
Biodegradação e biorremediação de metais pesados

Bruna Francini Lupepsa, Fernanda Carolina Reis Bergamo, Nislaine Mafé

<https://doi.org/10.4322/mp.978-65-84548-03-9.c2>

Resumo

A contaminação por metais pesados é um evento que ganhou importância a ser estudado pelos riscos gerados, em geral, à saúde humana e ao ecossistema. Com o aumento da extração e o depósito de rejeitos metálicos de maneira inadequada, surgem problemas ambientais e de saúde pública que vem se agravando com o passar dos anos no Brasil. O lançamento desses resíduos tóxicos atinge importantes cursos hídricos, contaminando a água e os alimentos ingeridos pela população, também leva a alterações metabólicas de organismos e plantas, podendo desencadear mutações levando a mutagênese e carcinogênese. Os efeitos podem ser potencializados quando combinados a outros metais, sofrendo bioacumulação em diferentes níveis tróficos. Para remediar ou minimizar estes riscos são necessários conhecimentos desses poluentes, portanto, esse trabalho propõe uma revisão literária sobre os principais metais pesados e seus efeitos sobre o meio ambiente.

Palavras-chaves: metais pesados, contaminação, ecossistema.

Abstract

Heavy metal contamination is a phenomenon that has gained importance and that is worth to be investigated because of the risks that it represents to the ecosystem and human health. With the steady increase in extraction and inadequate deposit of metal tailings, environmental and public health problems arise that have worsened over the years in Brazil. The release of these toxic residues reaches important water courses, leading to contamination of both water and food. Contamination also leads to metabolic changes in animals, plants and microorganisms, and can trigger mutations leading to mutagenesis and carcinogenesis. The effects can be potentiated when combined with other metals, undergoing bioaccumulation at different trophic levels. To remedy or minimize all these risks, knowledge about these pollutants is necessary. Therefore, this work proposes a literature review about the main heavy metals and their effects on the environment.

Key words: heavy metals, contamination, ecosystem.

1. Introdução

Metal pesado é um termo empregado para elementos metálicos com uma densidade superior a 5 g/cm^3 capazes de formar sulfuretos. Também apresentam elevados níveis de reatividade e bioacumulação, sendo capazes de desencadear diversas reações químicas não metabolizáveis, onde os organismos vivos não podem degradá-los, permanecendo em caráter cumulativo ao longo da cadeia alimentar (DUFFUS, 2002). São classificados como metais pesados o chumbo (Pb), cádmio (Cd), níquel (Ni), cobalto (Co), ferro (Fe), zinco (Zn), crômio (Cr), arsênio (As), prata (Ag) (GONÇALVES, 2002). Os metais ocorrem livres ou associados a outros elementos encontrados na natureza, na forma de depósitos minerais e até compondo moléculas biológicas importantes como a hemoglobina, a clorofila e os citocromos na cadeia respiratória. Dentro deste contexto, alguns metais participam como cofatores em várias reações enzimáticas, indispensáveis para a manutenção das atividades biológicas. A deficiência destes elementos, se tratando de seres humanos, pode acarretar anemias, diarreias, prejuízos no desenvolvimento e alterações de vias metabólicas (MONTEIRO & VANNUCCHI, 2010; REIS; VELLOSO; REYES, 2002). A presença de alguns metais em vegetais é indispensável porque participam da composição de biomoléculas, são cofatores enzimáticos e auxiliam na regulação osmótica. A alteração nos níveis de alguns íons metálicos pode acarretar interferências em reações e ciclos bioquímicos, levando a danos no desenvolvimento morfológico e trazendo inúmeros prejuízos para a cultura e ao próprio vegetal (TAIZ et al., 2017).

Dentre os metais pesados, pode-se citar (As), (Cd), (Pb), (Cu), (Cr) e (Hg) como os mais preocupantes, principalmente por estarem presentes em processos antropogênicos, o que alavanca sua disposição no meio ambiente. No Brasil, o Conselho Nacional de Meio Ambiente (CONAMA), estabelece a quantidade máxima permitida desses metais que podem ser encontrados em determinado efluente. Tanto a CONAMA, no Brasil, quanto a Environmental Protection Agency (EPA), nos Estados Unidos, são órgãos de proteção ambiental que, em conjunto com o crescente interesse da comunidade acadêmica, estimularam o crescimento de pesquisas envolvendo redução de poluentes em diversas áreas ambientais (DIAS et al., 2019).

