

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS

CENTRO DE CIÊNCIAS DA NATUREZA

DIEGO SIQUEIRA FRANCO

**BIOSSORVENTES NA ÁREA AMBIENTAL: REVISANDO APLICAÇÕES**

Buri

2022

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS

CENTRO DE CIÊNCIAS DA NATUREZA

DIEGO SIQUEIRA FRANCO

**BIOSSORVENTES NA ÁREA AMBIENTAL: REVISANDO APLICAÇÕES**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado  
como exigência parcial para a obtenção do grau  
de Bacharel em Engenharia Ambiental na  
Universidade Federal de São Carlos

Orientação: Profa. Dra. Anne Alessandra  
Cardoso Neves

Co-orientação: Prof. Dr. Ubaldo Martins das  
Neves

Buri

2022

Franco, Diego Siqueira

Biossorventes na área ambiental: revisando aplicações /  
Diego Siqueira Franco -- 2022.  
44f.

TCC (Graduação) - Universidade Federal de São Carlos,  
campus Lagoa do Sino, Buri

Orientador (a): Anne Alessandra Cardoso Neves

Banca Examinadora: Ubaldo Martins das Neves, Thales  
Augusto de Miranda Medeiros

Bibliografia

1. Biossorventes. 2. Resíduos agroindustriais. 3.  
Biossorção. I. Franco, Diego Siqueira. II. Título.

Ficha catalográfica desenvolvida pela Secretaria Geral de Informática  
(SIn)


DADOS FORNECIDOS PELO AUTOR

Bibliotecário responsável: Lissandra Pinhatelli de Britto - CRB/8 7539

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS  
CENTRO DE CIÊNCIAS DA NATUREZA  
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AMBIENTAL

**Folha de Aprovação**

Assinatura dos membros da comissão examinadora que avaliou e aprovou a Defesa de Trabalho de Conclusão de Curso do candidato **Diego Siqueira Franco**, realizada em 12/04/2022:

Documento assinado digitalmente  
 ANNE ALESSANDRA CARDOSO NEVES  
Data: 13/04/2022 18:42:13-0300  
Verifique em <https://verificador.iti.br>

---

Dr<sup>a</sup> Anne Alessandra Cardoso Neves – Orientadora  
Centro de Ciências da Natureza – UFSCar – Campus Lagoa do Sino.



---

Dr. Thales Augusto de Miranda Medeiros  
Centro de Ciências da Natureza – UFSCar – Campus Lagoa do Sino



---

Dr. Ubaldo Martins Neves  
Centro de Ciências da Natureza – UFSCar – Campus Lagoa do Sino

Dedico este trabalho aos meus pais.

## **AGRADECIMENTO**

Primeiramente, agradeço a Deus pela força em toda a minha caminhada.

À minha família, especialmente meus pais (Rose e Pico) e minha irmã (Daiane), que sempre me apoiaram e me incentivaram a correr atrás dos meus sonhos. As minhas tias, tios e primos que sempre acreditaram no meu potencial.

Aos amigos que conheci durante a graduação, principalmente os da turma de Engenharia Ambiental 2016, por toda a companhia durante os anos da graduação e pelas diversas experiências vividas juntos.

À minha orientadora Dra. Anne Alessandra Cardoso Neves, por todo o aprendizado durante a graduação e por todo o apoio no desenvolvimento desse trabalho. E também ao co-orientador Dr. Ubaldo Martins Neves pelo auxílio.

E, por último, deixo aqui meu agradecimento a todos os docentes e funcionários da Universidade Federal de São Carlos campus Lagoa do Sino, local esse que foi minha segunda casa nos últimos anos.

## RESUMO

A preocupação com a poluição das águas tem se intensificado cada vez mais, visto que tal recurso é essencial para diversas atividades realizadas pelo homem. No entanto, mesmo sabendo que esse recurso é considerado finito, o lançamento de efluentes sem tratamento tem sido decorrente. Os principais responsáveis pela alteração na qualidade da água são as atividades domésticas, atividades industriais e atividades agroindustriais. Assim como poluem as águas, as atividades agroindustriais também são responsáveis pela alta quantidade de resíduos gerados que, muitas vezes, são descartadas inadequadamente. Diante da problemática envolvendo a poluição das águas, nos últimos anos pesquisadores tem buscados tratamentos alternativos na remoção de poluentes, onde tem se destacado a técnica de bioissorção, sendo um processo que remove poluentes do ambiente aquático utilizando sólidos de origem natural. Dentre os sólidos passíveis de serem utilizados, temos os resíduos agroindustriais. Neste contexto, o presente estudo teve como objetivo analisar a aplicação de diversos bioissorventes através de artigos selecionados de forma exploratória e seletiva, a fim de contribuir no estudo da técnica de bioissorção. Desta forma, foi possível analisar alguns parâmetros que influenciam na técnica como pH, temperatura, tempo de contato e velocidade de agitação, obtendo como conclusão que todos os artigos selecionados apresentam boa capacidade de bioissorção e eficiência, porém estudos com um maior número de parâmetros e intervalos são necessários.

**Palavras-chave:** Bioissorção. Bioissorventes. Resíduos agroindustriais.

## **ABSTRACT**

Concern with water pollution has intensified more and more, since this resource is essential for various activities carried out by man. However, even knowing that this resource is considered finite, the release of untreated effluents has been a result. The main responsible for change in water quality are domestic activities, industrial activities and agro-industrial activities. As well as polluting water, agro-industrial activities are also responsible for high amount of waste generated, which is often improperly disposed off. Faced with the problem involving water pollution, in recent years researchers have sought alternative treatments in removal of pollutants, where biosorption technique has been highlighted, being a process that removes pollutants from aquatic environment using solids of natural origin. Among solids that can be used, we have agro-industrial residues. In this context, the present study aimed to analyze the application of several biosorbents through selected articles in an exploratory and selective way, in order to contribute to the study of biosorption technique. In this way, it was possible to analyze some parameters that influence the technique such as pH, temperature, contact time and stirring speed, reaching the conclusion that all selected articles showed good biosorption capacity and efficiency, but studies with a greater number of parameters and intervals are needed.

