

USO DA BIOMASSA DE ALGAS COMO BIOSORVENTE PARA REMOÇÃO DE METAIS PESADOS: UMA REVISÃO

USE OF ALGAE BIOMASS AS A BIOSORBENT FOR THE REMOVAL OF HEAVY METALS: A REVIEW

Leila Cristina Bugs¹, Patrícia Mara Cupertini¹, Taís Carla Wolf¹, Helen Treichel²

¹ Graduandas em Engenharia Ambiental e Sanitária, UFFS-Erechim. E-mails: le.cristinab@gmail.com, paticupertini@gmail.com, tais.wolf@gmail.com

² Professora do curso de Engenharia Ambiental e Sanitária da UFFS – Erechim. E-mail: helentreichel@gmail.com

RESUMO

Neste trabalho busca-se realizar uma revisão bibliográfica referente aos processos de biossorção para remoção de metais pesados utilizando a biomassa de algas como biossorvente. Para tanto, inicialmente, faz-se uma análise sobre os tipos de algas, seguida da descrição dos principais processos utilizados para a produção do biossorvente e do processo de biossorção. E, por fim, são apresentados diversos resultados que são referência para esse estudo e que representam as melhores condições de operação da coluna de adsorção, além da eficiência do processo. Com base nestes resultados, pôde-se concluir que o uso de algas no processo de adsorção de metais pesados é eficiente e inovador, entretanto, seu uso apresenta algumas limitações, que devem ser analisadas para proporcionar a melhor condição de operação.

Palavras-chave: Biossorção, Biomassa de algas, Metais pesados, Adsorção.

ABSTRACT

In this work, a bibliographic review of biosorption processes for the removal of heavy metals using algae biomass as a biosorbent is carried out. To do so, initially, an analysis is made on the types of algae, followed by a description of the main processes used for the production of the biosorbent and the biosorption process. And finally, several results are presented that are reference for this study and that represent the best conditions of operation of the adsorption column, besides the efficiency of the process. Based on these results, it was concluded that the use of algae in the adsorption process of heavy metals is efficient and innovative, however, its use has some limitations, which must be analyzed to provide the best operating condition.

Keywords: Biosorption, Algae biomass, Heavy metals, Adsorption.

1. INTRODUÇÃO

De acordo com Farnane et al. (2017), a qualidade dos corpos de água é constantemente comprometida devido ao lançamento de efluentes industriais, visto que os elevados índices de contaminação por metais ocorrem, principalmente, por conta desse tipo de lançamento indevido.

Dentre os metais que são eliminados com maior frequência para os ecossistemas, pode-se citar o arsênio, cádmio, cromo, cobre, chumbo, níquel, cádmio e mercúrio. Estes compostos podem apresentar graves riscos para o meio ambiente e para os seres humanos (WUANA; OKIEIMEN, 2011). Os metais possuem grande toxicidade e podem bioacumular no decorrer da cadeia alimentar, são não-biodegradáveis, possuem poder carcinogênico e podem ser absorvidos em órgãos e tecidos, representando um grande problema ambiental, já que quando dispostos de maneira inadequada podem contaminar a água e isso pode provocar diversos danos ao meio ambiente e também a saúde humana (LIANG et al, 2017; HE; CHEN, 2014; Yi et al., 2016).

Devido ao fato de não serem biodegradáveis, sua remoção é considerada desafiadora, para tanto, deve-se desenvolver novas tecnologias que possuam baixo custo e que efetivamente removam esses compostos (HE; CHEN, 2014). Desse ponto de vista, diversas pesquisas voltaram-se para a remoção desses contaminantes, e um dos processos que é bastante utilizado é a biossorção (BARQUILHA et al, 2017, JAKÓBIK-KOLON et al., 2017).

Ao longo dos anos a utilização de algas para diversas finalidades vem aumentando, isso se deve ao fato de que estão sendo realizadas diversas pesquisas sobre as aplicações desse tipo de biomassa. Ripoll et al. (2017) e Vassilev e Vassileva (2016) apontam que a biomassa de algas é muito utilizada na produção de biocombustíveis e produtos químicos. Segundo Anastopoulos e Kyzas (2015), as algas possuem, ainda, outras aplicações em diversas áreas, como produção de alimentos e outros produtos. Rashid et al. (2013), Wen et al. (2011) e Wang et al. (2010) utilizaram a biomassa de algas para produção de energia elétrica. As algas possuem diversas vantagens, como a diversidade de locais onde podem ser produzidas, crescimento acelerado, boa produtividade, boa adaptabilidade (ZHAO, 2014) e alto teor de lipídeos, dependendo da espécie (VIÊGAS et al. 2015; TRIVEDI et al. 2015).

A utilização de algas para processos de biossorção é uma opção viável, devido ao fato de que possui baixo custo (FLORES-CHAPARRO et al, 2017) e a alta capacidade de adsorção, de crescer novamente nos locais de cultivo e por serem muito abundantes em diversos lugares (HE; CHEN, 2014). Além disso, o processo de biossorção através de algas é considerado simples, com pouca geração de resíduos, fácil de operar e com possibilidade de regeneração do adsorvente (Yi et al., 2016).

