

Adsorventes naturais como controladores de poluentes aquáticos: uma revisão

Adsorbents natural as controllers of aquatic pollutants: a review

Leandro Fleck¹
Maria Hermínia Ferreira Tavares²
Eduardo Eyn³

Resumo: Nos últimos anos o desenvolvimento industrial acelerado tem aumentado a contaminação por metais tóxicos em cursos hídricos. Devido a sua baixa biodegradabilidade e alta toxicidade, novos adsorventes, mais baratos e eficientes, estão sendo pesquisados em todo mundo, como forma de diminuir os danos causados a saúde humana. Neste sentido, o presente trabalho tem como objetivo apresentar uma revisão bibliográfica acerca dos principais bioadsorventes utilizados para a adsorção de metais tóxicos em ambientes aquáticos, e os principais danos causados a saúde humana, quando estes metais são encontrados em concentrações superiores às permissíveis pela legislação vigente. Os principais metais tóxicos encontrados em ambientes aquáticos são Pb, Cr, Zn, Cu, As e Hg, altamente tóxicos a saúde humana, causando diferentes tipos de cânceres, danos cerebrais e renais, doenças do fígado, lesões nos ossos e problemas respiratórios. Diante disso, uma variedade de biomateriais está sendo utilizada com sucesso como adsorventes de diferentes íons metálicos em todo o mundo, como por exemplo, biocarvão produzido com diferentes resíduos agrícolas, quitosana e diferentes materiais celulósicos e hemicelulósicos. Biomassas de diferentes origens são excelentes materiais para o controle da poluição hídrica. Entretanto, o aproveitamento da biomassa como adsorvente natural para o controle da poluição ambiental tem sido pouco explorado em vários países, com destaque para o Brasil, um país rico em diferentes tipos de biomassas. Assim, o uso desses materiais como adsorventes é uma tecnologia inovadora no controle da poluição hídrica.

Palavras-chave: Cursos Hídricos; Toxicidade; Saúde Humana; Poluição Ambiental; Materiais Biológicos.

Abstract: *In recent years the accelerated industrial development has increased contamination by toxic metals into water resources. Due its low biodegradability and high toxicity, new adsorbents, cheaper and more efficient, are investigating on worldwide as a form of decrease the human health damage. On this way, this paper aims to present a bibliographic review on the main bioadsorbents used to toxic metals adsorption on aquatic environments, and also the main human health damage incidence when these metals are found on higher legislation permissible concentrations. The main toxic metals found on aquatic environments are Pb, Cr, Zn, Cu, As and Hg, highly toxic to human health, causing different types of cancers, brain damage and kidney, liver disease, lesions on bones and respiratory problems. Therefore, a variety of biomaterials are successfully be used as adsorbents of different metal ions around the world, like biomass produced from different agricultural waste, chitosan and different cellulosic materials and hemicellulosics. Biomasses from different origins are excellent materials for the hydric pollution control. However, the use of biomass as natural adsorbent to environmental pollution control has been little explored at several countries, especially Brazil, a country rich on different biomass types. Thus, the use of these materials as adsorbents is an innovative technology on water pollution control.*

Keywords: *Water Resources; Toxicity; Human Health; Environmental Pollution; Biological Materials.*

¹ Técnico em Gestão Ambiental; Discente do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola; Departamento de ciências exatas e tecnológicas - Universidade Estadual do Oeste do Paraná.

² Doutora e Mestre em Física, graduada em Química e Engenharia Química. Professora associada do Departamento de ciências exatas e tecnológicas - Universidade Estadual do Oeste do Paraná.

³ Doutor e Engenheiro Químico; Docente da UTFPR - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Câmpus Medianeira, Núcleo de Ciências Biológicas e Ambientais.

Introdução

Várias indústrias como consequência de sua produção, têm lançado uma grande quantidade de metais tóxicos no ambiente natural, afetando diretamente a saúde de plantas, animais e seres humanos (ZHON *et al.*, 2012). Neste sentido Rahmani *et al.* (2010), afirma que a utilização de metais tóxicos nas últimas décadas resultou no aumento do fluxo de substâncias metálicas em ambientes aquáticos.

A fim de satisfazer os padrões de qualidade da água e atender a normas legislativas emergentes (KING *et al.*, 2006), a concentração de metais tóxicos em águas residuais deve ser controlada (KIM *et al.*, 2005), uma vez que estes elementos químicos possuem densidade elevada e são tóxicos mesmo em baixas concentrações (BHARGAVA *et al.*, 2012). Segundo Guijarro-Aldaco *et al.* (2011), as águas residuais de várias atividades industriais são uma importante fonte de poluição ambiental, devido a elevada concentração de metais tóxicos em sua constituição.

A principal preocupação em relação à presença de metais tóxicos nos cursos hídricos se deve a toxicidade e baixa biodegradabilidade. Os principais danos causados pela presença de metais tóxicos em ambientes aquáticos são danos cerebrais e renais, doenças do fígado, lesões nos ossos (REPO *et al.*, 2011), câncer de pulmão, nariz e ossos, desconfortos e fraquezas, dores de cabeça, tonturas e problemas respiratórios (RAHMANI *et al.*, 2010).