**Keyword:** Biosorption. Biosorbents. Agro-industrial waste.



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Diagrama representando o processo de bioadsorção .....	15
Figura 2 - Representação da bioadsorção em batelada .....	19
Figura 3 - Representação da bioadsorção em coluna de leito fixo.....	19
Figura 4 - Isotermas de adsorção .....	23

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Principais agentes poluidores das águas.....	13
Quadro 2 - Principais grupos de ligação para biossorção.....	16
Quadro 3 - Resumos de artigos que utilizaram resíduos agroindustriais na remoção de poluentes.....	28

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>11</b>
<b>2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....</b>	<b>13</b>
2.1 POLUIÇÃO DAS ÁGUAS .....	13
2.2 BIODSORÇÃO .....	14
2.3 BIODSORVENTES .....	17
2.4 APLICAÇÃO DOS BIODSORVENTES .....	18
2.5 CINÉTICA DE ADSORÇÃO .....	20
<b>2.5.1 Modelo de pseudo primeira ordem .....</b>	<b>20</b>
<b>2.5.2 Modelo de pseudo segunda ordem .....</b>	<b>21</b>
2.6 ISOTERMA DE ADSORÇÃO .....	21
<b>2.6.1. Isoterma de Langmuir .....</b>	<b>24</b>
<b>2.6.2. Isoterma de Freundlich.....</b>	<b>25</b>
2.7 IMPORTÂNCIA DA UTILIZAÇÃO DOS BIODSORVENTES PARA A ÁREA AMBIENTAL .....	25
<b>3. OBJETIVOS .....</b>	<b>27</b>
3.1 GERAL .....	27
3.2 ESPECÍFICOS .....	27
<b>4 METODOLOGIA.....</b>	<b>28</b>
<b>5 RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>29</b>
5.1 APLICAÇÕES DE BIODSORVENTES NO BRASIL E NO MUNDO.....	29
<b>5.1.1 pH.....</b>	<b>32</b>
<b>5.1.2 Temperatura .....</b>	<b>34</b>
<b>5.1.3 Velocidade de agitação .....</b>	<b>34</b>
<b>5.1.4 Tempo de contato .....</b>	<b>35</b>
5.2 VANTAGENS E DESVANTAGENS DOS BIODSORVENTES ANALISADOS .....	35
<b>6 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>	<b>37</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>38</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Os recursos hídricos vêm sendo alterados por atividades antrópicas há anos e isso ocorre devido ao multiuso da água para o homem, o que acaba resultando em danos ambientais como a poluição de rios, lagos e mares, diminuindo a qualidade e disponibilidade de água (PEREIRA, 2004; TIBURTIUS, PERALTA-ZAMORA e LEAL, 2004).

A água pode ter sua qualidade alterada por diversas atividades, como as de origens domésticas, comerciais ou industriais, responsáveis por poluentes específicos que afetam os recursos hídricos (PEREIRA, 2004).

Segundo Gonçalves Júnior (2013), a qualidade dos recursos ambientais é afetada principalmente pelo desenvolvimento industrial e agropecuário, o que é motivo de preocupações em razão da produção de metais pesados e agrotóxicos que são substâncias consideradas não biodegradáveis. Dentre alguns dos metais pesados podemos citar o Cádmio (Cd), o Chumbo (Pb) e o Cromo (Cr), enquanto que dentre os agrotóxicos destacam-se os pesticidas organoclorados e os organofosforados. Também é importante destacar que toda substância que possa prejudicar a vida dos seres vivos, é considerada poluente. Portanto, todo agente físico ou químico quando encontrado acima de seu limite no meio ambiente pode ser considerado como tal (FROTA e VASCONCELOS, 2019).

Assim como os impactos ocasionados por despejos industriais e agropecuários nos recursos hídricos, a alta demanda por alimentos tem feito com que grandes quantidades de resíduos agroindustriais sejam produzidos e, conseqüentemente, descartados incorretamente, resultando em impactos ao meio ambiente. Segundo a Food and Agriculture Organization of the United Nations (2013), 1,3 bilhões de toneladas de alimentos são desperdiçadas anualmente, não causando apenas impactos econômicos, mas também impactos nos recursos naturais. Esses impactos ocorrem em todas as etapas da produção, sendo 54% na fase inicial (produção, manipulação pós-colheita e armazenamento) e 46% nas fases finais (processamento, distribuição e consumo).

Tendo em vista a alta preocupação com a poluição dos recursos hídricos e com a finalidade de remover os poluentes em efluentes, nos últimos anos pesquisadores ao redor do mundo tem buscados por métodos não convencionais e usos de adsorventes de baixo custo. Alguns métodos geralmente utilizados são a troca iônica, adsorção por carvão ativado, precipitação química, entre outros. No entanto, esses processos necessitam de equipamentos especializados e apresentam um alto custo, tornando necessário a buscas por novos métodos (EL-SAYED, H. e EL-SAYED, M., 2014).

Entre os métodos não convencionais destaca-se a técnica de biossorção, a qual apresenta diversas vantagens como o seu custo benéfico, alta efetividade, fácil implementação, e como são utilizados resíduos fibrosos, os sítios ativos são mais livres para adsorver substâncias químicas. Essa técnica se torna ainda mais viável no Brasil, visto que o país é dependente das atividades agroindustriais, geradoras de altas quantidades desses resíduos (BOTREL, 2013; EL-SAYED, H. e EL-SAYED, M., 2014; VAGHETTI, 2009).

A biossorção é uma técnica de separação que se destaca nos tratamentos de efluentes devido a utilização de materiais adsorventes residuais de origem natural e renováveis (em sua maioria) (RODRIGUES *et al.*, 2006; SOUSA *et al.*, 2007).

Diversos tipos de adsorventes são utilizados para remover metais pesados e cada um é essencial para remover um ou mais metais. Os adsorventes são substâncias porosas que apresentam área superficial elevada para uma determinada massa. Dentre os adsorventes mais utilizados comercialmente tem-se o carvão ativado, zeólitas, sílica gel, polímeros e alumina ativada. Ainda assim, diferentes tipos de adsorventes de biomassas têm sido estudados nas últimas décadas como algas, microrganismos vivos ou mortos, bactérias, leveduras, fungos e resíduos agroindustriais (BARROS, CARVALHO e RIBEIRO, 2017; MOREIRA, 2010).

Os resíduos agroindustriais quando utilizados como adsorventes passam a ser chamados de biossorventes. Os mesmos apresentam grupos orgânicos em sua parede celular como ácidos carboxílicos e aminas, que conseguem capturar os metais através da complexação, troca iônica e microprecipitação na superfície do biossorvente. Ademais, esses são materiais ricos em proteínas, celulose, lignina, hemicelulose e pectina, favorecendo a adsorção de compostos orgânicos através de interação hidrofóbica e forças de Van der Waals (BARROS, CARVALHO e RIBEIRO, 2017; VAGHETTI, 2009).

Diante do exposto, o objetivo desse trabalho foi de estudar as aplicações de diferentes biossorventes, optando pelo enfoque nos resíduos da agroindústria, a fim de contribuir para um estudo mais detalhado envolvendo a técnica de biossorção, que tem sido considerada de extrema relevância para a área ambiental.

## 2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 2.1 POLUIÇÃO DAS ÁGUAS

Segundo Von Sperling (1996), a poluição das águas pode ser definida como a adição de substâncias ou de formas de energia que, direta ou indiretamente, alterem a qualidade do corpo d'água prejudicando o uso desse recurso.