Bulgariu e Bulgariu (2016) destacam que além de cultivar as algas especialmente com a finalidade de transformá-la em um adsorvente, pode-se optar por utilizar os resíduos das mesmas e que são gerados em alguns processos, como exemplo os resíduos de algas gerados a partir da produção de biodiesel, posteriormente ao processo de extração. Nesse caso, haveria reaproveitamento do resíduo gerado e, conseqüentemente, redução de custos com tratamento ou destinação final adequada para os resíduos de algas.

Desse modo, objetivou-se realizar uma revisão bibliográfica referente a utilização da biomassa de algas para produção de biossorventes. Inicialmente faz-se um histórico do uso da biomassa de algas, seguido da apresentação dos tipos de algas e da aplicação dos biossorventes produzidos com esse tipo de biomassa para remoção de alguns metais pesados.

2. HISTÓRICO DA UTILIZAÇÃO DA BIOMASSA DE ALGAS

Defanti et al. (2010), citam que ao longo dos anos a demanda por energia vem aumentando, devido ao crescimento da população mundial e do consumo de bens e produtos. Entretanto, esse consumo desmedido é causa de grandes conflitos regionais e também é responsável pela maior emissão de Gases do Efeito Estufa (GEE), que podem ser muito danosos ao meio ambiente. Logo, com as pesquisas busca-se novos tipos de fontes de energia.

Para Craigie (2010), o grande avanço no uso de algas foi na época da Segunda Guerra Mundial, quando foi criada a *Scottish Seaweed Association Limited* que objetivava promover estudos referentes a utilização de algas voltadas para áreas de pesquisa do interesse da indústria. O autor ainda afirma que, após uma parada nas pesquisas, estas voltaram a ocorrer no Instituto de Biociências Marinhas, NRCC, Halifax. Posteriormente, outros institutos de pesquisa - como Chevron, Exxon e NASA - deram continuidade nos estudos relacionados com o uso da biomassa de algas, além de proporem formas para a implantação de sistemas comerciais relacionados (SILVA; BACHOLSKY; JERÔNIMO, 2015).

Pode-se verificar, então, um crescente aumento de publicações referentes a algas bem como pesquisas voltadas para a utilização da sua biomassa, principalmente após a década de 1970, ano em que foram publicados cerca de 600 trabalhos nessa área. Desta década em diante houve um aumento exponencial do número de publicações, esse fato mostra que cada vez mais busca-se pela utilização de biomassa de algas para diferentes aplicações (CRAIGIE, 2010). Esta citação pôde ser comprovada após a realização de uma pesquisa simples no site do Science Direct, onde somente para o ano de 2017

obteve-se 9.650 publicações relacionadas com algas. Essa é uma boa justificativa para estudos relacionados com esse tipo de biomassa, para tanto, a seguir apresenta-se uma breve caracterização da classificação das algas.

3. TIPOS DE ALGAS

As algas englobam amplos grupos de seres vivos aquáticos e autotróficos, ou seja, conseguem produzir a energia necessária ao seu metabolismo através da fotossíntese. Pode-se afirmar que estes organismos são divididos em dois grandes grupos: as microalgas e as macroalgas (CHISTI, 2007).

As espécies de algas mais utilizadas para remoção de íons de metais pesados são: *Cladopora sericonides*, *Chlamydomonas reinhardtii*, *Chlorella vulgaris*, *Scenedesmus acuminatus*, *Halimeda gracilis*, *Sargassum bevanom*, *Spirulina platensis*, *Ulva lactuca*, *Cladophora hutchinsiae*, *Sargassum ilicifolium* (BULGARIU e BULGARIU, L., 2013; JAVADIAN *et al.*, 2013; AL-HOMAIDAN, *et al.*, 2014; JAYAKUMAR, RAJASIMMAN, KARTHIKEYAN, 2014; TABARAKI e NATEGHI, 2014; BIRUNGI & CHIRWA, 2015; EBRAHIMI *et al.*, 2016; BULGARIU e BULGARIU, 2016; TUZEN, SAN, BAGDA, 2017).

As algas citadas anteriormente podem ser classificadas em microalgas e macroalgas. De acordo com Mata et al, (2009), as microalgas são organismos fotossintéticos procariontes (cianobactérias) ou eucariontes (algas verdes) que se desenvolvem rapidamente e vivem em condições adversas no meio ambiente, estando presentes tanto em locais aquáticos, quanto terrestres.

Compreendem uma variedade de espécies de organismos autotróficos de estrutura simples, o que possibilita que as mesmas convertam facilmente a energia solar em energia química, gerando uma gama de substâncias que são empregados para consumo humano, suplementos, fármacos, polímeros, biofilmes, biorremediação e na produção de biocombustíveis (ARAÚJO et al, 2012). Além de representar uma excelente alternativa para a produção de energia, decorrente da elevada taxa de duplicação de biomassa e produção de óleo (BRENNAN; OWENDE, 2010).

De acordo com Sheehan et al, (1998) as microalgas podem ser divididas em quatro grupos em termos de sua abundância:

- I) Algas verdes: encontradas em maior abundância em água doce e compreendem quatro classes: Micromonadophyceae, Carophyceae, Ulvophyceae e Chlorophyceae (TOMASELLI, 2004). Esta classe de algas foi responsável por dar origem aos vegetais superiores.
- II) Diatomáceas (Bacillariophyceae): contemplam as principais microalgas do fitoplâncton dos oceanos, porém também são encontradas em águas doce e salobra. Contemplando uma gama de 100. 000 espécies.
- III) Cianobactérias (Cyanophyceae): apresentam morfologia semelhante das bactérias e estão presentes em diferentes habitats, contemplando aproximadamente 2.000 espécies. Desempenham uma importante função na fixação de nitrogênio atmosférico.
- IV) Algas pardas (Chrysophyceae): apresentam diferentes colorações e pigmentos bastante complexos. Encontradas com maior frequência em água doce, são conhecidas nessa classe a existência de aproximadamente 1.000 espécies.