A adsorção é um dos métodos mais populares e eficazes para a recuperação de metais tóxicos de soluções aquosas, principalmente pela flexibilidade de operação, assim, vários adsorventes são utilizados para remoção de íons metálicos tóxicos de efluentes industriais (PANG *et al.*, 2011), onde a maior eficiência é observada para concentrações inferiores a 100 ppm (GUIJARRO-ALDACO *et al.*, 2011). Gupta e Bhattacharya (2012), afirma que o método de adsorção é considerado uma das melhores tecnologias para remoção de metais tóxicos em todo o mundo.

Segundo Rodrigues *et al.* (2006), o fenômeno de adsorção ocorre devido a presença de diversos grupos funcionais que constituem a biomassa, tais como celulose, polioses, proteínas e lignina. Assim, a adsorção resulta de interações eletrostáticas e também da formação de complexos entre íons metálicos e os grupos funcionais presentes na superfície celular, quando estes exibem alguma afinidade química pelo metal. Neste mesmo sentido, Pietrobelli (2007), afirma que a adsorção consiste em um processo de separação relativamente simples, envolvendo o contato de uma fase fluida livre (liquida), com uma fase rígida permanente (adsorvente), granulada, que tem a propriedade de reter os metais tóxicos contidos no fluido. Como o metal concentra-se na superfície do adsorvente, quanto maior for essa superfície, maior será a eficiência da adsorção.

A bioadsorção de metais não é baseada num único mecanismo. Ela é composta por vários mecanismos que quantitativa e qualitativamente diferem de acordo com a biomassa utilizada, sua origem e forma de processamento. Os principais fatores que podem interferir diretamente no processo de bioadsorção de metais

tóxicos em ambientes aquáticos são: pH, tipo de cátion metálico, natureza e concentração do material adsorvente, salinidade, carbono orgânico dissolvido, alcalinidade e competição entre cátions (THOMÉ, 2008).

A remoção de metais tóxicos de soluções aquosas utilizando métodos convencionais como precipitação química, coagulação, adsorção com carvão ativado, troca iônica e processos de separação com membranas têm apresentado inúmeras desvantagens, como baixa eficiência, custo elevado e geração de resíduos tóxicos. Diante disso, adsorventes mais baratos e mais eficientes estão sendo investigados por cientistas em vários países do mundo (ZHON *et al.*, 2012).

Mesmo com vários estudos sendo desenvolvidos, é possível encontrar na literatura muitas revisões críticas sobre a remoção de metais tóxicos de soluções aquosas usando bioadsorventes. Em geral, recomenda-se pesquisas adicionais para otimizar o processo de adsorção (KRISHNAN *et al.*, 2011). Tais considerações justificam a busca contínua de materiais biológicos com capacidade de adsorção elevada, baixo custo e mecanismos de adsorção conhecidos (CHOWDHURY; MULLIGAN, 2011).

No Brasil são produzidos diversos produtos e resíduos agroindustriais em virtude da grande produção agrícola do país. Entretanto, a disposição final dos resíduos gerados nestes setores transformou-se num sério problema ambiental. Diante disso, a utilização desses resíduos como adsorventes de metais tóxicos em ambientes aquáticos é uma prática viável e com resultados promissores em todo o país (INYANG *et al.*, 2012).

Os processos de adsorção de metais tóxicos utilizando bioadsorventes é uma técnica que tem resultado em elevada eficiência de remoção, chegando a valores superiores a 50% na maioria dos estudos realizados. A utilização desses bioadsorventes, portanto, além de oferecer uma opção de baixo custo para a remoção de metais tóxicos dos cursos hídricos, oferece também uma alternativa de aproveitamento destes materiais, reduzindo o impacto ambiental de seu descarte (LUCENA *et al.*, 2012).

Como qualquer outro método de tratamento, a bioadsorção também apresenta algumas desvantagens. A principal desvantagem está relacionada à saturação da biomassa, ou seja, quando todos os sítios ativos estão ocupados é necessário realizar a dessorção do metal, ou substituir a biomassa (AHLUWALIA; GOYAL, 2007). Embora altamente promissor, o mecanismo da bioadsorção não está ainda bem entendido, limitando sua aplicabilidade. Neste sentido, o presente trabalho tem como objetivo apresentar uma revisão bibliográfica acerca dos principais bioadsorventes utilizados para a adsorção de metais tóxicos em ambientes aquáticos, e os principais danos causados a saúde humana, quando estes metais são encontrados em concentrações superiores às permissíveis pela legislação vigente.

Principais materiais utilizados como bioadsorventes em ambientes aquáticos

Uma variedade de biomateriais, tais como bactérias, leveduras, algas e fungos têm sido utilizados com sucesso como adsorventes de metais tóxicos em ambientes aquáticos (KIM *et al.*, 2005). Segundo Mudhoo *et al.* (2012), alguns bioadsorventes podem apresentar eficiência elevada para adsorção de inúmeros metais tóxicos, sem propriedades específicas, contudo, existem muitos bioadsorventes que são específicos para determinados tipos de metais. Sendo assim, ao escolher o material a ser utilizado como adsorvente de metais tóxicos, é necessário considerar a origem do mesmo. Na Figura 1 é possível observar os principais bioadsorventes recentemente testados e analisados quanto a sua eficiência de remoção de íons metálicos.