Alguns dos fatores que participam de maneira considerável na destruição da qualidade de água são: o descarte de resíduos, rejeitos industriais e agroindustriais, o carreamento de partículas de solos contaminados, o uso descontrolado de pesticidas e suas embalagens, o lançamento de esgotos domésticos e industriais (sem tratamentos prévios) (BOOCK; MACHADO NETO, 2005). No Quadro 1 são apresentadas as principais fontes de poluentes e seus respectivos efeitos poluidores.

Quadro 1 - Principais agentes poluidores das águas

<b>Poluente</b>	<b>Principais parâmetros</b>	<b>Possível efeito poluidor</b>
Sólidos em suspensão	Sólidos em suspensões totais	Problemas estéticos, depósitos de lodo, adsorção de poluentes, proteção de patogênicos
Matéria orgânica biodegradável	Demanda Bioquímica de Oxigênio	Consumo de oxigênio, mortandade de peixes, condições sépticas
Nutrientes	Nitrogênio Fósforo	Crescimento excessivos de algas, toxicidade aos peixes (amônia), doença em recém-nascidos (nitrato), poluição da água subterrânea
Patogênicos	Coliformes	Doenças de veiculação hídrica
Matéria orgânica não-biodegradável	Pesticidas, alguns detergentes e outros	Toxicidade (vários), espumas (detergentes), redução de transferência de oxigênio (detergentes), não biodegradabilidade, maus odores (ex: fenóis)
Metais pesados	Elementos específicos (As, Cd, Cr, Cu, Hg, Ni, Pb, Zn, etc.)	Toxicidade, inibição do tratamento, biológico dos esgotos, problemas na disposição de lodo na agricultura, contaminação da água subterrânea
Sólidos inorgânicos dissolvidos	Sólidos dissolvidos totais, condutividade elétrica	Salinidade excessiva – prejuízo às plantações (irrigação), toxicidade a plantas (alguns íons), problemas de permeabilidade do solo (sódio)

Fonte: Adaptado de Von Sperling, 1996.

A poluição da água pode atingir o homem de diversos modos, pois é utilizada no preparo de alimentos, para se beber, tomar banho, lavar roupas, etc. Em função disso, a mesma deve apresentar aspecto limpo, pureza de gosto e livre de microrganismos patogênicos. Em vista disso, alguns órgãos do Brasil são utilizados para regulamentar e fiscalizar as qualidades das águas, como a ANA (Agência Nacional de Águas), CONAMA (Conselho Nacional de Meio Ambiente) e a CETESB (Companhia Ambiental do Estado de São Paulo). Entretanto, embora existam leis e parâmetros visando manter a qualidade da água, é notório a baixa preocupação da população mediante a quantidade de poluentes que são despejados diariamente nos recursos hídricos (BITTAR, 2008; MILANI, 2017).

De acordo com Iberdrola (s.d.) a deterioração da qualidade da água acarreta em impactos negativos ao meio ambiente como por exemplo na destruição de biodiversidade devido a eutrofização. Outro exemplo é a pesca em águas poluídas que pode transmitir toxinas aos alimentos que, posteriormente, possa prejudicar a saúde dos seres vivos. E, ainda, a exposição de doenças como a cólera, hepatite A, disenteria.

Sendo assim, devido presença de diversos poluentes na água, como os metais pesados, ânions, BTEX (benzeno, tolueno, etilbenzeno e xileno), entre outros, e os impactos que a poluição podem ocasionar, surgiu a necessidade em se desenvolver tecnologias a fim de remover os poluentes encontrados em resíduos sólidos e líquidos (NASCIMENTO *et al.*, 2014).

## 2.2 BIOSSORÇÃO

Diversos autores definiram a técnica de bioissorção. Segundo Muraleedharan, Ivengar e Venkobachar (1991), o termo bioissorção é definido como a capacidade de sólidos de origem natural, microrganismos, vivos ou mortos, ou seus derivados, em capturar metais presentes em ambientes aquosos. Volesky (2001), diz que o termo “bioissorção” se refere quando o metal é sequestrado por sítios químicos naturalmente presentes e funcionais, mesmo quando a biomassa está morta. Para Esposito, Pagnanelli e Vegliò (2002), a bioissorção é uma tecnologia inovadora que utiliza biomassa microbiana ou materiais de origem vegetal para reter seletivamente íons metálicos de soluções aquosas. Já Aksu (2005), afirma que embora a bioissorção seja mais usada em tratamentos de poluentes de metais pesados, a técnica também é promissora para a remoção de orgânicos de resíduos industriais e águas poluídas, como por exemplo, os corantes.

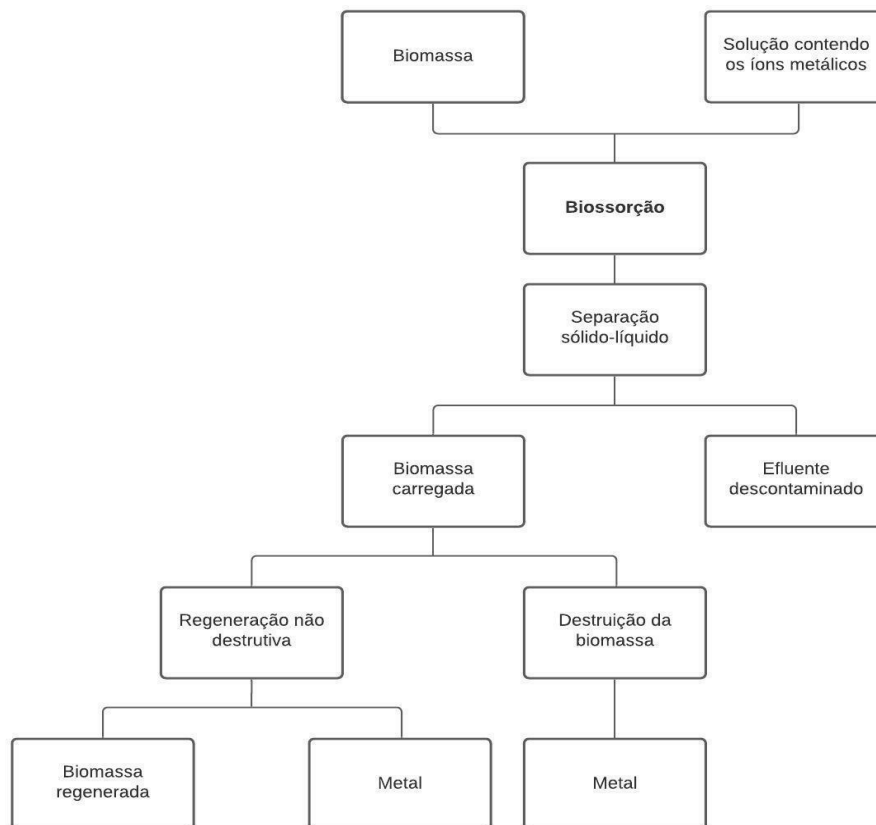
Apesar das diferentes definições abordadas, é possível notar que o objetivo da técnica é sempre o mesmo: remover poluentes (íons metálicos, corantes) de ambientes aquáticos utilizando biomassa.