Os metais pesados são inseridos no ambiente por várias fontes podendo ser natural, agrícola, industrial, atmosférica, efluentes domésticos entre outras. As fontes de metais pesados em solos agrícolas incluem o uso de fertilizantes, orgânicos e inorgânicos, calagem, lodo de esgoto, pesticidas e águas de irrigação. Os fertilizantes fosfatados apresentam níveis variáveis de cádmio, cromo, níquel, chumbo e zinco. Embora sejam considerados níveis baixos, o uso constante de fertilizantes a base de fosfato somado as características do solo ao qual será aplicado, durante um longo período de tempo, poderá ocorrer o acúmulo elevado de alguns destes metais (VERKLEJI, 1993). As operações de mineração emitem diferentes metais pesados, dependendo do tipo de extração, por exemplo, as minas de carvão são fontes de arsênio, cádmio e ferro. Processamentos como fundição utilizam altas temperaturas e emitem metais em formas de partículas e de vapor. As formas de vapor como arsênio, cobre, chumbo e selênio em contato com a água na atmosfera forma aerossóis que podem ser tanto dispersos pelo vento ou precipitado provocando contaminação de solos e água (VERKLEJI, 1993).

A utilização de metais pesados tem aumentado de forma intensa e contínua pela atividade antrópica e seus fins econômicos, levando a contaminação ambiental. Para os seres humanos, a contaminação por alguns metais pesados gera graves complicações a saúde, podendo causar câncer e até mesmo a morte do indivíduo (ANDREAZZA, 2013).

O propósito deste trabalho foi elaborar uma revisão bibliográfica sobre as características dos principais metais pesados e as informações publicadas sobre casos de contaminação ao meio ambiente. Para seleção dos artigos científicos, utilizou-se a base de dados Scopus. Foram utilizados como termos de buscas os seguintes: “biorremediação”, “metais pesados” e as combinações “biorremediação **ou** metais pesados” e “biorremediação **e** metais pesados” (em inglês “bioremediation” e “heavy metals” respectivamente). Foram encontrados 349 artigos na busca com a combinação “biorremediação **ou** metais pesados”, 37 artigos com a palavra “metais pesados” e 70 com a combinação “biorremediação **e** metais pesados”. Foram considerados para esta revisão, somente os artigos que possibilitam aos autores alcançar os objetivos pré-estabelecidos.

2. Principais metais pesados

2.1. Cobre (Cu)

O cobre é um elemento essencial a todos os seres vivos, inclusive aos humanos, pois atua como cofator de uma série de metalo-enzimas envolvidas na formação da hemoglobina e no metabolismo de carboidratos, xenobióticos e drogas, bem como nos mecanismos de anti-oxidação celular (ASEMAN-BASHIZ, 2014), é um micronutriente para as plantas, porém, alta concentração de cobre no solo pode ser tóxica aos microrganismos, plantas, animais e humanos. O cobre é rapidamente absorvido no estômago e no intestino, tendo sua concentração controlada no organismo por um mecanismo de homeostase que envolve a indução e síntese de metalotioneínas (ANDREAZZA, 2013). Apesar deste mecanismo prevenir parte da toxicidade de cobre, a exposição a níveis excessivos pode resultar em vários efeitos à saúde, incluindo danos ao fígado e aos rins, anemia, imunotoxicidade e desenvolvimento da toxicidade. Os sintomas mais comuns relacionados à exposição de altas concentrações de cobre são a disfunção intestinal, seguida de náusea, vômito e dor abdominal. Em casos de superexposição ao cobre e de outros elementos têm sido constatado o risco de câncer de pulmão e de estômago. Alguns metais pesados como cobre não são biodegradáveis apresentando uma dinâmica no solo bastante complexa (SOUZA, 2021).

O cobre é um dos metais cuja concentração é controlada pela legislação brasileira nos corpos hídricos. A portaria nº 888 de 4 de maio de 2021 estabelece o valor máximo permitido de cobre em manancial de consumo humano é de 2,0 mg/L já a Resolução CONAMA nº 430 de 13/05/2011, o limite máximo de cobre em lançamento de efluente é de 1,0 mg/L. Em um estudo realizado no Distrito Industrial de Santa Cruz, RJ, foram avaliados o solo de cultivo e as folhas de *Manihot esculenta crantz* (mandioca) com a finalidade de verificar a presença de metais pesados, e se a mandioca pode ser utilizada como indicadora de contaminação por esses metais. O estudo evidenciou a presença de cobre, zinco, cromo, cobalto, chumbo e cádmio acima do esperado como referência em vegetais; entretanto, o solo do cultivo em questão não apresentou estes metais na fração biodisponível. Essa presença nas folhas pode sugerir que a cultivar utilizada neste estudo tem a capacidade de absorver estes metais com maior facilidade, o que pode indicar uma capacidade deste vegetal de remediar e