A interação entre os fatores químicos, físicos e biológicos são determinantes para o desenvolvimento das microalgas. Os fatores físico-químicos interferem no crescimento das algas e estão condicionados aos fatores: temperatura, luz, salinidade, pH, disponibilidade de nutrientes, enquanto que os fatores biológicos referem-se às próprias taxas metabólicas da espécie cultivada (RAVEN et al., 2001). Já as macroalgas são produtoras primários que auxiliam na sustentação da vida nos mais diversos ambientes aquáticos e, portanto, desempenham um papel ecológico fundamental na manutenção destes ecossistemas (DAPPER et al., 2014).

Existe um extenso grupo de macroalgas, estas podem ser classificadas como algas verdes (Chlorophyta), marrons ou pardas (Phaeophyta) e algas vermelhas (Rhodophyta), de acordo com os pigmentos que possuem (KHAN et al., 2009).

Segundo Dapper (2014), o uso das algas na agricultura vem se destacando ao longo dos anos, sendo que as algas marrons são as mais utilizadas na agricultura, seguidas pelas algas verdes e pelas vermelhas.

4. UTILIZAÇÃO DA BIOMASSA DE ALGAS PARA PRODUÇÃO DE BIOSSORVENTE

Levando em consideração o abordado anteriormente, a seguir são apresentados o mecanismo de produção do adsorvente, como ocorre o processo de adsorção e também destacam-se estudos realizados por diversos autores da área.

4.1. Mecanismo de produção do bioissorvente

A tecnologia que utiliza a biomassa de algas marinhas para a bioissorção de compostos em águas residuais contaminadas tornou-se uma alternativa para os processos convencionais de tratamento (JAYAKUMAR, RAJASSIMMAN E KARTHIKEYAN, 2015).

Assim, as principais vantagens desta técnica são a reutilização da biomassa, o baixo custo operacional, a seletividade aprimorada para metais de interesse, a remoção de metais pesados de efluentes, o curto tempo de operação e a não formação de compostos mais perigosos (JAYAKUMAR, RAJASSIMMAN E KARTHIKEYAN, 2015).

Desse modo, Barquilha et al. (2017) citam que a biomassa pode ser utilizada nestes processos de forma livre ou imobilizada, onde a imobilização pode ser feita com diferentes substâncias imobilizantes.

Além disso, pode-se usar a biomassa viva ou morta. Entretanto, a utilização de algas vivas possui desvantagens em relação ao uso de algas “mortas”, pois acarretaria em uma capacidade de sorção limitada, uma vez que os íons de metais pesados muitas vezes prejudicam as células vivas. Ainda, o processo de sorção apresentaria grandes variações com base na fase de crescimento que a alga se encontra (ZERAATKAR et al., 2016). Yi et al. (2016) descrevem que pode-se utilizar para o processo de bioissorção tanto algas vivas, como algas mortas, entretanto a biomassa de algas mortas apresenta diversas vantagens, já que possui menores custos, possibilita a remoção eficiente dos metais pesados, pode ser regenerado de forma facilitada e não necessita de muitos cuidados para o seu uso.

Mais especificamente, as algas vivas são afetadas por vários fatores ambientais que influenciam diretamente na capacidade de bioissorção de íons metálicos. Os mecanismos de adsorção em algas vivas são mais complexos do que o das não vivas, uma vez que a adsorção ocorre durante a fase de crescimento e a captação intracelular de íons de metais pesados geralmente ocorre nesta fase (ZERAATKAR et al., 2016).

Em contraste, as células de algas não vivas realizam a bioissorção de íons metálicos na superfície da membrana celular e é considerada um processo extracelular. (GODLEWSKA-ZYLKIEWICZ, 2001).

Considerando o exposto anteriormente, afirma-se que para possibilitar seu uso como bioissorvente, as algas devem passar por um processo que, em sua maioria, se resumem na lavagem, secagem, corte/moagem e posterior adição ou não de substâncias que visam o aumento de eficiência do tratamento (JAYAKUMAR, RAJASSIMMAN E KARTHIKEYAN, 2014; JAYAKUMAR, RAJASSIMMAN E KARTHIKEYAN, 2015; RAMRAKHIANI et al. 2017).

Neste caso, pode-se citar o artigo de Tran et al. (2016), onde o preparo da biomassa consistiu na lavagem das algas com água deionizada visando a remoção de resíduos, em sequência as algas passaram por um processo de secagem no sol, foram cortadas para um tamanho médio de 2-3mm e posteriormente as mesmas foram secas em forno. Após estas etapas as algas foram testadas como bioissorvente. Ressalta-se que neste caso não houve adição de compostos para aumento da eficiência da bioissorção.