Para realizar o processo não é necessário um investimento alto já que os custos de operação são econômicos e o processo é considerado eficiente e seletivo. Segundo Michalak,

Chojnacka e Witek-krowiak (2013), a bioissorção pode ser realizada entre os valores de pH de 3 a 9, e valores de temperatura entre 4 a 90°C. Em relação ao seu tamanho, o ideal é que a partícula do bioissorvente seja de 1 mm a 2 mm, fazendo com o que o estado de equilíbrio de adsorção e dessorção seja atingido com rapidez.

Para que ocorra a remoção de metais é necessário que haja uma fase sólida (bioissorvente/biomassa) e uma fase líquida (geralmente água), contendo os íons metálicos dissolvidos (adsorvato). O processo ocorre até que haja o equilíbrio de concentração do adsorvato presente na solução com a concentração de adsorvato retido no bioissorvente (BARROS, 2006). Na Figura 1 é representado um diagrama com as etapas do processo de bioissorção.

Figura 1 - Diagrama representando o processo de bioissorção



Fonte: LUZ *et al.*, 2002, apud FERREIRA, 2014.

No final do processo é possível ainda realizar a regeneração da biomassa, mantendo os custos do processo baixo e proporcionar a recuperação de metais removidos. Os metais são lavados e a biomassa pode ser reutilizada na técnica (FRANCO, CASTRO e VALTER, 2015).

A bioissorção ocorre através de transporte passivo (não há gasto de energia) e de interações físico-químicas entre os íons e os grupos funcionais situados na superfície do bioissorvente (BONIOLO, 2008). Alguns desses grupos são mostrados no Quadro 2.



Quadro 2 - Principais grupos de ligação para bio sorção

Grupo de ligação	Fórmula estrutural	pKa	Átomo ligante	Ocorrência em biomoléculas selecionadas
Hidroxila	-OH	9,5 - 13	O	PS, UA, SPS, AA
Carbonila	>C=O	-	O	Ligação peptídica
Carboxila	$\begin{array}{c} \text{-C=O} \\   \\ \text{OH} \end{array}$	1,7 - 4,7	O	UA, AA
Sulfidril	-SH	8,3 - 10,8	S	AA
Sulfonato	$\begin{array}{c} \text{O} \\    \\ \text{-S=O} \\    \\ \text{O} \end{array}$	1,3	O	SPS
Tioéter	>S	-	S	AA
Amina	-NH <sub>2</sub>	8 - 11	N	Cto, AA
Amina secundária	-NH	13	N	Cti, PG, Ligação peptídica
Amida	$\begin{array}{c} \text{-C=O} \\   \\ \text{NH}_2 \end{array}$	-	N	AA
Imina	=NH	11,6 - 12,6	N	AA
Imidazol	$\begin{array}{c} \text{-CNH} \\    \\ \text{H-C-N} \end{array}$	6,0	N	AA
Fosfonato	$\begin{array}{c} \text{OH} \\   \\ \text{-P=O} \\   \\ \text{OH} \end{array}$	0,9 - 2,1 6,1 - 6,8	O	PL
Fosfodiéster	$\begin{array}{c} >\text{P=O} \\   \\ \text{OH} \end{array}$	1,5	O	TA, LPS
PS = Polissacarídeos; UA = Ácidos urônicos; SPS = sulfatados PS; Cto = Quitosana; PG = Peptidoglicana; AA = Aminoácidos; TA = Ácido teicóico; PL = Fosfolipídios; LPS = lipo PS.				

Fonte: Volesky, 2007.

Segundo Vilar (2006), esses grupos podem favorecer a bio sorção de metais através dos fatores abaixo:

- Acessibilidade do sítio;
- Afinidade entre o sítio e o metal (força de ligação);
- Estado químico do sítio (disponibilidade);
- Quantidade de sítios no material biossorvente;

### 2.3 BIOSSORVENTES

A utilização de biossorventes tem aumentado gradualmente em decorrência da biossorção ser uma técnica altamente promissora e que além de resolver um problema que é a contaminação dos recursos hídricos, também serve como um novo destino adequado aos resíduos que seriam descartados sem utilização. Diante disso, é extremamente importante definir o que são biossorventes e estudar suas aplicações (BARROS; CARVALHO; RIBEIRO, 2017).

Podemos definir como biossorventes os materiais de origens naturais (biomassa) que apresentam capacidade adsorptivas e que são capazes de reter as espécies presentes em soluções aquosas em sua superfície. (VAGHETTI, 2009).

A natureza apresenta diversas biomassas possíveis para serem utilizadas na remoção de poluentes de corpos hídricos, mas ultimamente a utilização de resíduos agrícolas, biomateriais e polissacarídeos tem se destacado. Esses biossorventes são oriundos de biomassas inativas (mortas), apresentando vantagens em comparação a utilização daqueles oriundos de microrganismos vivos, uma vez que como as células estão mortas, o armazenamento e a utilização podem ser feitos por um tempo maior, a sua toxicidade não é sujeita a limitações e também não é necessário o fornecimento de nutrientes, pois como são carregados com íons metálicos, o biossorvente pode sofrer dessorção e ser reutilizado. (MICHALAK, CHOJNACKA e WITEK-KROWIAK, 2013).

Dentre os biossorventes utilizados no processo de biossorção é possível destacar a utilização de resíduos agroindustriais como: sementes de acerola (Rezende *et al.*, 2014), casca de banana nanica (Silva Capri e Capri Neto, 2016), pó de casca de coco verde (Castro *et al.* 2018), casca de uva (Ma *et al.*, 2018), casca de banana, casca de pepino, casca de batata (Stavrinou, Aggelopoulos e Tskiroglou, 2018), bagaço e engaço da uva (Costa e Maffessoni, 2019), casca de maracujá (Ramos *et al.*, 2019), cinza de casca de arroz (Costa e Paranhos, 2019), casca de tangerina (Beltran *et al.*, 2020), resíduos de açaí (Lima *et al.*, 2020), casca de pinha (Araujo *et al.*, 2021), bagaço de mandioca (Alessandretti *et al.*, 2021), bagaço da cana em pó, cinza de casca de arroz, pós de casca de fruta residual (Garg *et al.*, 2021), casca de arroz, fibra de coco e sementes de moringa (Tokay e Akpinar, 2021), entre outros.

Além disso, a utilização desses materiais se torna ainda mais relevante levando em consideração a utilização dos resíduos agroindustriais, os quais em altas quantidades se tornam uma problemática ambiental devido à alta quantidade de resíduos que são gerados (MARIN *et al.*, 2014; TARLEY e ARRUDA 2003; VAGHETTI, 2009).