indicar metais pesados no ambiente. A mandioca tem sido referida em estudos de remediação de metais pesados como Hg, Au, Cu, Zn e As e como bioindicadora (FLORES et al., 2019). No estado do Rio Grande do Sul, a contaminação com elevadas concentrações de Cu ocorreu na serra do nordeste, nas áreas de vitivinicultura, e na serra do sudeste, nas áreas de mineração de cobre. A videira é uma cultura que apresenta grande incidência de doenças. Entre as mais importantes está o míldio, ou mofo, causado pelo fungo *Plasmopara viticola*. Existem vários produtos recomendados para a prevenção e eliminação do míldio. Todavia, os produtores utilizam ainda em grande escala a calda bordalesa - mistura de sulfato de cobre e cal, diluídos em água, como fungicida preventivo da doença (AGUIAR, 2014). Para o cobre, as bactérias e os fungos do solo apresentam mecanismos para o transporte dentro de suas células. Determinadas proteínas protegem o micro-organismo dos efeitos tóxicos do metal, ligando-o a enzimas específicas (SOARES, 2011). Nas bactérias, pode ocorrer o transporte do metal através de gradiente quimiosmótico pela membrana citoplasmática, diminuindo seu potencial tóxico (NIES, 1999).

2.2. Zinco (Zn) e Cádmio (Cd)

Cádmio é um metal não essencial, é tóxico, teratogênico e carcinogênico e não possui papel biológico (WEIHUA et al., 2018). Este metal é obtido através da refinação de complexos de zinco e outros metais visto que não há mineral específico de cádmio explorável economicamente. É utilizado na indústria galvanotécnica e também em fertilizantes e fungicidas. O cádmio é liberado para o ar, solo e água por atividades humanas e é removido da atmosfera por simples deposição das partículas principalmente com a chuva (MALAVOLTA, 1994). O cádmio presente no solo traz grande preocupação, pois ele ameaça a biodiversidade, agricultura, a segurança alimentar e a saúde humana. E assim como outros metais, o cádmio também contamina a cadeia alimentar (WEIHUA et al., 2018). Diversas plantas têm a capacidade de retirar o cádmio do solo, porém, este metal bio acumula na planta e pode ser transferido ao homem via cadeia alimentar.

O Zinco (Zn) é um metal encontrado em praticamente todos os ambientes, é um micronutriente essencial para os organismos, além de compor proteínas, têm papel na regulação de processos biológicos e enzimáticos, atuando como

cofator. É também indispensável para o crescimento das plantas, porém, em altas concentrações, esse metal é potencialmente tóxico. A toxicidade do zinco nas plantas leva a diminuição da matéria seca da parte aérea e radicular. Muitos estudos têm demonstrado que o Zn presente nos fertilizantes pode ser uma prática agrônômica viável para reduzir cádmio. Pesquisas recentes têm mostrado a possibilidade de biorremediar esta situação utilizando fungos micorrízicos, considerando que eles têm apresentado tolerância ao excesso de zinco (CUBA, 2019).

2.3. Cromo (Cr)

O cromo trivalente é essencial para o organismo humano e em pequenas quantidades é recomendável para o funcionamento adequado do organismo. O cromo está associado com o metabolismo da glicose, colesterol e ácidos graxos, por outro lado, o cromo hexavalente é tóxico, pois consegue atravessar as membranas biológicas e modificar sua estrutura sendo assim, considerado cancerígeno e mutagênico. O estado natural do cromo no ambiente é o III, sendo assim, a presença do cromo VI no meio está associada às atividades antrópicas (HELENA, 2016). O cromo é um metal capaz de formar uma série de ligas, sendo assim, muito utilizado na indústria. Em estudo realizado na cidade de Daca (Bangladesh), foi identificada contaminação na porção comestível de vegetais cultivados, o tomate apresentou contaminação por cromo hexavalente, sugerindo que há ou havia atividade antrópica no local ou proximidades (DALTRO, 2020). Neste caso, não foram apresentadas medidas remediativas para o problema.

2.4. Arsênio (As)

O arsênio é um elemento com propriedades químicas não-metálicas e metálicas, sendo assim, considerado um semimetal (VIRGA, 2007). É também considerado um metal pesado, devido ao valor da sua densidade estimada em 5,7 g/ml e por suas características tóxicas. O arsênio é o principal constituinte de mais de 200 espécies minerais. Apresenta afinidade pelo enxofre, assim, é possível encontrá-lo em depósitos minerais de sulfeto como um mineral isolado ou como um constituinte-traço de outros minerais. A presença de arsênio a partir de fontes antropogênicas acontece por atividades que implicam na exploração

dos recursos naturais como as atividades de fundição, onde a contaminação ocorre na atmosfera sendo o ar seu principal meio de transporte, já no solo, o excesso de arsênio se dá pelas atividades agrícolas, esta pode contaminar também a água por processos de lixiviação que ocorre no solo, a água pode receber o excesso de arsênio por descarga de efluentes também (CARABANTES, 2003; LOZI, 2019).