No trabalho de Filote et al. (2016), realizou-se o seguinte processo para o preparo do bioissorvente: inicialmente as algas foram limpas com água destilada, secas em forno de secagem, passaram por processo de moagem para atingir um tamanho de cerca de 0,5cm, posteriormente a biomassa foi seca em um dessecador. Entretanto, o diferencial deste trabalho em relação ao outro situa-se no fato de que no trabalho de Filote et al. (2016) utilizaram-se processos químicos para verificar a melhoria na

eficiência da biossorção, estes processos foram a protonação, tratamento com HDTMA e tratamento com amônio.

4.2. Processo de remoção de metais pesados

A adsorção é uma das operações unitárias muito utilizada atualmente em pesquisas e também em indústrias. Esta consiste em um processo de transferência de massa que estuda a capacidade de alguns sólidos em armazenar na sua superfície diferentes compostos presentes em fluidos, tornando possível sua separação (RUTHVEN, 1984). A substância que é retirada do fluido é conhecida como adsorvato, o sólido que a adsorve é o adsorvente (METCALFF e EDDY, 2016). O processo de biossorção é semelhante a adsorção, diferindo apenas pelo fato de que ocorre através da remoção de compostos utilizando como adsorvente um biomaterial, como a biomassa de algas (HE e CHEN, 2014).

As fases do processo de biossorção são bem explicadas por Das, Vimala e Karthika (2008); Anastopoulos e Kyzas (2015) e Zeraatkar et al. (2016), os autores apontam que inicialmente os íons dos metais são adsorvidos na superfície da biomassa devido a ligações que ocorrem entre os íons e grupos funcionais que estão presentes nas células. Estes grupos funcionais presentes na parede celular são proteínas e polissacarídeos, oferecendo facilidade de ligação aos íons. Sequencialmente, os íons ligados na superfície são adsorvidos até a membrana celular.

Segundo Ghasemi et al. (2011), para promover a melhor utilização do biossorvente e para garantir sua melhor eficiência, comumente utiliza-se para este processo as colunas de leito de fluxo contínuo, como exemplo, as colunas de leito fixo.

Estas colunas possuem uma bomba, geralmente a peristáltica, que irá bombear o efluente para a coluna, que está preenchida com o adsorvente. Após passar pela coluna, o efluente deve ser analisado. O fluxo de efluente para dentro da coluna de adsorção pode ser ascendente, como citam Riazi, Keshtkar e Moosavian (2016), ou descendente, sobre o qual Zang et al (2016) realizaram seu estudo. Na Figura 1 pode-se visualizar como seria o esquema de uma coluna de leito fixo.

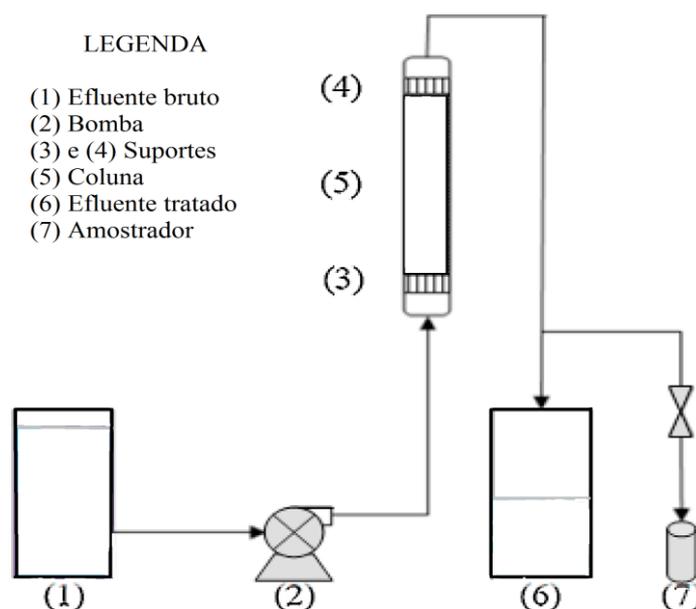


Figura 1: Esquema de uma coluna de leito fixo.

Fonte: Adaptado de Riazi, Keshtkar e Moosavian (2016).

Outra metodologia que pode ser usada é descrita por Jayakumar, Rajassimman e Karthikeyan (2014 e 2015); Bulgariu (2013), que realizaram o processo de adsorção em um balão cônico, onde a mistura adsorvente-adsorvato é colocada. Posteriormente esse balão é agitado em agitador, e após esse processo realiza-se a centrifugação da amostra e o sobrenadante é utilizado para medir a concentração residual

de metais utilizando a Espectrometria de Absorção Atômica. Ou seja, este seria o processo conhecido como adsorção em batelada, que é menos utilizado devido a sua menor eficiência.

Destaca-se, ainda, que após o processo de adsorção deve-se realizar a dessorção, que é a etapa onde os metais adsorvidos são removidos do adsorvente. Jayakumar, Rajassimman e Karthikeyan (2014) e Jayakumar, Rajassimman e Karthikeyan (2015) em seus estudos realizaram a etapa de dessorção através do uso de HCl 0,2M e água destilada, onde o adsorvente foi lavado diversas vezes, alternando as lavagens com HCl e água destilada.

A etapa de dessorção pode, ainda, ser realizada através do uso de HNO₃ (0,1M) ou EDTA (0,1M), onde o adsorvente já centrifugado é lavado com água destilada para remoção dos íons metálicos e posteriormente é colocado em solução de HNO₃ ou EDTA, após um tempo de contato o adsorvente é centrifugado novamente e está apto para a um próximo ciclo (TRAN et al, 2016).