Figura 1- Bioadsorventes testados para remoção de diferentes íons metálicos
 Fonte: Adaptado de Mudhoo *et al.* (2012)

Segundo Pietrobelli (2007), o conhecimento da estrutura química dos bioadsorventes é essencial para modelar e prever seu desempenho em ligar metais em sistemas de purificação de água. De acordo com Chowdhury e Mulligan (2011), alguns estudos têm sido desenvolvidos para remoção de metais tóxicos de soluções aquosas utilizando materiais biológicos diversos, como por exemplo, biomassa fungica, resíduos de laranja, casca de caranguejo, pó de casca de ovo e carvão ativado produzido a partir de cascas de aveia. Entretanto,

existe uma procura contínua por materiais biológicos facilmente disponíveis, com elevada capacidade de adsorção e com mecanismos bem explicados.

Dentre os materiais utilizados como adsorventes, o biocarvão produzido a partir de resíduos agrícolas tem recebido especial atenção de pesquisadores, principalmente por ser uma biomassa barata e com propriedades físico-químicas adequadas para o processo de adsorção (INYANG *et al.*, 2012). Além disso, Krishnan *et al.* (2011), afirma que a utilização de biocarvão como adsorvente de metais tóxicos é atraente por sua elevada disponibilidade a partir de materiais renováveis, baixo custo e possibilidade de reutilização.

O desenvolvimento de tecnologias para adsorção de metais tóxicos de soluções aquosas por plantas são especialmente atraentes, uma vez que são materiais biodegradáveis, renováveis e podem ser gerenciados de forma sustentável, justificando sua utilização em larga escala. Neste sentido, casca de Citrus, polpa de beterraba e resíduos de frutas tem sido utilizados em pesquisas como materiais adsorventes de metais tóxicos em águas residuais (FOX *et al.*, 2012).

Moura *et al.* (2012), utilizou escamas de peixe (*Micropogonias furnieri*) como adsorvente de Cromo (Cr), sendo este um produto residual da pesca da Corvina brasileira. Há pelo menos duas razões que justificam a utilização de escamas de peixes como adsorventes de metais tóxicos: (i) as escamas de peixes apresentam a estrutura da superfície altamente desenvolvida, oferecendo um potencial de adsorção elevado para uma grande variedade de materiais dissolvidos no meio líquido; (ii) existe uma grande quantidade de material disponível, por ser considerado resíduo da pesca.

Recentemente, recursos naturais, como celulose e quitosana (polissacarídeo produzido através da deacetilação da quitina) têm motivado pesquisas em todo o mundo, como materiais passíveis de utilização como adsorvente de metais tóxicos em soluções aquosas. Neste sentido Peng *et al.* (2012), afirma que tal fato é justificado, devido a origem desses materiais, por apresentarem eficiência elevada e custos relativamente baixos, por serem materiais reutilizáveis e com elevado poder de adsorção. Assim, de acordo com Zhong *et al.* (2012), a biomassa lignocelulósica, composta principalmente por lignina, celulose e hemicelulose, é o mais popular dos recursos naturais utilizados como bioadsorventes de metais tóxicos em ambientes aquáticos.

Nos últimos anos, a utilização de vermicomposto (adubo orgânico produzido pela ação de minhocas) como bioadsorvente de metais tóxicos tem aumentado consideravelmente, contudo, poucos estudos são encontrados na literatura. Além disso, a eficiência da utilização de vermicomposto para remoção de metais tóxicos de soluções aquosas ou efluentes industriais não foi estudada em detalhe. A utilização de vermicomposto está voltada principalmente para remoção de Pb, Ni e Cr (MUDHOO *et al.*, 2012).

Principais metais tóxicos encontrados em ambientes aquáticos e seus efeitos

Os metais são componentes naturais da crosta terrestre, não podendo ser degradados ou destruídos. Diferentes metais tóxicos têm sido considerados como

substâncias perigosas para os organismos vivos. Sendo assim, a remoção de metais tóxicos de efluentes e cursos hídricos é importante para diminuir os riscos eminentes para diferentes formas de vida (ACAR; EREN, 2006).

Cobre (Cu) e Zinco (Zn) são metais encontrados com facilidade em ambientes aquáticos. Devido à aplicação de elevadas quantidades de fertilizantes na agricultura, e pela descarga de resíduos domésticos e industriais em cursos hídricos, ambos os metais podem acumular-se em sedimentos, serem transferidos para plantas e peixes, e como consequência atingir diretamente toda a cadeia alimentar pelo processo conhecido como bioacumulação (LI *et al.*, 2010).

A ocorrência de cobre no meio natural acima dos limites permitidos pela legislação vigente tem como principais fontes a corrosão das tubulações de latão por águas ácidas, efluentes industriais e domésticos, escoamento superficial e contaminação da água subterrânea a partir de usos agrícolas do cobre como fungicida e pesticida no tratamento de solos e efluentes (CASTRO, 2006).