De acordo com Volesky (1987, apud FERREIRA, 2014), para que uma biomassa seja considerada um bom bioissorvente é necessário satisfazer alguns requisitos:

- Baixo custo de produção do bioissorvente e a possibilidade em ser reutilizado;
- Elevada seletividade de adsorção e dessorção de metal;
- Separação eficiente, rápida e barata do bioissorvente da solução;
- Sorção eficiente e rápida liberação do material que foi adsorvido.

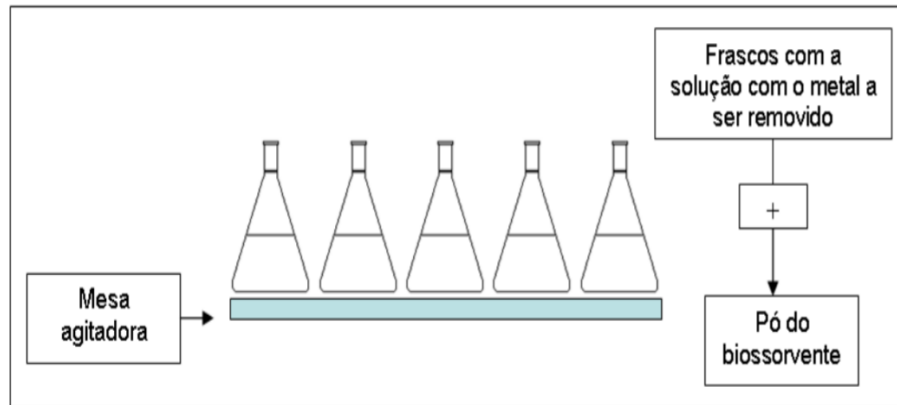
Ainda que esses requisitos sejam levados em consideração, a técnica de bioissorção utilizando bioissorventes em grandes escalas necessita de uma avaliação em relação a capacidade máxima de sorção, cinéticas de adsorção, recuperação do metal, regeneração e reutilização do bioissorvente, estado físico do bioissorvente (dureza, porosidade, tamanho de partícula) e resistência a diversos parâmetros, como o pH, temperatura, quantidade de solvente, entre outros (VOLESKY, 1990, apud FERREIRA, 2014).

#### 2.4 APLICAÇÃO DOS BIOSSORVENTES

A aplicação de bioissorventes ocorre na bioissorção em fase líquida através do contato sólido-líquido (bioissorvente -biosorvato), a qual consiste em um ciclo de acumulação, um ciclo de separação e um ciclo de recuperação do metal. Esses podem ser feitos através de sistemas agitados em batelada ou em coluna de leito fixo (SCHNEIDER, 1995; SANTOS, 2013).

Nos sistemas em batelada, coloca-se diferentes concentrações de biosorvato e diferentes quantidades de pó do bioissorvente para análise em enrlenmeyers com o auxílio de mesa agitadora, conforme é representado na Imagem 2. Posteriormente, a amostra passa por processos de centrifugação e leitura em espectrofotômetro, para que assim, possa ser feito os estudos cinéticos de adsorção (SFAIR, 2021).

Figura 2 - Representação da biossorção em batelada



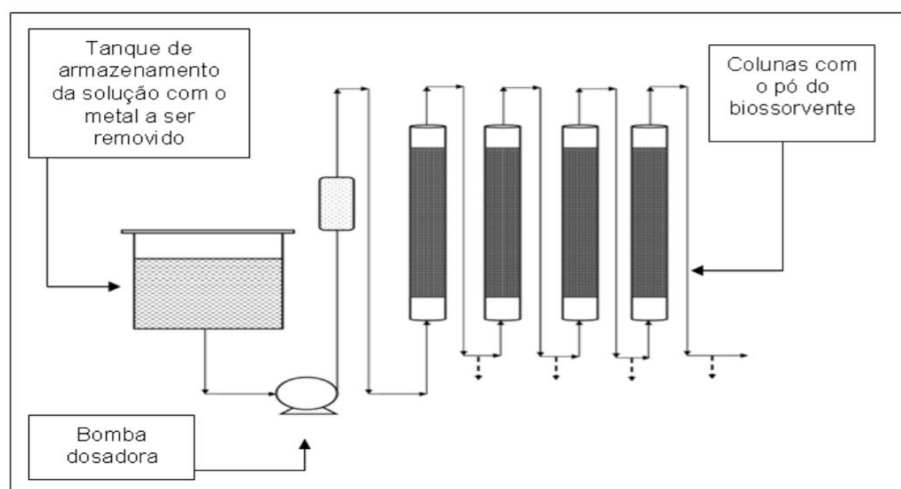
Fonte: SANTOS, 2013.

Segundo Volesky (2003), a técnica de biossorção através do sistema agitado em batelada apresenta como vantagem a possibilidade de se controlar o pH e tem como desvantagem a baixa saturação de biossorventes no equilíbrio. Em visto disso, é recomendado para os casos a seguir:

- Concentração inicial do metal presente em solução é variado;
- O biossorvente está na forma de pó;
- Quando é possível ser feito uma separação entre sólido/líquido.

Nas colunas em leito fixo, o biossorvente é colocado em colunas e com o auxílio de uma bomba dosadora recebe a solução com o metal a ser removido, conforme é representado na Figura 3. Ao entrar em contato com o biossorvente, o metal é removido e sai da coluna com uma concentração menor (SILVA *et al.*, 2014).

Figura 3 - Representação da biossorção em coluna de leito fixo



Fonte: SANTOS, 2013.

O método de coluna de leito fixo pode ser utilizado em uma ampla faixa de processos, apresentando como vantagem: as configurações de uso são mais efetivas, a escala é praticamente limitada, operação em fluxo contínuo, não é necessário a separação de

sólido/líquido e o biossorvente pode ser regenerado “in situ”. E, tem-se como desvantagens: o método não permite manusear a suspensão, é sensível a queda de pressão e é necessário que haja alternância das colunas (VOLESKY, 2003).

## 2.5 CINÉTICA DE ADSORÇÃO

Como primeiro passo para analisar as possibilidades do uso de um adsorvente em um processo de separação, tem-se a cinética de adsorção. Esses modelos envolvem a relação da eficiência de adsorção com o tempo de agitação (MAGDALENA, 2010).

A concentração de um determinado poluente presente em solução diminui com o decorrer do tempo até que ocorra o equilíbrio e, conseqüentemente, o poluente não é mais adsorvido. Nesse instante, a quantidade de poluente adsorvido se encontra em estado de equilíbrio dinâmico com a quantidade de poluente que está sendo liberado da superfície do adsorvente. Ao atingir esse estado, o tempo é denominado como de equilíbrio e a quantidade de poluente adsorvida refere-se à capacidade de adsorção máxima dos adsorventes (MAGDALENA, 2010).

Portanto, com a finalidade de examinar o mecanismo controlador do processo de adsorção, alguns modelos cinéticos são utilizados, como a reação química, controle da difusão e transferência de massa. Contudo, os mais utilizados com frequência são os de pseudo primeira ordem e de pseudo segunda ordem (ROCHA *et al.*, 2012).