Os compostos arsênicos podem ser biotransformados de 3 formas:

- **Oxirredução**, onde as bactérias aquáticas são capazes de oxidar o arsenito, como *Pseudomonas* sp. ou *Ferrobacillus* sp.
- **Metilação**, utilizado por microorganismos, bactérias, fungos, animais. Exemplos de espécies que metilam arsênio: *Scopulariopsis brevicaulix*, *Cândida humicola*, *Gliocadium roseum*, *Penicillium* sp., *Methanobacterium*, *Corynebacterium* sp., *Pseudomonas* sp., *Aeromonas* sp., *Enterobacter* sp., *Nocardia*, *B. coli Communis*, *B. lactis aerogenes*, *Veillonella alcalescens*, *Bacillus subtilis*, entre outros.
- **Bioconcentração**, que é a capacidade do organismo acumular arsênio nos tecidos. Esta forma de contaminação se dá através do consumo, tanto de animal quanto vegetal, onde a contaminação das águas pode afetar a comunidade planctônica e seguir a cadeia alimentar. As principais patologias provocadas por arsênio são: problemas no metabolismo, tumores cutâneos, úlceras, gastrites, diarreias, câncer, maior frequência de abortos espontâneos, anemias (CARABANTES, 2003; GONÇALVES, 2011).

2.5. Chumbo (Pb)

Dentre os vários metais poluentes, o chumbo pode ser o maior contaminante de solo, sendo o que oferece o maior risco de envenenamento aos seres humanos. Apesar de não ser um elemento essencial, o chumbo é facilmente absorvido e acumulado nas plantas. Isto faz com que o ser humano ao se alimentar da planta, ingira uma elevada quantidade de chumbo. No entanto, tal capacidade pode ser benéfica, onde a planta pode exercer o papel de retirada deste metal do solo. O excesso de chumbo causa vários sintomas de toxicidade nas plantas como inibição da fotossíntese e causa outros malefícios

a planta, assim, a remediação de áreas contaminadas é uma exigência e um compromisso necessário (ROMEIRO, 2007).

A atuação dos fungos e bactérias sobre o chumbo ocorre por retenção, recuperação e/ou remoção (ZANIN, 2009; CONICELLI, 2017). A remoção do chumbo pode ser intermediada por células de crescimento de cepas bacterianas e fúngicas, também, microrganismos como *Pseudomonas* podem ajudar com a absorção de chumbo, sendo esta uma alternativa para a remoção deste metal. A ação de algumas espécies de fungo pode acarretar biocorrosão do chumbo metálico e a sua transformação para um tipo mais estável e não tóxico. As bactérias ureolíticas também podem ser utilizadas na biorremediação de chumbo (BRAUN, 2019).

2.6. Mercúrio (Hg)

O mercúrio é obtido através do cinábrio, possivelmente por ações vulcânicas, um minério cuja estrutura química é o sulfeto de mercúrio (II). (SHIVANI et al., 2020). É um metal que se apresenta na forma líquida, em temperatura ambiente (RANI; SRIVASTAV; KAUSHAL, 2021), já que seu ponto de fusão é de $-38,83\text{ }^{\circ}\text{C}$ (SHIVANI et al., 2020). O mercúrio se apresenta de três formas: a forma mais pura, também chamada de Hg elementar (Hg^0), inorgânico (Hg^{+1} , Hg^{+2}) e orgânico. A forma orgânica existe de dois modos: metilmercúrio ($\text{R} - \text{Hg}^{+}$) e dimetilmercúrio ($\text{R} - 2\text{Hg}$). (JOSHI et al., 2021; SHIVANI et al., 2020). No ambiente aquático, Hg^0 é originado de diferentes fontes, incluindo a redução de Hg^{+2} , devido aos micro-organismos marinhos. A transformação do mercúrio inorgânico em metilmercúrio ocorre primariamente em sedimentos (EVI et al., 2014).