O cobre é um elemento necessário para a manutenção da saúde humana por ser essencial para o correto funcionamento de numerosos processos bioquímicos em vertebrados (SANTOS *et al.*, 2010), mas como todos os metais tóxicos, em concentrações elevadas é considerado potencialmente tóxico. Por exemplo, a contínua inalação de aerossóis contendo cobre, está relacionada com o aumento de câncer de pulmão entre os trabalhadores expostos (ACAR; EREN, 2006). Além disso, King *et al.* (2006), afirma que concentrações elevadas de cobre no organismo humano pode causar uma série de problemas, como dores de estômago, desconforto intestinal, danos renais e anemia.

No nosso organismo, o elemento zinco é necessário para o correto funcionamento de mais de 300 enzimas responsáveis pela síntese e degradação de proteínas, lipídeos e ácidos nucleicos. Contribui também para a manutenção da integridade celular através da estabilização da estrutura molecular dos componentes celulares e desenvolve um papel essencial no sistema imunológico do organismo (LEGGETT, 2012). Contudo, a Organização Mundial da Saúde (OMS) recomenda a concentração máxima de zinco em águas consideradas como potáveis de $5,0 \text{ mgL}^{-1}$. Um dos grandes problemas relacionados à ingestão de concentrações elevadas de zinco no organismo está relacionado com eventos de intoxicação, causando ressecamento de músculos, dores de estômago e vertigens (CALISKAN *et al.*, 2011).

O zinco é uma substância muito comum, ocorrendo em água potável, no ar, no solo e em muitos alimentos. Efluentes industriais (mineração, combustão do carvão e de lixo de siderurgia) ou lixo tóxico podem acarretar aumento da concentração em água potável, levando a problemas na saúde humana. Zinco solúvel em solos pode contaminar águas subterrâneas (CASTRO, 2006).

Segundo Gupta e Rastogi (2008), dentre os metais tóxicos mais encontrados em cursos hídricos receptores de efluentes industriais o chumbo (Pb) é um dos mais perigosos, por não ser biologicamente eliminado e ser tóxico a maior parte da biota. Diante disso Bulgariu e Bulgariu (2013), afirmam que é essencial remover o chumbo dos cursos hídricos para evitar danos irreversíveis aos seres vivos, incluindo os seres humanos.

O chumbo é o metal pesado mais profuso no ambiente. Diversos estudos têm associado a exposição ao chumbo a efeitos adversos em diferentes sistemas do organismo humano, incluindo alterações neurológicas, hematológicas, metabólicas e cardiovasculares (QUITERIO *et al.*, 2006). Neste sentido Moreira e Moreira (2004), afirma que a toxicidade do chumbo gera desde efeitos claros ou clínicos, até efeitos sutis ou bioquímicos. Nas crianças os principais danos ocorrem no sistema nervoso, e nos adultos os cuidados são voltados para a neuropatia periférica e a nefropatia crônica. De acordo com Karthica *et al.* (2010), o chumbo se acumula principalmente em ossos, cérebro, rins e músculos, podendo causar doenças graves como anemia, doenças renais, distúrbios nervosos, e até mesmo a morte.

A contaminação de águas naturais por arsênio (As) é um fenômeno ambiental que afeta milhões de pessoas em todo o mundo. De acordo com a OMS a concentração máxima de arsênio em água potável não deve exceder 10 mgL^{-1} . O envenenamento por arsênio em larga escala, tem justificado o desenvolvimento de tecnologias acessíveis, de baixo custo, de elevada confiabilidade e que exige pouco ou nenhum combustível fóssil para sua remoção de águas naturais e residuais (FOX *et al.*, 2012).

De acordo com Chowdhury e Mulligan (2011), o arsênio ficou conhecido atualmente pela contaminação de águas potáveis utilizadas para consumo humano. Mesmo com a legislação vigente, concentrações acima do limite permitido são encontradas em cursos hídricos em vários países do mundo como Argentina, Índia e Paquistão. A liberação de arsênio no ambiente ocorre pela ação do homem sobre o meio natural e também, por processos naturais, como emissões vulcânicas, atividades biológicas e queima de combustíveis fósseis, o que tem motivado pesquisadores a desenvolver tecnologias emergentes, ou ainda, modificações em tecnologias tradicionais de adsorção já existentes.

O mercúrio (Hg) é outro metal constantemente encontrado em águas naturais, como resultado das atividades humanas. A principal preocupação em relação à contaminação por mercúrio se deve a sua toxicidade ao sistema nervoso central humano e a possibilidade eminente de bioacumulação na cadeia alimentar (HOU *et al.*, 2012). Segundo Park *et al.* (2008), a combustão de materiais diversos é a principal atividade humana responsável pela emissão de mercúrio no ambiente, em concentrações superiores as permissíveis pela legislação vigente. Tal fato tem motivado inúmeros países a desenvolver tecnologias de controle da emissão de mercúrio para o meio natural, com destaque especial para os Estados Unidos.

