOSITO, E. Biotechnological strategies applied to the decontamination of soils polluted with heavy metals. **Biotechnology Advances**, v.28, p.61-69, 2010.
- MELO, E.E.C.; COSTA, E.T.S.; GUILHERME, L.R.G.; FAQUIN, V.; NASCIMENTO, C.W.A. Accumulation of arsenic and nutrients by castor bean plants grown on an As-enriched nutrient solution. **Journal of Hazardous Materials**, v.168, p.479-483, 2009.
- MERTENS, J.; LUYSSAERT, S.; VERHEYEN, K. Use and abuse of trace metal concentrations in plants tissue for biomonitoring and phytoextraction. **Environmental Pollution**, v.138, p.1-4, 2005.
- NEVEL, L.V.; MERTENS, J.; STAELENS, J.; SCHRIJVER, A.D.; TACK, F.M.G.; NEVE, S.D.; MEERS, E.; VERHEYEN, K. Elevated Cd and Zn uptake by aspen limits the phytostabilization potential compared to five other tree species. **Ecological Engineering**, v.37, p.1072-1080, 2011.
- SANTOS, F.S., HERNÁNDEZ-ALLICA, J., BECERRIL, J.M., AMARAL-SOBRINHO, N., MAZUR, N., GARBISU, C. Chelate-induced phytoextraction of metal polluted soils with *Brachiaria decumbens*. **Chemosphere**, v.65, p.43-50, 2006.
- SHI, G.; CAI, Q. Cadmium tolerance and accumulation in eight potential energy crops. **Biotechnology Advances**, v.27, p.555-561, 2009.
- SONG, J.; ZHAO, F.J.; LUO, Y.M.; MCGRATH, S.T.; ZHANG, H. Copper uptake by *Elsholtzia splendens* and *Silene vulgaris* and assessment of copper phytoavailability in contaminated soils. **Environmental Pollution**, v.128, p.307-315, 2004.
- SUN, Y.; ZHOU, Q.; DIAO, C. Effects of cadmium and arsenic on growth and metal accumulation of Cd-hyperaccumulator *Solanum nigrum* L. **Bioresource Technology**, v.99, p.1103-1110, 2008.