O mercúrio é um dos metais mais tóxicos e afeta negativamente tanto a saúde humana quanto o meio ambiente. A poluição por mercúrio vem progredindo intensamente na atmosfera devido à mineração e atividades industriais (JOSHI et al., 2021; SHIVANI et al., 2020; EVI et al., 2014). No meio ambiente, o mercúrio normalmente é encontrado em duas formas oxidadas: Hg (0) ou Hg (II), porém em meios aquosos, a forma Hg (II) é a mais comum e é essa forma que se se liga aos aminoácidos, através de ligações sulfidrilas (SH). Essa ligação modifica a estrutura proteica, que pode levar à perda da função. Por essa razão, o mercúrio é considerado o metal mais tóxico e prejudicial e que

causa mais problemas de saúde pública. (SHIVANI et al., 2020). O vapor de mercúrio pode afetar cérebro, fígado, as funções lipídicas, como alterar hormônios reprodutivos, como progesterona e estrogênio, também consegue atravessar a barreira placentária e prejudicar o desenvolvimento fetal. Afeta o sistema endócrino, causando mau funcionamento da glândula pituitária, adrenal e pâncreas. Outros acometimentos como perda de memória, depressão, alucinação, problemas cardíacos e pulmonares (RANI; SRIVASTAV; KAUSHAL, 2021).

Humanos são expostos ao mercúrio, não somente pela cadeia alimentar, como também em outras formas usuais como em termômetros, esfigmomanômetro, incineração de lixo hospitalar e material biológico, amálgamas odontológicas, baterias e emissão de combustível fóssil. (RANI; SRIVASTAV; KAUSHAL, 2021; SHIVANI et al., 2020; EVI et al., 2014). Também se acumula em vários animais aquáticos da cadeia alimentar, entrando assim, na alimentação humana e esse é um dos motivos mais comuns que o mercúrio se instala no organismo. Ao redor do mundo, peixes e frutos do mar têm sido detectados contaminados com metil mercúrio (SHIVANI et al., 2020). Em águas profundas, dos oceanos ao redor do mundo, têm se encontrado altos níveis de mercúrio (JOSHI et al., 2021). Já a biorremediação traz técnicas em que o custo e tempo são mais viáveis. E tem se espalhado largamente pelo mundo. Devido a isso há uma urgência para que essas técnicas possam ser aprimoradas para detectar mercúrio presente tanto na água quanto no solo. (RANI; SRIVASTAV; KAUSHAL, 2021). O limite aceitável de mercúrio na água pode variar entre 0.002 mg L^{-1} e 0.006 mg L^{-1} . Porém há autores que afirmam que não deve haver relaxamento nesse limite em relação à água potável para consumo. (RANI; SRIVASTAV; KAUSHAL, 2021). Atualmente, o foco principal das indústrias e agências reguladoras é minimizar poluentes muito tóxicos, como mercúrio, em poluentes menos tóxicos. Métodos convencionais físico-químicos que são usados para remediar o mercúrio têm maiores desvantagens e ainda deixam um volume alto de biomassa e sujeira de mercúrio que não é econômica nem ambientalmente viáveis. O uso então, de bactérias ou outros micro-organismos que transformam metais pesados e substâncias tóxicas em menos nocivas é chamado de biorremediação (SHIVANI et al., 2020).

A biorremediação do mercúrio com a bactéria mercúrio resistente (MRB) consiste em um amplo espectro de bactérias gram-positivas e gram-negativas que tem um mecanismo particular que converte mercúrio tóxico em uma forma não tóxica. Alguns desses mecanismos são: primeiramente, formar e vincular o grupamento tiol à várias formas de mercúrio, já que possuem alta afinidade, e diminuir a toxicidade; segundo, causar um obstáculo que impedirá o mercúrio entrar na bactéria (SHIVANI et al., 2020).

Em várias bactérias foram encontradas o plasmídeo com gene resistente ao mercúrio, como *Klebsiella pneumoniae*, *Pseudomonas*, *Bacillus spp*, *Enterobacter*, *Staphylococcus aureus*, *Sphingopyxi ssp.*, *Psychrobacter sp.*, *Brevibacillus sp.*, *Anoxybacillus sp.*, *Luteimonas sp.* and *Geobacillus kaustophilus*. Há também a fitorremediação ou também chamada de *green* remediação ou remediação botânica, ou seja, através das plantas. Elas sequestram o poluente ambiental. Essa é uma atividade promissora, amiga da natureza, utiliza-se de tecnologia verde, onde os custos e gastos energéticos não são caros (SHIVANI et al., 2020). Essa tecnologia verde, depende, principalmente, do meio microbiano que rodeiam plantas, raízes e solo de determinado local. Plantas podem extrair nitratos, metais, fosfatos e até alguns componentes tóxicos e reduzir a concentração desses contaminantes no solo. Também removem e degradam substâncias como água e íon, em seus processos fisiológicos normais. Para que ocorra a fitorremediação, precisa existir a interação da planta, com raízes, microbiota, solo e com metal/poluente (SHIVANI et al., 2020). Em um estudo recente, em solos de mineração de ouro, contaminados com mercúrio, avaliou-se a capacidade de fito extração da *Jatropha curcas*. O estudo mostrou que a planta conseguiu acumular mercúrio em seus tecidos durante um período de quatro meses de exposição. Outra planta com potencial foi *Oxalis corniculata*, esta quando tratada com tiosulfato de sódio, teve aumento na remediação em solos contaminados com mercúrio. (SHIVANI et al., 2020). Um outro estudo feito com a planta *Azolla caroliniana* obteve 93% do mercúrio removido da água. Com a planta *Typha domingensis*, o resultado foi parecido, 96% de remoção.