Neste sentido Yang *et al.* (2007), afirma que uma das principais fontes de emissão de mercúrio para o meio natural proveniente da ação antrópica está relacionada à queima de carvão. Assim, após alguns anos de produção de carvão, o nível de mercúrio orgânico em muitos cursos hídricos eleva-se a concentrações em que o consumo de peixe e água torna-se inseguro. Na Tabela 1 é possível observar um resumo dos principais metais tóxicos encontrados em soluções aquosas e seus efeitos na saúde humana.

Tabela 1. Principais tipos de metais tóxicos e seus efeitos na saúde humana.

Metais Tóxicos	Principais fontes	Efeitos na saúde humana	Nível permitido (ppm)
Arsênio	Pesticidas, fungicidas, fundição de metais	Bronquite, dermatite	0,02
Cádmio	Soldagem, galvanoplastia, planta fissão nuclear	Danos nos rins, bronquite, desordem gastrointestinal, câncer	0,06
Chumbo	Pintura, pesticida, fumaças, mineração	Problemas no fígado, danos gastrointestinais, retardo mental em crianças	0,1
Manganês	Soldagem, queima de combustíveis	Danos no sistema nervoso central	0,26
Mercúrio	Pesticidas, indústria de papel, baterias	Danos no sistema nervoso	0,01
Zinco	Refinarias, canalizações	Efeito corrosivo na pele, provoca danos na membrana nervosa	15

Fonte: Adaptado de Alluri *et al.* (2007).

Principais trabalhos desenvolvidos utilizando biomassa como adsorvente de metais tóxicos

É possível encontrar na literatura inúmeros trabalhos desenvolvidos utilizando biomassas vegetais e animais como bioadsorventes de metais tóxicos em ambientes aquáticos. Gonçalves Júnior *et al.* (2009), avaliou a eficiência da biomassa seca de aguapé (*Eichornia crassipes*) na remoção dos metais tóxicos cádmio (Cd), chumbo (Pb), cromo (Cr), cobre (Cu), zinco (Zn) e níquel (Ni) de soluções preparadas com estes metais. Exceto para o metal níquel, para todos os outros metais a biomassa seca de aguapé apresentou remoções significativas. Rodrigues *et al.* (2006), avaliando a capacidade da madeira Paraju (*Manilkara longifolia*), modificada quimicamente com ácido cítrico, na remoção dos metais cobre (Cu) e cádmio (Cd), observou resultados semelhantes, contudo, observou-se uma diminuição na capacidade adsorvente da madeira para reter cádmio na presença de cobre, sugerindo que existe uma competição entre os metais pelos grupos de adsorção.

Câmara *et al.* (2009), estudou o desempenho de algas marinhas (*Sargassum filipendula*) no tratamento de efluentes industriais contendo zinco (Zn), em ciclos de adsorção-dessorção. Esta espécie de alga marinha se mostrou um material eficiente na adsorção de zinco, apresentando elevado potencial de adsorção após a realização de dez ciclos consecutivos. Pietrobelli (2007), utilizando macrófita aquática (*Egeria densa*) para remoção dos íons metálicos cádmio (Cd), cobre (Cu) e zinco (Zn) de solução aquosa, verificando a influência da temperatura, pH e tamanho das partículas do material adsorvente sobre a eficiência de adsorção,

concluiu que o material adsorvente utilizado se mostrou eficiente para remoção dos metais tóxicos sob teste de soluções aquosas.

Klimach *et al.* (2010), avaliou a eficiência do processo de adsorção de chumbo (Pb) utilizando sementes trituradas de Moringa Oleifera (*Moringa pterygosperma*) e argila em ambientes aquáticos. Os resultados obtidos evidenciaram que a argila possui maior poder de adsorção do íon chumbo quando comparado as sementes de Moringa Oleifera. Demir e Arisoy (2007), analisaram os custos e benefícios das remoções químicas e biológicas de cromo (Cr). Os autores compararam a remoção de cromo por *Bacillus thuringiensis* com a remoção do mesmo íon por uma resina de troca iônica. De acordo com o resultado da comparação, o custo por unidade na remoção química é mais alto, mas é mais alta também a porcentagem de remoção (99,68% para remoção química e 59,3% para remoção biológica), no entanto, a remoção biológica trás inúmeros benefícios para a saúde humana e para o meio natural, o que justifica o interesse industrial em optar normalmente por métodos biológicos em detrimento dos métodos químicos.

Silva e Fernandes (2010), avaliaram a remoção de cromo (Cr) e chumbo (Pb) de efluentes laboratoriais, utilizando serragem de Massaranduba (*Manilkara huberi*) e Ipê (*Tatoebuia ochracea*). A adsorção de chumbo foi maior para os dois tipos de serragem utilizados. Para o chumbo o percentual de remoção foi de 91,625% e 91,812%, respectivamente para a serragem de Massaranduba e Ipê. Para o cromo o percentual de remoção foi de 86,399% e 79,269%, respectivamente para a serragem de Massaranduba e Ipê. Todavia, isso não significa que o poder de adsorção é menor para o cromo, uma vez que a amostra utilizada para condução do ensaio de bioadsorção apresentou um menor percentual de cromo (37,016%), quando comparado ao chumbo (97,152%). Assim, os autores concluem que a serragem é um excelente material adsorvente, por se tratar de um material abundante e de baixo custo.

