

TÉCNICAS DE BIORREMEDIAÇÃO MICROBIANA DE SOLOS CONTAMINADOS COM METAIS PESADOS

Juana Angélica Felipe Fernandes (*), Lígia de Nazaré Aguiar Silva

* Universidad de La Serena, juana.angelica@userena.cl

RESUMO

A expansão das atividades produtivas levou à contaminação dos solos por metais pesados (MP), considerado um problema global. Ao contrário dos poluentes orgânicos, os MP não podem ser decompostos por via biológica, física ou química, portanto, a remediação de locais contaminados por MP limita-se a alterar sua mobilidade e/ou toxicidade. Nesta linha, uma técnica de remediação econômica e ambientalmente correta é a biorremediação microbiana, que através de bactérias, actinomicetos, fungos e algas atua na transformação da valência, biosorção, precipitação química extracelular e volatilização dos MP. Assim, o objetivo deste estudo é descrever as aplicabilidades, vantagens e desvantagens da biorremediação microbiana, a fim de destacar fatores que possam auxiliar na sua possível escolha para diferentes casos/realidades de remediação de solos contaminados por MP. Para este fim, a metodologia adotada é descritiva e qualitativa, baseada em informações secundárias. Os resultados mostram que os principais fatores que afetam a biorremediação incluem as propriedades do solo (pH e textura) e clima (temperatura e precipitação), bem como o uso de microorganismos resistentes/tolerantes a contaminantes ou a inoculação de uma ou mais espécies com potencial de biorremediação conhecido. Entre as técnicas de biorremediação, as aplicadas *in situ* (bioaugmentação, bioestimulação e *bioventing*) são mais comuns que as de tratamento *ex situ* (*landfarming* e compostagem), pois são menos onerosas e geram menor impacto ambiental, econômico e social. A diversidade de microorganismos e técnicas de biorremediação pode abrir caminhos para a expansão de seu uso, entretanto, considerando os múltiplos fatores que podem interferir na biorremediação, é importante que projetos e estudos desse tipo tenham uma abordagem multidisciplinar para melhorar a compreensão da ecologia, fisiologia, evolução, bioquímica e genética dos microorganismos.

PALAVRAS-CHAVE: Metais pesados, remediação de solos, microorganismos.

INTRODUÇÃO

O solo é um material de superfície mineral e/ou orgânico da terra que sofreu algum grau de desgaste físico, biológico e químico, e serve como meio natural para o crescimento e desenvolvimento de vários organismos (IBGE, 2007; SSSA, 2020). A degradação ou contaminação do solo pode afetar as características físicas, químicas e biológicas do solo, afetando sua capacidade produtiva (Mallea, 2010).

Um dos poluentes do solo são metais pesados (MP), um problema global pois representam mais de 50% dos 10 milhões de locais contaminados, ou seja, com concentrações acima dos níveis de referência geográficos ou regulamentares (He et al., 2015). Isto se deve à sua não degradabilidade, o que os torna altamente persistentes no ambiente e acumulativos na cadeia alimentar (Kirpichtchikova et al., 2006). Este fator apresenta um risco à saúde humana e à produção de alimentos seguros devido às características toxicológicas dos metais pesados acima de um limite estabelecido (Kirpichtchikova et al., 2006; Liu et al., 2018).

Estes poluentes são introduzidos nos solos através de vapor, partículas de gases de combustão, RISES (cinzas e outros) e RILES provenientes principalmente a partir de atividades antropogênicas como mineração (acúmulos de minério estéril, e barragens de rejeitos), fundição, indústrias eletrônicas, têxteis e petroquímicas, consumo de combustíveis fósseis e agricultura (uso de fertilizantes, pesticidas, esterco, adubo, composto, biossólidos ou águas residuais com metais pesados em sua composição) (Alloway, 1995; Alcaino, 2012). Um exemplo do anterior é mencionado no estudo de Zhang et al. (2020), que detectou uma relação significativa entre as concentrações totais de Zn, Cu, Cd, As e Ni nos solos agrícolas e 58 minas abandonadas de ferro, cobre e chumbo-zinco na China.