Os fungos também podem ser usados, já que são conhecidos por tolerar e detoxificar metais pesados, através de vários métodos. Vários autores têm descrito a utilização de microrganismos imobilizados, como *Pleurotus sajor caju*,

Trametes versicolor e *Aspergillus niger*, no processo que inclui métodos como atividade de bioissorção, transporte e precipitação intra e extracelular. Esses fungos podem ser usados na adsorção do mercúrio. Estudos com biomassa de *A. niger* mostrou-se eficaz para remover tanto mercúrio inorgânico (Hg^{+2}) quanto metil mercúrio (CH_3Hg^+) soluções aquosas, como efluentes poluídos (SALDANHA, 2003).

3. Conclusão

Inúmeras pesquisas têm sido feitas a fim de determinar possíveis aplicações de biorremediação, muitas delas têm apresentado resultados promissores, possibilitando, além de descontaminação ambiental agregar valor ao composto gerado ou biorremediados. A capacidade remediativa de organismos aplicada em áreas contaminadas por metais pesados já foi constatada por inúmeros estudos sendo uma forma barata e muitas vezes mais eficiente. É possível perceber o grande nível de significância em reforçar e apresentar à comunidade os estudos relacionados ao monitoramento do problema causado por metais pesados acumulados tanto no solo, na atmosfera, em água e em seres humanos, para que a humanidade e os ecossistemas possam progredir de forma ideal.

4. Referências

AGUIAR, R. M.; GABRIEL, M. L. D. S. Remediação de áreas contaminadas por cromo hexavalente: relato sobre gerenciamento de projeto. **Journal of Innovation, Projects and Technologies**, v.2, N. 1. Jan/Dez. 2014. DOI: 10.5585/iptec.v2i1.15

ANDREAZZA, R.; BORTOLON, L.; PIENIZ, S. Uso da mamona (*Ricinus communis* L.) de alto rendimento bioenergético como potencial fotorremediador de solos contaminados por cobre. **Pedoesfera**. 23(5): 651-661 (2013) DOI: [https://doi.org/10.1016/S1002-0160\(13\)60057-0](https://doi.org/10.1016/S1002-0160(13)60057-0)

ASEMAN-BASHIZ, E.; et al. Bioremediation of the soils contaminated with cadmium and chromium, by the earthworm *Eisenia fetida*. **Anuário do Instituto de Geociências – UFRJ**, V.37 – 2/2014 p.216-222. DOI: http://dx.doi.org/10.11137/2014_2_216_222

BRASIL. Portaria Gabinete do Ministro/Ministério da Saúde (GM/MS) nº 888 de 4 de maio de 2021. Ministério da saúde, 2017. Acesso em: 11 de janeiro de 2022.
BRASIL. Resolução CONAMA n. 430, de 13 de maio de 2011. Dispõe sobre as condições e padrões de lançamento de efluentes, complementa e altera a

Resolução n. 357, de 17 de março de 2005, do Conselho Nacional do Meio Ambiente – CONAMA. Diário Oficial da União, Brasília, 16 maio de 2011.

BRAUM, A. B.; TRENTIN, A. W. S.; VISENTIN, C.; THOMÉ, A. Biorremediação como alternativa de tratamento de solos contaminados com metais tóxicos. **Revista CIATEC – UPF**, v. 11 (2), p. 73-87, 2019.

CARABANTES, G.; LENA, A. *Contaminação do ambiente com arsênico e seus efeitos na saúde humana: uma revisão*. São Paulo, 2003. 124p. Disponível em: <Contaminação do ambiente com arsênico e seus efeitos na saúde humana: uma revisão... (usp.br)> Acesso em 10/01/2022.