Considerações finais

A poluição dos cursos hídricos nacionais pelo lançamento de metais tóxicos se tornou uma grande preocupação para os gestores ambientais, já que apresentam diversos efeitos adversos aos ecossistemas, devido principalmente as alterações físico-químicas causadas na água. Diante disso, os efeitos nocivos dos metais tóxicos sobre a saúde humana e animal vêm sendo pesquisados constantemente nos últimos anos, devido aos graves acidentes ocorridos, os quais resultaram em inúmeras mortes ou seqüelas permanentes na população. Os métodos clássicos de remoção de metais tóxicos de soluções aquosas se tornam muitas vezes inviáveis, devido a aspectos técnicos e econômicos, além disso, normalmente geram um resíduo de difícil tratamento, altamente tóxico.

A constante busca por tecnologias inovadoras para o controle da concentração de metais tóxicos em ambientes aquáticos tem comprovado que a técnica de adsorção é uma das mais utilizadas em todo mundo, devido a sua simplicidade e eficiência. Contudo, muitos materiais utilizados como adsorventes são caros, e de caráter não renovável, o que inviabiliza o processo. Assim, a utilização de adsorventes provenientes da biomassa vegetal e animal surgem como uma

opção viável frente aos métodos tradicionais de adsorção, principalmente por serem de caráter renovável, facilmente biodegradável, de eficiência elevada e custos reduzidos.

Comprova-se, portanto, que biomassas de diferentes origens são excelentes materiais para o controle de poluentes em ambientes aquáticos. Entretanto, o aproveitamento da biomassa como adsorventes naturais para o controle da poluição ambiental tem sido pouco explorado em vários países, com destaque para o Brasil, um país rico em diferentes tipos de biomassas. Assim, o uso desses materiais como adsorventes é uma tecnologia inovadora no controle da poluição hídrica.

Mesmo sendo uma técnica emergente, a utilização de biomassa como adsorvente de metais tóxicos em cursos hídricos deve ser constantemente estudada, principalmente devido aos riscos da rápida saturação de sítios ativos de algumas biomassas, a sensibilidade do processo de adsorção para valores elevados de pH, e ao fato da recuperação de alguns metais tóxicos ser limitada para determinados adsorventes.

Após a utilização da biomassa como bioadsorvente de metais tóxicos, é necessária a correta destinação desses materiais, pois devido à elevada concentração de íons metálicos, estes se tornam passivos ambientais, com riscos eminentes ao meio natural. Uma alternativa para viabilizar ainda mais o processo de bioadsorção de metais é realizar a regeneração da biomassa utilizada pelo processo de dessorção, que consiste em retirar da biomassa os metais extraídos do meio aquático de maneira a se obter uma solução com concentrações elevadas do metal adsorvido. Assim, a biomassa pode ser reutilizada em etapas posteriores do processo de bioadsorção, dispensando a utilização de nova quantidade de material adsorvente para a realização do tratamento. Este poderá ser um tema retratado em trabalhos futuros.

Referências

ACAR, Filiz Nuran; EREN, Zeynep. Removal of Cu (II) ions by activated poplar sawdust (Samsun Clone) from aqueous solutions. **Journal of Hazardous Materials**. v.137, n.1, p.909-914, mar. 2006.

AHLUWALIA, S. S; GOYAL, D. Microbial and plant derived biomass for removal of heavy metals from wastewater. **Bioresource Technology**. v.98, n.1, p.2243-2257, 2007.

ALLURI, Humi Karnika; RONDA, Srinivasa Reddy; SETTALLURI, Vijaya Saradhi; SING, Jayakumar; SURYANARAYANA, Bondili. Biosorption: An eco-friendly alternative for heavy metal removal. **African Journal of Biotechnology**. v.6, n.25, p.2924-2931, dez. 2007.

BHARGAVA, Atul; CARMONA, Francisco; BHARGAVA, Meenakshi; SRIVASTA, Shilpi. Approaches for enhanced phytoextraction of heavy metals. **Journal of Environmental Management**. v.105, n.1, p.103-120, agost. 2012.

BULGARIU, Dumitru; BULGARIU, Laura. Sorption of Pb(II) onto a mixture of algae waste biomass and anion exchanger resin in a packed-bed column. **Bioresource Technology**. v.129, n.1, p.374-380, 2013.

CALISKAN, Necla; KUL, Ali Riza; ALKAN, Salih; SOGUT, Eda Gokirmak; ALACABEY, Ihsan. Adsorption of Zinc(II) on diatomite and manganese-oxide-modified diatomite: A kinetic and equilibrium study. **Journal of Hazardous Materials**. v.193, n.1, p.27-36, out. 2011.