No solo, estes metais podem ser dispersados por arraste de sedimentos, lixiviação em águas superficiais, infiltração em águas subterrâneas, dispersão por ventos e acumulando-se na cadeia alimentar. Portanto, para reduzir os riscos à saúde humana e ambiental, existem diferentes técnicas de remediação de metais pesados no solo, tais como o revestimento de superfície, encapsulamento, vazamento, lavagem do solo, extração eletro-cinética, estabilização, solidificação, vitrificação, fitorremediação e biorremediação (Fig. 1).

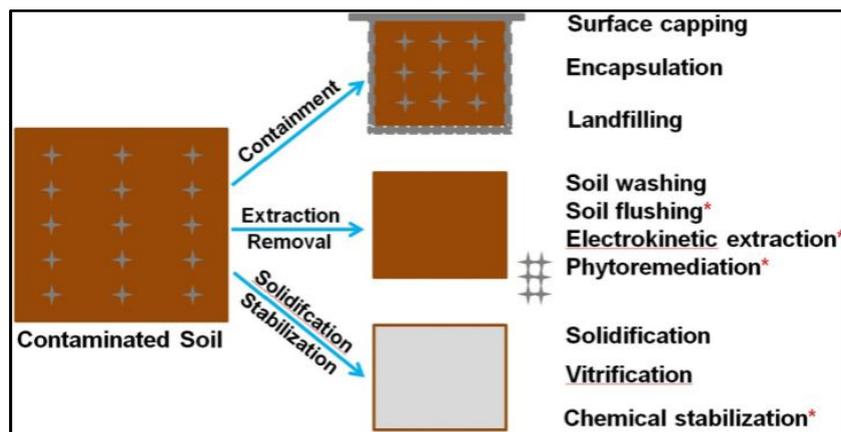


Fig. 1. Técnicas de remediação de solos contaminados por metais pesados. Fonte: Liu et al. (2018).

Estas técnicas podem ser caracterizadas em termos de local de aplicação (*in situ* ou *ex situ*), tipo de processo (físico, químico e biológico), nível de desenvolvimento (tradicional ou inovador) e objetivo adotado (contenção - que reduz a bioexposição, isolando-os do meio ambiente sem ter que agir sobre ele; extração/remoção - que diminui ou elimina sua concentração; e imobilização - que impede a dispersão/mobilidade) (Alcaino, 2012; Liu et al., 2018). Entretanto, devido à eficácia do tratamento em larga escala de tempo, as técnicas de remoção/remoção de contaminantes são mais favoráveis do que as de imobilização e contenção de contaminantes (Liu et al., 2018).

A escolha de cada tecnologia depende das características do solo e dos contaminantes, da eficácia esperada, da viabilidade técnica e econômica e do tempo necessário para a implementação. Entretanto, considerando que os processos físico-químicos são caros e pouco amigáveis como o meio ambiente, a biorremediação microbiana é uma técnica econômica e ambientalmente correta para a remediação de solos com metais pesados (Mishra et al., 2017).

OBJETIVO

Este estudo objetiva descrever aplicações, vantagens e desvantagens da biorremediação microbiana com o intuito de realçar fatores que possam auxiliar a possível escolha da remediação de solos em diferentes realidades.

METODOLOGIA

Este estudo tem um propósito descritivo, com foco na caracterização de técnicas de biorremediação microbiana de solos contaminados com metais pesados. Para isso, a base de pesquisa é bibliográfica, estruturada em dados secundários da área de ciências ambientais e naturais obtidos principalmente em bases de dados como Scielo, Scopus, ScienceDirect e Web of Science. Priorizou-se trabalhos publicados desde 2015, com uma pesquisa através dos seguintes descritores: "descontaminação do solo", "metais pesados no solo" e "remediação do solo". O tratamento das informações obtidas tem uma abordagem qualitativa que, segundo a definição de Lakatos e Marconi (2010), combina dados da bibliografia teórica e empírica, além de incorporar definições de conceitos, exame de teóricos e análise de problemas metodológicos. de um determinado tema, o que gera um panorama comparativo das principais características da biorremediação em diferentes contextos.