4.3. Estudos que demonstram o uso de biomassa de algas como biossorvente

Neste item serão apresentados diversos estudos que promoveram a utilização de algas como biossorvente na remoção de metais pesados, os resultados destes estudos podem ser visualizados no Quadro 1.

Quadro 1: Relação de diversos trabalhos referentes a utilização de algas como adsorvente.

Tipo de alga / Composto a ser removido	Influência do pH	Influência da Temperatura	Influência do tempo de contato	Influência da quantidade de adsorvente	Influência da concentração de composto	Recuperação	Referência
<i>Ulva lactuca</i> / Chumbo (II)	Maior eficiência em pH 5,0	-	-	-	Maior concentração inicial, maior eficiência	98% de remoção com 0,1mol/L HCl	BULGARIU, D.; BULGARIU, L. (2013)
<i>Sargassum bevanom</i> / Cromo (VI)	Maior eficiência em pH ácido (3,0)	Maior adsorção, aumento da temperatura	-	Maior concentração, menor adsorção	Maior remoção com aumento da concentração de adsorvente	Com NaOH há dessorção de 80%	JAVADIAN <i>et al</i> , (2013)
<i>Spirulina platensis</i> / Cobre (II)	pH ótimo (7,0)	Maior adsorção, aumento da temperatura	Melhor eficiência em 90min.	0,05 g/L (melhor eficiência)	Maior remoção, maior concentração inicial do cobre	Recuperação de 90,6%.	AL-HOMAIDAN, A.A <i>et al.</i> , (2014)
<i>Spirulina platensis</i> / Cobre (II)	pH ótimo (7,0)	-	Melhor eficiência em 90min.	0,05 g/L (melhor eficiência)	Maior remoção, maior concentração inicial do cobre	Recuperação de 90,61%.	Anastopoulos e Kyzas (2015)

<i>Cyanothece</i> spp. E , <i>Leptolyngbya</i> spp. , <i>Phormidium</i> spp/ Cu (II), Cd (II) e PB (II)	Maior eficiência em pH entre 4 e 5	Sem efeito	Máxima remoção em 60min.	0,5g/L apresentou a melhor eficiência, melhor remoção	-	Melhor eficiência de 82,52%	TRAN et al. (2016)
<i>Halimeda gracilis</i> / Cromo (VI)	Maior eficiência em pH ácido (4,9)	-	-	Maior quantidade (até 2,2g/L), maior a adsorção	-	Mais HCl, maior a dessorção, com máximo de 98,02%	JAYAKUMAR, R; RAJASIMMAN, M; KARTHIKEYA N, C. (2014)
<i>Sargassum</i> <i>ilicifolium</i> / Zinco (II), Cobre(II), Níquel (II)	pH ótimo (5,0)	-	-	0,1 g/L	300mg/L para cada metal	-	TABARAKI, R.; NATEGHI, A. (2014)
<i>Chlamydomonas</i> <i>reinhardtii</i> <i>Chlorella vulgaris</i> <i>Scenedesmus</i> <i>acuminatus</i> / Tálcio	pH ótimo: 5-6			-	Concentração baixa (<150mg/L), houve remoção de 100% em 5min.	1h: recuperação de 40% 24h: remoção de 93,26% e 85,52% para <i>C. vulgaris</i> e	BIRUNGI & CHIRWA (2015)

					Concentrações mais elevadas chegaram a 100% em 25min.	<i>S.acuminatus</i> e <i>C.reinhardtii</i> para 57,49%	
<i>Cladopora sericonides/</i> Cobre	Maior eficiência com pH maiores	-	-	-	Maior concentração inicial, menor a eficiência	-	EBRAHIMI <i>et al.</i> , (2016)
Algas verdes /Cádmio (II)	pH ótimo 5,0	-	-	0,8g/L([] ideal)	Maior concentração inicial, maior a eficiência	30min: recuperação 92% mais ciclos, menor a eficiência	BULGARIU, D; BULGARIU, L. (2016)
<i>Cladophora hutchinsiae/</i> Urânio	pH ótimo 5,0	-	-	Concentração de 10mg/L maior eficiência	Maior concentração, maior eficiência	Maior concentração ácido nítrico, maior a recuperação	TUZEN, M.; SAN, A.; BAGDA, E. (2017)

Entre os estudos apresentados no Quadro 1, percebe-se que as melhores eficiências de remoção de metais ocorreram em pH relativamente ácido. Além disso, para a maioria dos estudos apresentados no Quadro 1, a eficiência foi aumentada com o aumento da concentração inicial do metal analisado. De acordo com Cruz et al., (2004) este resultado pode ser justificado pelo fato de que uma elevada concentração inicial do composto, exerce uma poderosa força motriz que consegue exceder a resistência de transferência de massa entre as forças gasosas e sólidas, bem como propicia maior probabilidade de colisão entre os íons metálicos e a biomassa.

Son et al. (2018), em seu estudo de adsorção de cobre em macroalgas, verificaram a influência do pH na remoção do metal. Assim, os autores perceberam que houve melhoria significativa da eficiência de remoção do metal entre os pH's 4 e 6, sendo que a eficiência aumentou de 20,92% para 64,59%. Apesar disso, Son et al. (2018) obtiveram melhores eficiências em pH's básicos, próximo a 12. Uma explicação dada para este fato é de que em pH's mais elevados tem-se a formação de precipitados de hidróxidos, o que acarreta em melhorias na eficiência de remoção.