CASTRO, Sebastião Venâncio. **Efeitos de metais pesados presentes na água sobre a estrutura das comunidades bentônicas do alto Rio das Velhas-MG**. Belo Horizonte: UFMG, 2006. 110 p. Dissertação (Mestrado)- Programa de Pós-Graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2006.

CHOWDHURY, Md. Rashdul; MULLIGAN, Catherine. Biosorption of arsenic from contaminated water by anaerobic biomass. **Journal of Hazardous Materials**. v.190, n.1-3, p.486-492, jun. 2011.

Congresso Brasileiro de Engenharia Química em Iniciação Científica, 50, 2010, Cuiabá. **Anais**. Cuiabá: MEC, 2010.

Congresso Brasileiro de Química, 8., 2009, Uberlândia. **Anais**. Uberlândia: MEC, 2009, p.1-5.

DEMIR, A; ARISOY, M. Biological and chemical removal of Cr (VI) from waste water: cost and benefit analysis. **Journal of Hazardous Materials**. online, 2007.

FOX, Dawn; PICHLER, Thomas; YEH, Daneil; ALCANTAR, Norma. Removing Heavy Metals in Water: The Interaction of Cactus Mucilage and Arsenate (As (V)). **Environmental Science Technology**. v.46, n.1, p.4553-4559, mar. 2012.

GONÇALVES JÚNIOR, Affonso Celso; SELZLEIN, Claudemir; NACKE, Herbert. Uso de biomassa seca de aguapé (*Eichornia crassipes*) visando à remoção de metais pesados de soluções contaminadas. **Acta Scientiarum. Technology**. v.31, n.1, p.103-108, 2009.

GUIJARRO-ALDACO, Alejandro; HERNANDEZ-MONTOYA, Verginia; BONILLA-PETRICIOLET, Adrian; MONTES-MORAN, Miguel; MENDOZA-CASTILLO, Didilia. Improving the Adsorption of Heavy Metals from Water Using Commercial Carbons Modified with Egg Shell Waste. **Industrial Engineering Chemistry. Research**. v.50, n.15, p.9354-9362, jun. 2011.

GUPTA, Susmita Sen; BHATTACHARRYA, Krishna Gopal. Adsorption of heavy metals on kaolinite and montmorillonite: a review. **Physical Chemistry Chemical Physics**. v.14, n.19, p.6698-6723, mar. 2012.

GUPTA, V. K; RASTOGI, A. Biosorption of lead(II) from aqueous solutions by non-living algal biomass *Oedogonium* sp. and *Nostoc* sp.—A comparative study. **Science direct**. v.64, n.1, 170-178, 2008.

HOU, Jiaai; LU, Rongjie; SUN, Mingyang; BAIG, Shams Ali; TANG, Tingmei; CHENG, Lihua, XU, Xinhua. Effect of heavy metals on the stabilization of mercury(II) by DTCR in desulfurization solutions. **Journal of Hazardous Materials**. v.217-218, n.1, p.224-230, mai. 2012.

INYANG, Mandu; GAO, Bin; YAO, Ying; XUE, Yengwen; ZIMMERMAN, Andrew; PULLAMMANAPPALLIL, Pratap; CAO, Xinde. Removal of heavy metals from aqueous solution by biochars derived from anaerobically digested biomass. **Bioresource Technology**. v.110, n.1, p.50-56, abr. 2012.

KARTHIKA, C; VENNILAMANI, N; PATTABHI, S; SEKAR, M. Utilization of Sago Waste as an Adsorbent for the Removal of Pb(II) from Aqueous Solution: Kinetic and Isotherm Studies. **International Journal of Engineering Science and Technology**. v.2, n.6, p.1867-1879, 2010.

KIM, Tae-Young; PARK, Sun-Kyu; CHO, Sung-Yong; KIM, Hwan-Beom; KANG, Yong; KIM, Sang-Done; KIM, Seung-Jai. Adsorption of Heavy Metals by Brewery Biomass. **Korean journal of chemical engineering**. v.22, n.1, p.91-98, nov. 2005.

KING, P; SRINIVAS, P; KUMAR, Y. P; PRASAD, V. S. R. K. Sorption of copper(II) ion from aqueous solution by *Tectona grandis* l.f. (teak leaves powder). **Journal of Hazardous Materials**. v.136, n.1, p.560-566, jan. 2006.

KRISHNAN, K. A. SREEJALEKSHMIM, K. G; BAIJU, R. S. Nickel(II) adsorption onto biomass based activated carbon obtained from sugarcane bagasse pith. **Bioresource Technology**. v.102, n.22, p.10239-10247, nov. 2011.

LEGGETT, R. W. A biokinetic model for zinc for use in radiation protection. **Science of The Total Environment**. v. 420, n.1, p.1-12, mar. 2012.

LI, Ying; YUE, Qinyan; GAO, Baoyu. Adsorption kinetics and desorption of Cu(II) and Zn(II) from aqueous solution onto humic acid. **Journal of Hazardous Materials**. v.178, n.1-3, p.455-461, jun. 2010.

LUCENA, G. L; SILVA, A. G; HONÓRIO, L. M. C; SANTOS, V. D. Cinética de Adsorção de cobre (II) utilizando bioadsorventes. **Scientia Plena**, v.8, n.9, p.1-6, 2012.