RESULTADOS

4.1. Principais fatores que afetam a biorremediação

As propriedades do solo e do clima (Tabela 1) têm um efeito importante na disponibilidade de metais pesados, onde se destacam o pH, textura, temperatura e precipitação (Khan et al., 2014; Zhong et al., 2020). Esses autores explicam que, com exceção do metalóide As, a disponibilidade de MP no solo aumenta em baixo pH, condição que diminui a adsorção de íons metálicos nas partículas do solo, aumenta a competição entre íons metálicos livres e outros cátions em solução do solo, além de interferir no metabolismo dos microrganismos. No caso de As é diferente porque geralmente existe como ânion, arseniato ou arsenito, ao invés de cátions na solução do solo. Além disso, a textura das partículas do solo é outro fator crítico, onde uma menor disponibilidade de PM é encontrada em solos argilosos de textura fina, seguida por franco argiloso, e a maior disponibilidade é encontrada em solos arenosos. Por outro lado, onde a temperatura e a precipitação são geralmente altas, a solubilidade e a biodisponibilidade dos metais também serão relativamente maiores do que nas outras regiões. Desta forma, as futuras estratégias de remediação devem focar na regulação do pH (pouco mais de 7,0), principalmente em áreas com altas temperaturas e chuvas, para manter baixas disponibilidades de MP nos solos.

Tabela 1. Principais fatores que afetam a biorremediação em solos contaminados. Fonte: Adaptado de Zhang et al. (2020).

Fatores	Remediação microbiana
pH	Biodisponibilidade de contaminantes, disponibilidade de nutrientes, fisiologia biológica e atividade enzimática, interação entre contaminantes
Temperatura	Biodisponibilidade de contaminantes, fisiologia biológica e atividade enzimática, eficiência de remediação de metais pesados e volatilização de contaminantes
Umidade	Biodisponibilidade de contaminantes e nutrientes, quantidade de oxigênio, crescimento e função das células microbianas, biomassa vegetal
Tipo de solo	Transporte e distribuição de nutrientes, oxigênio, água, poluentes e micróbios nos solos, conteúdo orgânico, taxa de biodegradação, interação entre poluentes coexistentes
Conteúdo orgânico	Biodisponibilidade de poluentes, fornecimento de nutrientes, interação entre poluentes
Fertilidade do solo	Taxa de biodegradação, atividade microbiana, biodisponibilidade de metais
Natureza dos contaminantes	Diferentes valências e formas de metais tem diferentes efeitos tóxicos no organismos, o que afeta a eficácia da remediação dos metais.
Concentração de metais	3 maneiras de afetar a atividade biológica: 1) Os íons MP podem reduzir a biorremediação ao afetar a síntese de polímeros celulares, a respiração e a divisão celular dos microrganismos; 2) baixas concentrações de MP podem promover biorremediação, enquanto altas concentrações inibem; 3) baixas concentrações de MP inibem a biorremediação, enquanto altas concentrações de MP inibem menos.
Interação entre contaminantes	Efeitos sinérgicos ou antagônicos na biodisponibilidade de poluentes, fisiologia biológica e atividade enzimática, afetam os processos de biorremediação
Especies	A capacidade dos organismos de absorver, transportar, acumular e metabolizar poluentes.

Os fatores mencionados são a base de uma biorremediação bem-sucedida considerando a sobrevivência do microorganismo no local contaminado. A bibliografia demonstra que tanto a diversidade quanto a estrutura dos micróbios do solo foram significativamente alteradas após a contaminação por metais pesados, diferenças que são dadas pelo grau de exposição e adaptabilidade aos contaminantes (Li et al. 2020, Dhaliwal et al. , 2020). Por esse motivo, uma estratégia de remediação do solo é a utilização de microrganismos autóctones resistentes / tolerantes a poluentes ou a inoculação de uma ou mais espécies com conhecido potencial de biorremediação, que são destacadas a seguir.