Em contrapartida, Jayakumar, Rajasimman, Karthikeyan, (2014) apontam que quando tem-se o aumento do pH da amostra, a eficiência de remoção tende a aumentar até certo ponto, visto que em pH's mais elevados ocorre a precipitação do cobre em forma de hidróxido e também devido a redução da solubilidade do composto. A discrepância entre os estudos apresentados pode ser explicada devido a preparação do biossorvente, já que Son et al. (2018) utilizaram para o preparo do biossorvente o óxido de ferro e quitosana, enquanto Jayakumar, Rajasimman, Karthikeyan, (2014) utilizaram a alga pura. Além disso, de acordo com Tran et al. (2016), o valor de pH ideal para a adsorção dos metais depende do tipo de alga estudada e do íon metálico em questão.

Al-Homaidan et al. (2014) consideram o efeito da temperatura um importante parâmetro a ser avaliado, visto que o mesmo pode influenciar no processo de adsorção dos íons metálicos. Os resultados obtidos pelos autores apontaram que a adsorção do metal foi elevada gradualmente juntamente com a elevação da temperatura, o mesmo efeito foi verificado no estudo desenvolvido por Javadian et al., (2013).

Tran et al. (2016) avaliaram também a influência que o tempo de contato exerce sobre o processo de adsorção e verificaram que a captação dos íons metálicos sofre significativo aumento, justamente com o aumento do tempo de contato (60 min), no respectivo estudo, e que em tempos superiores (> 60min) os resultados apresentam-se constantes.

Em relação ao parâmetro concentração inicial do composto Al-Homaidan et al., (2014) destacam que o mesmo desempenha um importante papel no processo de adsorção, visto que em altas concentrações grande quantidade de íons metálicos estão disponíveis para competir nos sítios de ligação, portanto, em altas concentrações ocorre maior eficiência na remoção. Entretanto, Ebrahimi (2016) verifica que para a adsorção do cobre a elevação da concentração inicial do composto acarreta na redução da eficiência de remoção. O autor julga que quando a concentração dos íons de cobre é maior, a proporção de adsorbato para adsorvente é maior e portanto, o percentual de remoção do cobre é reduzido, em decorrência da provável saturação dos sítios de adsorção do adsorvente.

Outra alternativa do uso da biomassa de algas como adsorvente para remoção de metais é a aplicação da mesma na forma imobilizada. Barquilha et al., (2017) utilizaram a espécie *Sargassum sp.* juntamente com o alginato de cálcio a fim de remover íons de níquel e cobre, utilizando camada fixa e lotes. Os resultados obtidos pelos autores demonstraram que a imobilização com alginato de cálcio aumentou a capacidade máxima de biossorção do biossorventes. Os experimentos realizados com colunas de camada fixa utilizando biossorventes imobilizados demonstraram maior capacidade de captação, verificado pelo

aumento de 49% na bio sorção do níquel e de 36% na bio sorção do cobre em comparação aos resultados obtidos com biomassa livre.

5. CONCLUSÕES

Pode-se constatar que a aplicação da biomassa de algas como bio sorvente na remoção de metais pesados é um processo bem eficiente, de acordo com os estudos realizados pelos autores citados. A aplicação do processo de bio sorvente, além de ser eficiente para remoção dos metais apresenta condicionantes que propiciam a sua aplicação, pois minimizam a geração de resíduos secundários e apresentam baixo custo na obtenção dos materiais. Além do que, as algas marinhas estão disponíveis em grande quantidade em diversas regiões do mundo, e sua eficiência provém da sua alta capacidade de ligação com os metais, devido a presença de polissacarídeos, proteínas ou lipídios da superfície das paredes celulares. Entretanto, assim como todo processo apresenta condicionantes que irão inferir fortemente na sua eficiência, se não forem bem analisadas, dentre os quais destaca-se: pH da solução, concentração inicial de bio sorvente, concentração do composto metálico e o tempo de contato.

Conclui-se, então, que a aplicação da biomassa de algas como bio sorvente para metais pesados é uma alternativa eficiente, pois além de propiciar a remoção destes contaminantes perigoso evitando a contaminação dos corpos d'água, é um método barato diante de outras técnicas empregadas.

6. REFERÊNCIAS

AL-HOMAIDAN, A. A. *et al.* Biosorption of copper ions from aqueous solutions by *Spirulina platensis* biomass. **Arabian Journal of Chemistry**, v. 7, n. 1, p. 57–62, 2014.

ANASTOPOULOS, I.; KYZAS, G. Z. Progress in batch biosorption of heavy metals onto algae. **Journal of Molecular Liquids**, v. 209, p. 77–86, 2015.

ARAÚJO, F. P. DE; PAZ, G. M.; OLIVEIRA, Y. L.; LEITE, C. H. P. Estudo da Viabilidade de Microalgas para Produção de Biodiesel. In: CONGRESSO NORTE E NORDESTE DE PESQUISA E INOVAÇÃO, 7. Palmas. 2012, Anais...p. 1-7.

BARQUILHA, C. E. R. *et al.* Biosorption of nickel (II) and copper (II) ions in batch and fixed-bed columns by free and immobilized marine algae *Sargassum sp.* **Journal of Cleaner Production**, v. 150, p. 58–64, 2017.