### 2.5.1 Modelo de pseudo primeira ordem

A taxa de adsorção de sistemas líquido-sólido pode ser determinada através da expressão de velocidade de pseudo primeira ordem dada por Lagergren, baseada na capacidade de adsorção do sólido. Lagergren assumiu que a taxa de remoção de adsorbato era proporcional à diferença de tempo na concentração de saturação e o número de sítios ativos sólidos. A equação cinética de Lagergren é a equação mais comumente usada para adsorção de adsorbato de soluções aquosas (CARVALHO; FUNGARO; IZIDORO, 2010).

Para a taxa constante de sorção química de primeira ordem tem-se a Equação 1:

$$\frac{dq_t}{dt} = k_1(q_e - q_t) \quad (1)$$

Onde:

$k_1$ : constante de taxa de adsorção de pseudo primeira ordem ( $\text{min}^{-1}$ );

$q_e$ : quantidade adsorvida por grama de adsorvente (mg/g);

$q_t$ : quantidade adsorvida no tempo t (mg/g).

Integrando a Equação 1 e aplicando as condições de contorno:  $t = 0$  a  $t = t$ ,  $q_t = q_t$ , obtém-se a Equação 2:

$$\ln\left(\frac{q_e}{q_e - q_t}\right) = k_1 t \quad (2)$$

A Equação 2 por sua vez pode ser representada através da forma linear, como mostra a Equação 3, onde o valor de  $k_1$  pode ser obtido através do gráfico de  $\ln(q_e - q_t)$  x  $t$  e o ajuste da equação com os dados experimentais requer que o valor de  $q_e$  seja conhecido (MAGDALENA, 2010; OLIVEIRA *et al.*, 2017).

$$\ln(q_e - q_t) = \ln q_e - k_1 t \quad (3)$$

### 2.5.2 Modelo de pseudo segunda ordem

Na cinética de pseudo segunda ordem a velocidade da reação é dependente da quantidade do soluto adsorvida na superfície do adsorvente e da quantidade adsorvida no equilíbrio. O modelo de pseudo segunda ordem pode ser expresso de acordo com a Equação 4:

$$\frac{dq_t}{dt} = k_2 (q_e - q_t)^2 \quad (4)$$

Onde:

$k_2$ : constante de taxa de adsorção de pseudo segunda ordem ( $\text{g} \cdot \text{mg}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$ );

$q_e$ : quantidade adsorvida por grama de adsorvente ( $\text{mg/g}$ );

$q_t$ : quantidade adsorvida no tempo  $t$  ( $\text{mg/g}$ ).

Integrando a Equação 4 tem-se a Equação 5.

$$\frac{t}{(q_e - q_t)} = \frac{1}{q_t^2} + k_2 \quad (5)$$

Por fim, linearizando a Equação tem-se a Equação 6:

$$\frac{t}{q_t} = \frac{1}{k_2 q_e^2} + \frac{t}{q_e} \quad (6)$$

As variáveis  $q_e$  e  $k_2$  podem ter seus valores obtidos através do intercepto e da inclinação da curva no gráfico de  $(t/q_t)$  x  $t$ . Caso o modelo seja aplicável, a plotação do gráfico deve apresentar relação linear próxima de 1 (MAGDALENA, 2010; OLIVEIRA *et al.*, 2017).

### 2.6 ISOTERMA DE ADSORÇÃO

Carmo (2013) afirma que os modelos de isoterma de adsorção tem como finalidade avaliar quantitativamente e comparar diversos sistemas de adsorção. Para Rocha (2006), as isotermas de adsorção são conhecidas como a relação entre a quantidade adsorvida e a concentração em equilíbrio, a qual facilita a compreensão do processo.

Para obter a isoterma é necessário colocar a massa de um sólido (adsorvente) em contato com a solução do componente a ser adsorvido (adsorvato) até que o equilíbrio seja atingido. Junto a isso, o processo deve ser feito utilizando diferentes massas de adsorvente ou uma mesma massa para diferentes concentrações iniciais de adsorvato. Em outras palavras, quando o adsorvato entra em contato com o adsorvente ocorre a transferência dos íons em solução para a

superfície do adsorvente até que a concentração de soluto na fase líquida ( $C_e$ ) se mantenha constante (CARMO, 2013; NASCIMENTO, 2014).

Ainda de acordo com Nascimento (2014), o equilíbrio de adsorção é atingido quando se consegue obter a concentração final do soluto ( $C_e$ , em gramas ou mols por litro de solução) e a capacidade de adsorção do adsorvente ( $q$ , em massa ou mols de adsorvato, por unidade de massa de adsorvente). E, para obter-se as variáveis “ $C_e$ ” e “ $q$ ”, é necessário separar o adsorvente da solução utilizando um filtro membrana, papel de filtro ou até mesmo através do processo de centrifugação. Posteriormente, analisa-se a solução do sobrenadante para encontrar a concentração residual de adsorvato ( $C_e$ ). Para realizar tal análise podem ser utilizadas técnicas de cromatografia gasosa ou líquida, espectrometria no ultravioleta ou visível, porém essas técnicas só podem ser utilizadas dependendo do adsorvato que será utilizado. Já para determinar o valor de “ $q$ ”, deve-se fazer um balanço de massa igualando a quantidade de adsorvente presente no adsorvente com a quantidade de adsorvato removido da solução, ou ainda, através da fórmula matemática a seguir:

$$q = \frac{(C_o - C_e)V}{m} \quad (7)$$

Onde:

$q$ : capacidade de adsorção;

$C_o$ : concentração inicial do adsorvato;

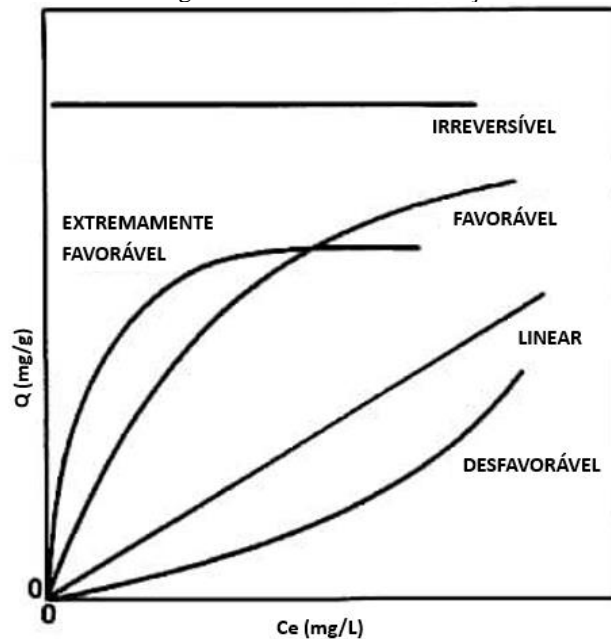
$C_e$ : concentração do adsorvato no equilíbrio;

$V$ : volume da solução;

$m$ : massa do adsorvente.