Fungos

Muitos fungos, como *Aspergillus sydowii*, *Penicillium griseofulvum*, *Trichoderma koningii*, *Paecilomyces marquandii*, *Clitocybe maxima*; *Pleurotus eryngii* e *Coprinus comatus* têm uso potencial na bioacumulação e bioexatção de Vanádio (V), Chumbo (Pb), Cu, Cd, Cd (II) e Zn em áreas co-contaminadas com herbicidas e pesticidas (Slaba et al., 2009; Zhou et al., 2015; Wang et al., 2017; Ceci et al., 2018; Nykiel-Szymańska et al., 2018; Zhang et al., 2019). Além da remediação do MP, esses autores explicam que os fungos podem aumentar e melhorar a biodegradação dos agroquímicos, e que a combinação de dois ou mais fungos (co-remediação) geralmente aumenta a eficiência do tratamento.

Bactérias

Diels et al. (1999) e Vaxevanidou et al. (2008) explicam que bactérias redutoras de ferro podem melhorar a liberação de MP como o As, fortemente associado ao óxido de ferro. Esta é uma opção em condições de pH menos agressivas do que em processos químicos com uso de ácidos. Outras bactérias (*Bacillus subtilis* e *Torulopsis bombicola*, por exemplo) também podem produzir biossurfactantes como surfactina, ramnolipídios, soforolipídios, escina e saponina para solubilizar metais nos solos (Açikel, 2011). Além disso, também podem promover a tolerância das plantas aos metais pesados e melhorar seu crescimento em solos contaminados (Mishra et al., 2017). Há também um histórico de relatos sobre o uso de bactérias marinhas e transgênicas para o tratamento de resíduos contaminados com mercúrio (Hg) (Chen e Wilson, 1997; Ruiz et al., 2011; Dash e Das, 2015), nos quais o as bactérias o absorvem ou transformam o metilmercúrio em Hg (II) e então o reduzem a Hg (0), que é menos tóxico e volátil.

Microalgas

De acordo com Sreekumar et al. (2020), as microalgas são capazes de atingir a biorremediação de forma eficiente por meio de dois mecanismos de bioassimilação e bioexatção. Eles têm a capacidade de crescer em água contaminada como "proliferação de algas" e assimilar vários contaminantes. A biomassa de algas, após a coleta e extração de lipídios/proteínas, pode ser usada como um biossolvente eficiente. A consideração cuidadosa de parâmetros como condições de crescimento, estrutura celular, pré-tratamento de biomassa, etc., pode resultar no desenvolvimento de uma

biomassa à base de microalgas de baixo custo com alto potencial de biorremediação para neutralizar e adsorver íons de metais pesados.

4.2. Técnicas de biorremediação

Em geral, a biorremediação de solos contaminados com PM é usada em conjunto com outras técnicas, como lavagem de solo e fitoextração, para promover a solubilização de metais pesados antes da extração (Liu et al., 2018). Os diferentes mecanismos de trabalho têm vantagens, desvantagens e aplicabilidade específicas (Tabela 2).

Tabela 2. Aplicabilidade, vantagens, desvantagens de técnicas de biorremediação. Fonte: Elaborado a partir de Ponce (2014).