BIRUNGI, Z. S.; CHIRWA, E. M. N. The adsorption potential and recovery of thallium using green micro-algae from eutrophic water sources. **Journal of Hazardous Materials**, v. 299, p. 67–77, 2015.

BRENNAN, L. & OWENDE, P. Biofuels from microalgae: A review of technologies for production, processing, and extractions of biofuels and co-products. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, 14: p.557-577.2010.

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

BULGARIU, D.; BULGARIU, L. Potential use of alkaline treated algae waste biomass as sustainable bio sorbent for clean recovery of cadmium (II) from aqueous media: batch and

column studies. **Journal of Cleaner Production**, v. 112, p. 4525–4533, 2016.

CRAIGIE, J. S. Seaweed extract stimuli in plant science and agriculture. **Applied Phycology**, v. 23, p. 371–393, 2010.

CHISTI, Y. Biodiesel from microalgae. **Biotechnology Advances**, v. 3, p. 294–306, 2007.

CRUZ, C.C.V. Kinetic modeling and equilibrium studies during cadmium biosorption by dead *Sargassum* sp biomass. **Bioresource Technology**, v. 91, p. 249–257, 2004.

DAPPER, T. B.; PUJARRA, S.; Oliveira, A. J.; Oliveira, F. G.; Paulert, R.; Potencialidades das macroalgas marinhas na agricultura: Revisão. **Revista em Agronegócios e Meio Ambiente**, v.7, n.2, p. 295–313, mai./ago. 2014.

DAS, N.; VIMALA, R.; KARTHIKA, P. Biosorption of heavy metals – An overview. **Indian Journal of Biotechnology**, v. 7, p. 159–169, 2008.

DEFANTI, L. S. Produção de biocombustíveis a partir de algas fotossintetizantes. **Revista de divulgação do Projeto Universidade Petrobras e Fluminense**, v. 1, n. 21, p. 11–21, 2010.

EBRAHIMI, A. et al. Modification of green algae harvested from the Persian Gulf by L-cysteine for enhancing copper adsorption from wastewater: Experimental data. **Chemical Data Collections**, v. 2, p. 36–42, 2016.

FARNANE, M. et al. Alkaline treated carob shells as sustainable biosorbent for clean recovery of heavy metals : Kinetics , equilibrium , ions interference and process optimisation. **Ecological Engineering**, v. 101, p. 9–20, 2017.

FILOTE, C. et al. Green macroalgae from the Romanian coast of Black Sea : Physico-chemical characterization and future perspectives on their use as metal anions biosorbents. **Process Safety and Environmental Protection**, v. 108, p. 34–43, 2016.

FLORES-CHAPARRO, et al. Biosorption removal of benzene and toluene by three dried macroalgae at different ionic strength and temperatures: Algae biochemical composition and kinetics. **Journal of Environmental Management**, v. 193, p. 126–135, 2017.

GHASEMI, M. et al. Biosorption of uranium (VI) from aqueous solutions by Capretreated *Cystoseira indica* alga: Breakthrough curves studies and modeling. **Journal of Hazardous Materials**, v. 189, n. 1–2, p. 141–149, 2011.

GODLEWSKA-ZYLKIEWICZ, B. Analytical applications of living organisms for preconcentration of trace metals and their speciation. *Crit. Rev. Anal. Chem*, v. 31, n. 3, p. 175 – 189, 2001.

HE, J.; CHEN, J. P. A comprehensive review on biosorption of heavy metals by algal biomass: Materials, performances, chemistry, and modeling simulation tools. **Bioresource Technology**, v. 160, p. 67–78, 2014.

JAKÓBIK-KOLON, A. et al. Hybrid pectin-based biosorbents for zinc ions removal. **Carbohydrate Polymers**, v. 169, p. 213–219, 2017.

JAVADIAN, H. et al. Removal of Cr (VI) by modified brown algae *Sargassum bevanom* from aqueous solution and industrial wastewater. **Journal of the Taiwan Institute of Chemical**

Engineers, v. 44, n. 6, p. 977–989, 2013.

JAYAKUMAR, R.; RAJASIMMAN, M.; KARTHIKEYAN, C. Optimization, equilibrium, kinetic, thermodynamic and desorption studies on the sorption of Cu (II) from an aqueous solution using marine green algae: *Halimeda gracilis*. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, v. 121, p. 199–210, 2015.

JAYAKUMAR, R.; RAJASIMMAN, M.; KARTHIKEYAN, C. Sorption of hexavalent chromium from aqueous solution using marine green algae *Halimeda gracilis*: Optimization, equilibrium, kinetic, thermodynamic and desorption studies. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, v. 2, n. 3, p. 1261–1274, 2014.

JAYAKUMAR, R; RAJASIMMAN, M; KARTHIKEYAN C., Optimization, equilibrium, kinetic, thermodynamic and desorption studies on the sorption of Cu(II) from a aqueous solution using marine green algae: *Halimeda gracilis*, **Ecotoxicol. Environ. Saf.** p. 199–210. 2015.

KHAN, W. et al. Seaweed extracts as biostimulants of plant growth and development. **Plant Growth Regulation**, v. 28, p. 386-399, 2009.

LIANG, Z. et al. The retained templates as “helpers” for the spherical meso-silica in adsorption of heavy metals and impacts of solution chemistry. **Journal Of Colloid And Interface Science**, China, v. 496, p.382-390, 2017.