Por fim, com os valores obtidos, constrói-se um gráfico com os valores de “ $q$ ” x “ $C_e$ ”, que é denominado gráfico de isoterma de adsorção. Esses gráficos fornecem informações importantes relacionadas as características da adsorção, como pode ser visto na Figura 4 (NASCIMENTO, 2014; MCCABE, SMITH e HARRIOTT, 1993).

Figura 4 - Isotermas de adsorção



Fonte: Adaptado de MCCABE, SMITH e HARRIOTT, 1993.

Na isoterma com comportamento irreversível, a massa de adsorvato retida não depende da concentração do equilíbrio. A isoterma extremamente favorável ocorre quando a massa de material retido é considerada alta em relação a uma baixa concentração de equilíbrio do adsorvato em fase aquosa. Já a favorável ocorre quando a massa do adsorvato retido é alta para uma baixa concentração de equilíbrio do adsorvato na fase líquida. Nas isotermas lineares, a massa de adsorvato retida é proporcional a concentração de equilíbrio em solução. Por fim, a não favorável ocorre quando há uma baixa retenção do adsorvato, mesmo que apresente alta concentração de equilíbrio na solução (MCCABE, SMITH e HARRIOTT, 1993; NASCIMENTO *et al.*, 2014).

De acordo com Rocha (2006), diversas equações teóricas ou semi-empíricas foram desenvolvidas com a finalidade de interpretar as isotermas, sendo que algumas dessas equações são utilizadas no estudo de adsorção de gases e vapores quando em contato com substâncias porosas, como a Equação de Langmuir, Equação de Freundlich e Equação de Brunauer, Emmett e Teller (BET). No entanto, no estudo de adsorção de soluções as mais empregadas são: equações de Langmuir e Freundlich.

Segundo Alleoni, Camargo e Casagrande (1998), a Isoterma de Langmuir serviu como uso inicial para descrever o processo de adsorção de fases por meio de sólidos e se baseia em algumas suposições:

- a superfície de adsorção é homogênea;
- a adsorção ocorre em sítios específicos e não em interações com as moléculas do soluto;



- a máxima adsorção ocorre quando uma camada monomolecular preenche toda a superfície do adsorvente;

### 2.6.1. Isoterma de Langmuir

A isoterma de Langmuir parte da suposição de que há a presença de sítios livres onde ocorre a biossorção dos íons. Na equação de Langmuir, leva-se em consideração de que um íon metálico  $M$  se liga a um sítio livre  $L$ , como pode ser visto na Equação 8 (VILAR, 2006).



Onde:

$L$ : sítio livre;

$M$ : íon metálico;

$K_L$ : razão entre a constante cinética de adsorção e dessorção.

A constante de equilíbrio  $K_L$ , pode ser definida através da Equação 9:

$$K_L = \frac{q_m}{(q_L - q_M)C_M} \quad (9)$$

E, a fim de obter a equação em função de  $q_m$ , isola-se tal termo e, assim, é obtido a Equação 10 que representa a isoterma de Langmuir:

$$q_M = \frac{q_L K_L C_M}{1 + K_L C_M} \quad (10)$$

Onde:

$q_M$ : Quantidade de íon metálico adsorvido por unidade de massa de adsorvente (mg/g);

$q_L$ : Quantidade máxima de íon metálico adsorvido por unidade de massa de adsorvente (mg/g);

$K_L$ : Constante de equilíbrio de Langmuir (l/mg);

$C_M$ : Concentração de equilíbrio do metal na solução (mg/l).

Ainda de acordo com Vilar (2006) a isoterma de Langmuir apresenta alguns pressupostos:

- a) cada centro ativo da superfície pode acomodar uma entidade adsortiva;
- b) as entidades adsorvidas não apresentam capacidade de locomoção, ou sejam, são ligadas à superfície em locais fixos;
- c) a adsorção máxima ocorre quando a monocamada de moléculas está saturada de adsorvato na superfície do adsorvente;
- d) A adsorção não depende da presença ou ausência de espécies adsorvidas em suas proximidades, visto que a mesma é energeticamente igual em todos os centros ativos.

Os pressupostos acima citados não são encontrados na maioria dos sistemas de adsorção de águas contaminadas, porém tal modelo tem sido útil na discussão dos dados de equilíbrio

nesses sistemas. Portanto, a equação de Langmuir acaba se tornando apenas uma relação matemática capaz de relacionar dados experimentais (Vilar, 2006).

### 2.6.2. Isoterma de Freundlich

A isoterma de Freundlich relaciona-se com a quantidade de material adsorvido e a concentração de material presente em solução. A equação leva em consideração a sorção em superfícies heterogêneas, considerando que os sítios que apresentam ligações mais fortes são ocupados primeiramente e que ao sítio ser ocupado, a força de ligação diminui, o que prova a existência de multicamadas. A Equação 11, que represente a isoterma de Freundlich, demonstra que a energia diminui de maneira logarítmica conforme a superfície é preenchida por soluto (COUTO, 2009; SILVA, 2016).

$$q_e = K_f * C_e^{1/n} \quad (11)$$

Onde:

$q_e$ : quantidade adsorvida na fase sólida no equilíbrio ( $\text{mg.g}^{-1}$ );

$C_e$ : concentração na fase líquida no equilíbrio ( $\text{mg.L}^{-1}$ );

$K_f$ : afinidade do adsorvente ( $\mu\text{g.mg}^{-1} \cdot (\text{L} \cdot \mu\text{g}^{-1})^{1/n}$ );

$n$ : grau de heterogeneidade da superfície.

## 2.7 IMPORTÂNCIA DA UTILIZAÇÃO DOS BIOSSORVENTES PARA A ÁREA AMBIENTAL

O estudo sobre os bioissorventes e sua aplicação tem um grande papel por diversos fatores como a descontaminação hídrica e a reutilização de resíduos, como já citados anteriormente. É importante destacar que a utilização desses bioissorventes pode ser inclusive relacionado com um termo bastante conhecido na área ambiental que é o desenvolvimento sustentável. O tema começou a ser utilizado em 1972 na Conferência das Nações Unidas sobre o Meio Ambiente Humano realizada em Estocolmo e foi publicado no Relatório Brundtland em 1987, sendo como:

O desenvolvimento que procura satisfazer as necessidades da geração atual, sem comprometer a capacidade das gerações futuras de satisfazerem as suas próprias necessidades, significa possibilitar que as pessoas, agora e no futuro, atinjam um nível satisfatório de desenvolvimento social e econômico e de realização humana e cultural, fazendo, ao mesmo tempo, um uso razoável dos recursos da terra e preservando as espécies e os habitats naturais (BRUNDTLAND, 1987).