Bioestimulação	
Aplicação	Aplicável a solos o mais homogêneos possível, com porosidade adequada e valor de permeabilidade ao ar (> 10-10 cm ²). Deve haver condições ótimas de pH (6 e 8), umidade (12-30% em peso), temperatura entre 0 e 40 °C e nutrientes em uma relação N: P de 10: 1
Vantagens	Muy útil en el tratamiento de extensas zonas contaminadas de centros industriales donde no es posible o conveniente parar el proceso operativo para realizar el tratamiento
Desvantagens	Não recomendado para solos argilosos, altamente estratificados ou muito heterogêneos, pois podem causar limitações na transferência de O ₂
Bioaeração	
Aplicação	Usado para estimular passivamente a biodegradação natural de poluentes. É usado principalmente para tratar solos orgânicos semivoláteis ou não voláteis.
Vantagens	Eficaz no tratamento de contaminações com compostos com baixa pressão de vapor (inferior a 1 mmHg), pois sua taxa de degradação é superior à de volatilização. Quando os custos de escavação são altos, a bioventação pode ser uma alternativa economicamente interessante. Não requer área adicional, nem o uso de maquinário pesado
Desvantagens	Baixo teor de umidade do solo e dificuldade de fluxo de ar na área contaminada. Requer características especiais do solo em termos de umidade, porosidade, condutividade hidráulica. Os tempos de limpeza podem durar de meses a anos
Bioaumentação	
Aplicação	Aplica-se quando microrganismos da microflora são insuficientes para degradar os contaminantes e quando é necessário tratamento imediato do local contaminado. Usado para tratar contaminação por inseticidas, herbicidas e resíduos com altas concentrações de metais
Vantagens	Não requer área adicional para realização do tratamento, nem o uso de maquinário pesado
Landfarming	
Aplicação	Usado para o tratamento de resíduos oleosos e borra oleosa de refinarias, sendo menos eficaz para óleo pesado (grandes tanques): <50.000 ppm de hidrocarbonetos e <2.500 ppm de metais pesados
Vantagens	É econômico em relação a outras técnicas de biorremediação. É um processo considerado de baixo nível tecnológico que não requer exigentes considerações de engenharia, e ao mesmo tempo permite fácil manipulação e controle das variáveis de projeto e operação.
Desvantagens	Requer grandes áreas de terra para disposição do solo e não é viável se não houver área suficiente. Quando a contaminação é profunda, os custos de escavação e movimentação de terra podem ser altos
Compostagem	
Aplicação	Aplica a maioria dos compostos orgânicos, sendo mais eficaz naqueles de rápida decomposição.
Vantagens	Eficiente para resíduos con bajas concentraciones de hidrocarburos. Por ser un sistema fechado permite maior controle das variáveis do processo
Desvantagens	Se gases ou vapores de hidrocarbonetos voláteis forem gerados ou se as condições climáticas afetarem adversamente o processo, a pilha de solo deve ser coberta com membranas ou coberta de forma semelhante às estufas. Os vapores gerados no processo devem ser coletados e tratados antes de serem lançados na atmosfera.

Em geral, a tratabilidade começa com técnicas que promovem o desenvolvimento de microrganismos com potencial para biorremediação seletiva de PM por inoculação por irrigação por aspersão ou galerias de infiltração (Liu et al, 2018). Poços de injeção podem ser usados se os contaminantes estiverem profundamente no solo. Nutrientes, oxigênio e outros aditivos são frequentemente aplicados juntos para estimular a atividade microbiana e melhorar o processo de biorremediação.

CONCLUSÃO

A diversidade de microrganismos e técnicas de biorremediação de solos contaminados com metais pesados pode abrir caminhos para expandir seu uso, principalmente para aplicações *in situ*, para reduzir custos e gerar o mínimo de perturbação do solo. Porém, considerando a multiplicidade de fatores que podem interferir na biorremediação, é importante que projetos e estudos desse tipo tenham um planejamento multidisciplinar para melhorar o entendimento da ecologia, fisiologia, evolução, bioquímica e genética dos microrganismos. Para solos com condições inadequadas para o crescimento microbiano, outras técnicas de tratamento podem ser precursoras para a biorremediação. Portanto, é importante avaliar o consórcio de técnicas de remediação, principalmente para solos com alto grau de contaminação que requerem tempos de tratamento mais longos.