CONICELLI, B. P. Biossorção de chumbo e mercúrio pelas linhagens selvagem e recombinante de *C. metallidurans* em meio aquoso. Dissertação de mestrado em ciências. IPEN. São Paulo, 2017. Disponível em: <2017ConicelliBiossorcao.pdf (usp.br) 2017ConicelliBiossorcao.pdf (usp.br)>

CUBA, R. M. F.; CINTRA, T. S.; PAIVA, D. C. C.; TERÁN, F. J. C. Influência do etanol como substrato na biorremediação de água contaminada com formulação comercial à base de glifosato. **Eng. Sanit. Ambient.** V. 24, n. 5 set/out (2019) 983-991. DOI:10.1590/S1413-41522019183574

DALTRO, R. R.; ANJOS, J. A. S. A.; RABELO GOMES, M. C.; Avaliação de metais pesados nos recursos hídricos do município de Boquira, no semiárido baiano – Brasil. São Paulo, UNESP, *Geociências*, v.39, n.1, p.139 – 152, 2020. DOI: <https://doi.org/10.5016/geociencias.v39i1.14013>

DIAS, G. et al. Biorremediação de efluentes por meio da aplicação de microalgas – uma revisão. **Química Nova**, v.42, n.8, 891-899, 2019. DOI: <http://dx.doi.org/10.21577/0100-4042.20170393>

DUFFUS, J.H. Heavy metals - A meaningless term? **Pure and Applied Chemistry**, v. 74, n. 5, p. 793-807, 2002. Disponível em <http://publications.iupac.org/pac/2002/pdf/7405x0793.pdf>. Acesso em 20/12/2021.

EVI, K. et. al. Potential bioremediation of mercury-contaminated substrate using filamentous fungi isolated from forest soil. **Journal of Environmental Sciences**, 26(6), 1223–1231, 2014. DOI:10.1016/S1001-0742(13)60592-6.

FLORES, V.R.; et al. Quantificação de metais pesados em folhas de mandioca (*Manihot esculenta chantz*) como potencial indicadores de contaminação ambiental. **Revista Episteme Transversalis**, Volta Redonda-RJ, v.10, n.3, p. 96-108, 2019. Disponível em: <<http://revista.ugb.edu.br/ojs302/index.php/episteme/article/view/1687>>. Acesso em: 11 jan. 2022.

GONÇALVES JUNIOR, A.C.; PESSOA, A.C.S. Fitodisponibilidade de Cádmiu, Chumbo e Crômio, em soja cultivada em argilossolo vermelho eutrófico a partir de adubos comerciais. **Scientia Agrária**, v.3, n.1-2, p.19-23, 2002. Disponível

em: <https://www.scielo.br/j/cagro/a/FYLbRKRmG4dk6Zv4bpN4Hfm/?lang=pt>
Acesso em 20/12/2021.

HELENA, L. P. I. Diagnóstico ambiental de solo contaminado por cromo de curtume em Motuca (SP) por métodos geofísicos. Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Instituto de Geociências e Ciências Exatas – Campus de Rio Claro, 2016. Disponível em:<Diagnóstico ambiental de solo contaminado por cromo de curtume em Motuca (SP) por métodos geofísicos (unesp.br)> Acesso em 03/12/2021.

JOSHI, G. et. al. Deep-sea mercury resistant bacteria from the Central Indian Ocean: A potential candidate for mercury bioremediation. **Marine Pollution Bulletin**, 169, 112549, 2021. DOI:10.1016/j.marpolbul.2021.112549.

LOZI, A. A. Toxicidade comparada dos metais pesados, arsênio, cádmio, chumbo, cromo e níquel, sobre parâmetros reprodutivos de camundongos machos adultos após exposição aguda. Departamento de biologia animal. Universidade Federal de Viçosa – MG. 2019. Disponível em:< TOXICIDADE COMPARADA DOS METAIS PESADOS, ARSÊNIO, CÁDMIO, CHUMBO, CROMO E NÍQUEL, SOBRE PARÂMETROS REPRODUTIVOS DE CAMUNDONGOS MACHOS ADULTOS APÓS EXPOSIÇÃO AGUDA (ufv.br)>.

MALAVOLTA, E. Fertilizantes e seu impacto ambiental, micronutrientes e metais pesados: mitos, mistificação e fatos. São Paulo: **Produquímica**, 1994. 153p.

MONTEIRO TH, VANNUCCHI H. Funções plenamente conhecidas de nutrientes: magnésio, São Paulo: *ISLI Brasil-International Life Sciences Institute do Brasil* 2010, 20p.

NIES, D.H. Microbial heavy-metal resistance. **Applied Microbiology Biotechnology**, v.51. p.730-750, 1999.