MOREIRA, Fatima Ramos; MOREIRA, Josino Costa. Os efeitos do chumbo sobre o organismo humano e seu significado para a saúde. **Revista Panamericana de Salud Pública**. v.15, n.2, p.119-129, 2004.

MOURA, Karine; VIEIRA, Eunice; CESTARI, Antonio. The use of solution microcalorimetry to evaluate chemically modified fish scales as a viable adsorbent for heavy metals. **Journal of Thermal Analysis and Calorimetry**. v.107, n.3, p.999-1005, mar. 2012.

MUDHOO, Ackmez; GARG, Vinod; WANG, Shaobin. Removal of heavy metals by biosorption. **Environmental Chemistry Letters**. v.10, n.2, p.109-117, jun. 2012.

PANG, Yang; ZENG, Guangming; TANG, Lin; ZHANG, Yi; LIU, Yuanyuan; LEI, Xiaoxia; LI, Zhen; ZHANG, Jiachao. PEI-grafted magnetic porous powder for highly effective adsorption of heavy metal ions. **Desalination**. v.281, n.1, p.278-284, out. 2011.

PARK, K. S; SEO, I. C; LEE, S. J; LEE, J. H. Emission and speciation of mercury from various combustion sources. **Powder Technology**. v.180, n.1, p.151-156, 2008.

PENG, Xin-Wen; ZHONG, Lin-Xin; REN, Jun-Li; SUN, Run-Cang. Highly Effective Adsorption of Heavy Metal Ions from Aqueous Solutions by Macroporous Xylan-Rich Hemicelluloses-Based Hydrogel. **Journal of agricultural and food chemistry**. v.60, n.15, p.3909-3916, abr. 2012.

PIETROBELLI, Juliana Martins Teixeira de Abreu. **Avaliação do potencial de bioadsorção dos íons Cd (II), Cu (II) e Zn (II) pela macrófita *Egeria densa***. Toledo: UNIOESTE, 2007. 87 p. Dissertação (Mestrado)- Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Toledo, 2007.

QUITERIO, Simone Lorena; MOREIRA, Fatima Ramos; SILVA, Celia Regina Souza; ARBILLA, Graciela; ARAUJO, Ulisses César; MATTOS, Rita Cássia. Avaliação da poluição ambiental causada por particulado de chumbo emitido por uma reformadora de baterias na cidade do Rio de Janeiro, Brasil. **Caderno de saúde pública**. v.22, n.9, p.1817-1823, 2006.

REPO, Evelina; WARCHOL, Jolanta; BHATNAGAR, Amit; SILLAMPAA, Mika. Heavy metals adsorption by novel EDTA-modified chitosan-silica hybrid materials. **Journal of Colloid and Interface Science**. v.358, n.1, p. 261-267, jun. 2011.

RHAMANI, A; MOUSAVI, H. A; FAZLI, M. Effect of nanostructure alumina on adsorption of heavy metals. **Desalination**. v.253, n.1-3, p.94-100, abr. 2010.

RODRIGUES, Rafael Falco; TREVENZOLI, Rafael Lopes; SANTOS, Luciano Rodrigues Gomes; LEÃO, Versiani Albes; BOTARIO, Vagner Roberto. Adsorção de metais pesados em serragem de madeira tratada com ácido cítrico. **Engenharia Sanitária Ambiental**. v.11, n.1, p.21-26, mar. 2006.

SANTOS, E. M; WILLIAMS, T. D; BALL, J. S; WU, H; ORTEGA, F; AERLE, R. V; KATSIADAKI, I; FALCIANI, F; VIANT, M. R; CHIPMEN, J. K; TYLER, C. R. Identifying Health Impacts of Exposure to Copper Using Transcriptomics and Metabolomics in a Fish Model. **Environmental Science Technology**. v.44, n.1, p.820-826, 2010.

SILVA, Marcia Lima; Fernandes, Nedja Suely. Análise da serragem de madeira utilizada como adsorvente dos metais Cr^{+3} e Pb^{+2} de resíduos laboratoriais. **Publica**. v.6, n.1, p.37-45, 2010.

THOMÉ, Luciara Ciane Port. **Bioacumulação de íons de Pb^{+2} na macrófita *Salvinia auriculata***. Toledo: UNIOESTE, 2007. 87 p. Dissertação (Mestrado)- Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Toledo, 2008.

YANG, Hongqun; XU, Zhenghe; FAN, Maohong; BLAND, Alan; JUDKINS, Roddie. Adsorbents for capturing mercury in coal-fired boiler flue gas. **Journal of Hazardous Materials**. v.146, n.1, p.1-11, abr. 2007.

ZHONG, Lin-xin.; PENG, Xin-wen; YANG, Dong; SUN, Run-cang. Adsorption of Heavy Metals by a Porous Bioadsorbent from Lignocellulosic Biomass Reconstructed in an Ionic Liquid. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**. v.60, n.20, p.5621-5628, mai. 2012.

Recebido em: 06/03/2013

Aceito em: 25/06/2013