REFERÊNCIAS

1. Açikel, Y.S., 2011. Use of Biosurfactants in the Removal of Heavy Metal Ions from Soils, In: Khan M., Zaidi A., Goel R., Musarrat J. (Eds) *Biomanagement of Metal-Contaminated Soils*. Environmental Pollution, 20. Springer, Dordrecht. https://doi.org/10.1007/978-94-007-1914-9_8
2. Alcaino, G. I. C., 2012. Análisis y comparación de tecnologías de remediación para suelos contaminados con metales. Tesis grado. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile. http://repositorio.uchile.cl/bitstream/handle/2250/113010/cf-alcaino_gc.pdf?sequence=1
3. Alloway, B.J., 1995. *Heavy metals in soil*, second ed. Blackie Academic and Professional, London.
4. Ceci, A., Pinzari, F., Riccardi, C., Maggi, O., Pierro, L., Petrangeli Papini, M., Gadd, G.M., Persiani, A.M., 2018. Metabolic synergies in the biotransformation of organic and metallic toxic compounds by a saprotrophic soil fungus. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 102, 1019–1033. <https://doi.org/10.1007/s00253-017-8614-9>
5. Chen, S., Wilson, D. B., 1997. Genetic engineering of bacteria and their potential for Hg²⁺ bioremediation. *Biodegradation*, 8, 97-103. <https://doi.org/10.1023/A:1008233704719>
6. Dash, H.R., Das, S., 2015. Bioremediation of inorganic mercury through volatilization and biosorption by transgenic *Bacillus cereus* BW-03(pPW-05). *International Biodeterioration & Biodegradation*, 103, 179-185. <https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2015.04.022>
7. Dhaliwal, S.S., Singh, J., Taneja, P.K., Mandal, A., 2020. Remediation techniques for removal of heavy metals from the soil contaminated through different sources: a review. *Environ. Sci. Pollut. Res.*, 27, 1319–1333. <https://doi.org/10.1007/s11356-019-06967-1>
8. Diels, L., De Smet, M., Hooyberghs, L., Corbisier, P., 1999. Biorremediación de suelos con metales pesados. *Mol. Biotechnol.*, 12, 149-158. <https://doi.org/10.1385/MB:12:2:149>
9. Garbisu, C., Alkorta, I., 2003. Basic concepts on heavy metal soil bioremediation. *The European Journal of Mineral Processing and Environmental Protection*, 3 (1), 58-66. <https://www.researchgate.net/publication/266292146>
10. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), 2007. *Manual Técnico de Pedologia*, second ed. IBGE, Rio de Janeiro. <https://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/livros/liv37318.pdf>
11. Khan, S., Reid, B. J., Li, G., Zhu, Y.-G., 2014. Application of biochar to soil reduces cancer risk via rice consumption: a case study in Miaoqian village, Longyan, China. *Environ. Int.*, 68 (4), 154-161. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2014.03.017>
12. Kirpichtchikova, T. A., Manceau, A., Spadini, L., Panfili, F., Marcus, M. A., Jacquet, T., 2006. Speciation and solubility of heavy metals in contaminated soil using X-ray microfluorescence, EXAFS spectroscopy, chemical extraction, and thermodynamic modeling. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 70 (9), 2163–2190. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2006.02.006>
13. Lakatos, E.M.; Marconi, M.A., 2010. *Fundamentos de metodologia científica: Técnicas de pesquisa*. 7th ed. Atlas, São Paulo.
14. Li, C., Zhou, K., Qin, W., Tian, C., Qi, M., Yan, X., Han, W., 2019. A Review on Heavy Metals Contamination in Soil: Effects, Sources, and Remediation Techniques. *Soil and Sediment Contamination: An International Journal*, 28 (4), 380-394. <https://doi.org/10.1080/15320383.2019.1592108>
15. Liu, L., Li, W., Guo, M., 2018. Remediation techniques for heavy metal-contaminated soils: Principles and applicability. *Science of The Total Environment*, 633, 206-219. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.03.161>
16. Mallea, I. M., 2010. Remediación de suelos contaminados y análisis de un proyecto piloto en Chile, en el marco del sistema de impacto ambiental.
17. Mishra, J., Singh, R., Arora, N.K., 2017. Alleviation of heavy metal stress in plants and remediation of soil by rhizosphere microorganisms. *Frontiers Microbiology*. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2017.01706>
18. Navarro-Aviño, J.P., Aguilar, A.I., López-Moya, J.R., 2007. Aspectos bioquímicos y genéticos de la tolerancia y acumulación de metales pesados en plantas. *Ecosistemas*, 6 (2), 10-25. <http://www.revistaecosistemas.net/articulo.asp?Id=488>