RAMÍREZ, M. E.; VÉLEZ, Y. H.; RENDÓN, L.; ALZATE, E. Potential of microalgae in the bioremediation of water with chloride content. **Brazilian Journal of Biology**, 2018, v. 78, n. 3, pp. 472-476. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/1519-6984.169372>

RANI, L., SRIVASTAV, A. L., & KAUSHAL, J. Bioremediation: An effective approach of mercury removal from the aqueous solutions. **Chemosphere**, 280, 130654, 2021. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2021.130654.

REBÊLO, A. G.; et al. Valores de referência da concentração de metais pesados em solos na Amazônia central. **Química Nova**, v. 42, n.5, 534-539, 2020. DOI: <http://dx.doi.org/10.21577/0100-4042.20170516>

REIS MAB, VELLOSO LA, REYES FG. Alterações do metabolismo da glicose na deficiência de magnésio. **Revista de Nutrição**15(3): 333-340, 2002.

ROMEIRO, S.; LAGÔA, A. M. M. A.; FURLANI, P. R.; ABREU, C. A.; PEREIRA, B. F. F. Absorção de chumbo e potencial de fitorremediação de *Canavalia*

ensiformes L. *Solos e Nutrição de Plantas*. **Bragantia** 66 (2), 2007. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0006-87052007000200017>

ROYCHOWDHURY, A.; SARKAR, D.; DATTA, R. Removal of acidity and metals from acid mine drainage-impacted water using industrial byproducts. **Environmental Management**. 2018. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00267-018-1112-8>

SALDANHA, M. A. D. Seleção e utilização de fungos filamentosos livres e imobilizados para remoção de metais pesados. Tese (doutorado Microbiologia), Instituto de Ciências Biológicas, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2003. Disponível em: <<https://repositorio.ufmg.br/bitstream/1843/35507/1/utiliza%C3%A7%C3%A3o%20de%20fungos%20filamentosos%20livres%20e%20imobilizados%20para%20a%20remo%C3%A7%C3%A3o%20de%20metais%20pesados.pdf>>. Acesso em: 12 jan, 2022.

SHIVANI, K. et. al. Recent developments in environmental mercury bioremediation and its toxicity: A review. **Environmental Nanotechnology, Monitoring & Management**, 13(), 100283, 2020. DOI:10.1016/j.enmm.2020.100283

SOARES, A.; FLORES, A. C.; MENDONÇA, M. M.; BARCELOS, R. P.; BARONI, S. Fungi in the bioremediation of degraded areas. **Erq. Inst. Biol.** 78 (2). Apr-Jun 2011. DOI: <https://doi.org/10.1590/1808-1657v78p3412011>

SOUZA, J. S.; SANTOS, M. M.; SANTOS, B. N.; SANTOS, N. M. M.; PINTO, L. C. Agricultura em áreas industriais e contaminação por metais pesados: estratégia para redução deste impacto ambiental. **Revista Brasileira de Geografia Física**. v.14, n.01 (2021) 322-331. Disponível em: <<https://periodicos.ufpe.br/revistas/rbgfe>> Acesso em 03 jan, 2022.

VERKLEJI, J.A. The effects of heavy metals stress on higher plants and their use as bio monitors. In: *Markert B (ed) Plant as bioindicators: indicators of heavy metals in the terrestrial environment*. New York: VCH, p. 415–424.

VIRGA, R. H. P.; GERALDO, L. P.; SANTOS, F. H. Avaliação de contaminação por metais pesados em amostras de siris azuis. **Ciência e Tecnologia de Alimentos** Campinas, 27(4): 779-785, out-dez, 2007. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0101-20612007000400017>

TAIZ L, ZEIGER E, MOLLER IM, MURPHY A. Fisiologia e Desenvolvimento Vegetal. 6.ed., Porto Alegre: Artmed, 2017, 858f.

ZANIN, C. I. C. B.; FIGUEIREDO, F. C. A. Remoção de chumbo (II) em sistemas por carvão ativado com vapor. **Química Nova** 32 (9), 2009. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-40422009000900015>

WEIHUA, P. et. al. Bioremediation of cadmium- and zinc-contaminated soil using *Rhodobacter sphaeroides*. **Chemosphere**, (), S0045653518300237, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2018.01.017>.

Autores

Bruna Francini Lupepsa, Fernanda Carolina Reis Bergamo, Nislaine Mafé

Programa de Pós-graduação em Bioquímica, Universidade Estadual de Maringá. E-mail: bruflopepsa@hotmail.com, carol_fcrb22@yahoo.com.br, nismafenismafe@gmail.com.