MARZBALI, M. et al. Removal of direct yellow 12 from aqueous solution by adsorption onto *Spirulina* algae as a high-efficiency adsorbent. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, v. 5, p. 1946–1956, 2017.

MATA, T. M.; MARTINS, A. A.; CAETANO, N. S. Microalgae for biodiesel production and other applications: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Portugal, v. 14, p. 217-232, 2009.

METCALF, Leonard; EDDY, Harrison. **Tratamento de efluentes e recuperação de recursos**. 5. ed. Porto Alegre: Mcgraw-hill, 2016. 2008 p.

RAMRAKHIANI, L. et al. Industrial waste derived biosorbent for toxic metal remediation: Mechanism studies and spent biosorbent management. **Chemical Engineering Journal**, v. 308, p. 1048–1064, 2017.

RASHID, N. et al. Enhanced electricity generation by using algae biomass and activated sludge in microbial fuel cell. **Science of the Total Environment**, [s.l.], v. 456, n. 457, p.91-94, jul. 2013.

RAVEN, P.H.; EVERT, R.F.; EICHHORN, S.E. *Biologia Vegetal*. Editora Guanabara Koogan: Rio de Janeiro, 6a. ed. Coord. Trad. J.E.Kraus. 2001. 906 p.

RIAZI, Masoud; KESHTKAR, Ali Reza; MOOSAVIAN, Mohammad Ali. Biosorption of Th(IV) in a fixed-bed column by Ca-pretreated *Cystoseira indica*. **Journal Of Environmental Chemical Engineering**, [s.l.], v. 4, n. 1, p.1890-1898, mar. 2016.

RIPOLL, N. et al. Hydrogen production from algae biomass in rich natural gas-air filtration combustion. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 42, n. 8, p. 1–10, 2017.

RUTHVEN, D. **Principles of adsorption and adsorption processes**. Canadá: 1984.

SHEEHAN, J. et al. **A Look Back at the U.S. Department of Energy’s Aquatic Species Program - Biodiesel from Algae**, p. 328. 1998.

SILVA, R; BACHOLSKY, R; JERÔNIMO, C. Produção de Biodiesel por Algas: Integração com Processos de Carcinicultura. **Reget**, Santa Maria, v. 19, n. 3, p.713-724, out. 2015.

SON, E. et al. adsorbent with chitosan and ferric oxide for simultaneous efficient. **Bioresource Technology**, 2018.

TABARAKI, R.; NATEGHI, A. Multimetal biosorption modeling of Zn^{2+} , Cu^{2+} and Ni^{2+} by *Sargassum ilicifolium*. **Ecological Engineering**, v. 71, p. 197–205, 2014.

TRAN, H. T. et al. Heavy metal biosorption from aqueous solutions by algae inhabiting rice paddies in Vietnam. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, [s.l.], v. 4, n. 1, p.2529-2535, abr. 2016.

TRIVEDI, J. et al. Algae based biore fi nery: How to make sense? **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 47, p. 295–307, 2015.

TOMASELLI, L. The microalgal Cell. In: RICHMOND, A. Handbook of Microalgal Culture: Biotechnology and Applied Phycology. Blackwell, Oxford, 2004, 3-19 p.

TUZEN, M.; SAN, A.; BAGDA, E. Equilibrium, thermodynamic and kinetic investigations for biosorption of uranium with green algae (*Cladophora hutchinsiae*). v. 176, p. 7–14, 2017.

VASSILEV, S. V; VASSILEVA, C. G. Composition, properties and challenges of algae biomass for biofuel application: An overview. **Fuel**, v. 181, p. 1–33, 2016.

VIÊGAS, C. V. et al. A route to produce renewable diesel from algae: Synthesis and characterization of biodiesel via in situ transesterification of Chlorella alga and its catalytic deoxygenation to renewable diesel. **Fuel**, v. 155, p. 144–154, 2015.

WANG, X. et al. Sequestration of CO₂ discharged from anode by algal cathode in microbial carbon capture cells (MCCs). **Biosensors and Bioelectronics**, v. 25, n. 12, p. 2639–2643, 2010.

WEN, Q. et al. Electricity generation from synthetic penicillin wastewater in an air-cathode single chamber microbial fuel cell. **Chemical Engineering Journal**, v. 168, n. 2, p. 572–576, 2011.

WUANA, R. A.; OKIEIMEN, F. E. Heavy Metals in Contaminated Soils: A Review of Sources , Chemistry , Risks and Best Available Strategies for Remediation. **International Scholarly Research Network**, p. 1–20, 2011.

YI, Z. et al. Uranium biosorption from aqueous solution onto Eichhornia crassipes. **Journal of**

Environmental Radioactivity, v. 154, p. 43–51, 2016.

ZANG, T. et al. Removal of Cr(VI) by modified and immobilized *Auricularia auricula* spent substrate in a fixed-bed column. **Ecological Engineering**, [s.l.], v. 99, n. 1, p.358-365, nov. 2016.

ZERAATKAR, A. K. et al. Potential use of algae for heavy metal bioremediation, a critical review. **Journal Of Environmental Management**, [s.l.], v. 181, n. 1, p.817-831, jun. 2016.

ZHAO, B.; SU, Y. Process effect of microalgal-carbon dioxide fixation and biomass production: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 31, p. 121–132, 2014.