19. Nykiel-Szymańska, J., Bernat, P., Słaba, M., 2018. Potential of *Trichoderma koningii* to eliminate alachlor in the presence of copper ions. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 162, 1-9. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2018.06.060>.
20. Ponce, D. S. C., 2014. Biorremediación de suelos contaminados con hidrocarburos. (Ingeniero civil. Facultad de Ingeniería) Universidad del Bio-Bio, Concepción. <http://repobib.ubiobio.cl/jspui/bitstream/123456789/135/3/Ponce%20Contreras%2C%20Daniela.pdf>
21. Ruiz, O. N., Alvarez, D., Gonzalez-Ruiz, G., Torres, C., 2011. Characterization of mercury bioremediation by transgenic bacteria expressing metallothionein and polyphosphate kinase. *BMC Biotechnol*, 11, 82. <https://doi.org/10.1186/1472-6750-11-82>
22. Silveira, M.L., Alleoni, R.F., Guilherme, L.R.F., 2003. Biosolids and heavy metals in soils. *Scientia Agricola*, 60 (4), 64-111. <http://dx.doi.org/10.1590/S0103-90162003000400029>.
23. Soil Science Society of America (SSSA), 2020. SOIL BASICS: What is soil? <https://www.soils.org/about-soils/basics> (accessed 13 November March 2003).
24. Sreekumar, N., Udayan, A., Srinivasan, S., 2020. 11 - Algal bioremediation of heavy metals, In: Shah, M. P. (Eds). *Removal of Toxic Pollutants Through Microbiological and Tertiary Treatment*, Elsevier.
25. Wang, Y., Zhang, B., Chen, N., Wang, C., Feng, S., Xu, H., 2017. Combined bioremediation of soil co-contaminated with cadmium and endosulfan by *Pleurotus eryngii* and *Coprinus comatus*. *J Soils Sediments*, 18, 2136-2147. <https://doi.org/10.1007/s11368-017-1762-9>
26. Yacomelo, M.J., 2014. Riesgo toxicológico en personas expuestas, a suelos y vegetales, con posibles concentraciones de metales pesados, en el sur del atlántico. Tesis Maestría. Universidad Nacional de Colombia.
27. Yadav, K.K., Gupta, N., Kumar, V., Singh, J.K., 2017a. Bioremediation of heavy metals from contaminated sites using potential species: a review. *Indian J. Environ. Protect.*, 37 (1), 65-84. <https://www.researchgate.net/publication/313559185>
28. Yadav, K.K., Singh, J.K., Gupta, N., Kumar, V., 2017b. A review of nanobioremediation technologies for environmental cleanup: a novel biological approach. *Journal of Materials and Environmental Sciences*, 8 (2), 740-757. http://www.jmaterenvironsci.com/Document/vol8/vol8_N2/78-JMES-2831-Yadav.pdf
29. Yagnentkovsky, N., 2011. Aplicação de técnicas de biorremediación para el tratamiento de residuos industriales con alto contenido de metales pesados. Tesis Doctoral. Facultad de Ciencias Exactas. Universidad Nacional de La Plata, Buenos Aires. http://sedici.unlp.edu.ar/bitstream/handle/10915/2706/Documento_completo.pdf?sequence=1
30. Zhang, C., Tao, Y., Li, Tian, S. J., Ke, T., Wei, S., Wang, P., Chen, L., 2019. Simultaneous degradation of trichlorfon and removal of Cd(II) by *Aspergillus sydowii* strain PA F-2. *Environ. Sci. Pollut. Res.*, 26, 26844–26854. <https://doi.org/10.1007/s11356-019-05811-w>
31. Zhao, F.J., Ma, Y., Zhu, Y.G., Tang, Z., McGrath, S.P., 2015. Soil contamination in China: current status and mitigation strategies. *Environmental Science and Technology*, 49 (2), 750-759. <https://doi.org/10.1021/es5047099>
32. Zhong, X., Chen, Z., Li, Y., Ding, K., Liu, W., Liu, Y., Yuan, Y., Zhang, M., Baker, A. J M., Yang, W., Fei, Y., Wang, Y., Chao, Y., Qiu, R., 2020. Factors influencing heavy metal availability and risk assessment of soils at typical metal mines in Eastern China. *Journal of Hazardous Materials*, 400, 123289, <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.123289>.
33. Zhou, Z., Chen, Y., Liu, X., Zhang, K., Xu, H., 2015. Interaction of copper and 2,4,5-trichlorophenol on bioremediation potential and biochemical properties in co-contaminated soil incubated with *Clitocybe maxima*. *RSC Advances*, 5 (53), 42768-42776. <https://doi.org/10.1039/C5RA04861C>