Diante disso é perceptível que se pode incluir os bioissorventes nesse termo, visto que através de sua utilização é possível recuperar corpos hídricos contaminados, tornando os mais

potáveis para gerações futuras. Segundo Lima *et al.* (2021), o uso de bioissorventes é uma estratégia capaz de reduzir impactos ambientais originados por espécies tóxicas ou nocivas ao meio ambiente. Além do mais, a sua utilização gera valor a subprodutos nas áreas de aplicações tecnológicas, que por sua vez, promove a sustentabilidade e o desenvolvimento da região onde serão aplicados estes. Silva (2013) também aborda que esses resíduos são de origem regionalizada, o que diminui custos com transporte e, portanto, gases poluentes na atmosfera.

Demirbas (2008), Kurniawan (2006) e Moreira (2010) citam ainda as seguintes vantagens na utilização dos bioissorventes:

- O valor comercial é considerado praticamente baixo já que são restos de processos de produção ou por apresentarem disponibilidade relativamente alta na natureza;
- Na etapa de preparação, o beneficiamento é simples e resistente, não sendo necessário a utilização de insumos químicos caros;
- São provenientes de fontes renováveis, podendo então serem reabastecidos;
- Alta eficiência na utilização para remediação de efluentes com concentrações baixas de íons metálicos;
- Através do processo de dessorção é possível recuperar o metal adsorvido.

### **3. OBJETIVOS**

#### **3.1 GERAL**

O presente trabalho teve como objetivo analisar as aplicações de diferentes bioSORVENTES, podendo contribuir para um estudo detalhado envolvendo a técnica de bioSORÇÃO, de extrema relevância para a área ambiental.

#### **3.2 ESPECÍFICOS**

- Conceituar o que são bioSORVENTES e como podem ser aplicados;
- Apresentar a importância da utilização de bioSORVENTES para a área ambiental;
- Analisar as aplicações de bioSORVENTES no Brasil e em outros países, além de alguns parâmetros que interferem na técnica de bioSORÇÃO;
- Analisar as possíveis vantagens e desvantagens das aplicações estudadas;

#### 4 METODOLOGIA

A pesquisa bibliográfica dos materiais foi feita de forma exploratória e qualitativa durante os meses de setembro de 2021 a março de 2022, com a coleta de dados iniciada a partir do mês de novembro e terminada no mês de março de 2022. No levantamento e coleta de dados utilizou-se teses e artigos em que foram utilizadas as técnicas de biossorção e aplicação de biossorventes. Os artigos selecionados foram pesquisados nas seguintes bases de dados: google acadêmico, SciELO, Química Nova, Brazilian Journal of Development, Web of Science, Science Direct, Pandawa Institute e MDPI (Multidisciplinary Digital Publishing Institute).

Para a seleção de artigos foram utilizadas algumas estratégias de buscas como o ano de publicação, sendo entre 2014 e 2021, a fim de analisar estudos mais recentes. Também optou-se pela escolha de estudos com biossorventes agroindustriais e que foram analisados parâmetros como pH, temperatura, tempo de contato e velocidade de agitação.

Ademais, também utilizou-se na busca palavras chave como: “biossorventes”, “biossorção”, “Resíduos agroindustriais”, “adsorção”, “biosorbents”, “biosorption”, “agro-industrial waste” “adsorption”. E, para finalizar, na coleta de dados também foram selecionados alguns artigos de países ao redor do mundo.

É importante destacar que artigos que não apresentavam data, local de publicação, sem o DOI (Digital Object Identifier) e que não se encaixavam nas estratégias de buscas, foram descartados.

Após isso, selecionou-se 15 artigos do Brasil, 1 da Grécia, 1 da China, 1 da Índia, 1 de Bangladesh e 1 do Reino Unido e iniciou-se o processo de análise dos artigos, bem como a escrita do trabalho.

Já para a apresentação dos dados, resumiu-se as informações mais importantes dos artigos escolhidos em um quadro e, em seguida, discutiu-se os mesmos.

## **5 RESULTADOS E DISCUSSÃO**

### **5.1 APLICAÇÕES DE BIOSORVENTES NO BRASIL E NO MUNDO**

No Quadro 3 são apresentados pequenos resumos de artigos utilizando os resíduos agroindustriais como biossorventes no Brasil e países ao redor do mundo.

Quadro 3 - Resumos de artigos que utilizaram resíduos agroindustriais na remoção de poluentes

<b>Autores e ano da publicação</b>	<b>País</b>	<b>Substância de interesse</b>	<b>Biossorvente</b>	<b>Condições ótimas</b>	<b>Capacidade biossortiva</b>	<b>% de remoção</b>
Rezende <i>et al.</i> (2014)	Brasil	Cr(VI)	Sementes de acerola	pH 2; tempo de contato - 120 min; velocidade de agitação - 150 rpm; 25°C	0,1g	66%
Silva, Capri e Capri Neto (2016)	Brasil	Cr(VI)	Casca de banana nanica	pH 2,5; tempo de contato - 120 min; velocidade de agitação - 400 rpm; temperatura ambiente	6 g.L <sup>-1</sup>	67%
Castro <i>et al.</i> (2018)	Brasil	Pb <sup>2+</sup> e Ni <sup>2+</sup>	Pó da casca de coco verde	pH 4; tempo de contato - 25 min; temperatura ambiente	25 g.L <sup>-1</sup>	97% - Pb <sup>2+</sup> 95 % - Ni <sup>2+</sup>
Ma <i>et al.</i> (2018)	China	Azul de metileno	Casca de uva	pH 11; tempo de contato - 180 min; velocidade de agitação - 240 rpm; 25°C	215,7 mg.g <sup>-1</sup>	87%
Stavrinou, Aggelopoulos e Tsakiroglou (2018)	Grécia	Azul de metileno e Orange G	Casca de banana (BP), casa de pepino (CP) e casca de batata (PP)	pH 6 (azul de metileno) e pH 2 (Laranja G); tempo de contato - 4h; velocidade de agitação - 12 rpm; 25°C	211,9 mg.g <sup>-1</sup> (BP), 107,2 mg.g <sup>-1</sup> (PP) e 179,9 mg.g <sup>-1</sup> (CP) para o azul de metileno; 20,9 mg.g <sup>-1</sup> (BP), 23,6 mg.g <sup>-1</sup> (PP) e 40,5 mg.g <sup>-1</sup> (CP) para o Laranja G	64,6% (CP), 81,1% (PP), 96,8% (BP) - azul de metileno 74,8% (CP), 59,9% (PP), 44,8% (BP) - Orange G
Costa e Maffessoni (2019)	Brasil	Cu <sup>2+</sup>	Bagaço e engaço da uva	pH 10; tempo de contato - 30 min; temperatura ambiente	10.000 mg.g <sup>-1</sup>	72%
Ramos <i>et al.</i> (2019)	Brasil	Cu(II), Pb(II), Zn(II), Ni(II) e Cr(II)	Casca de maracujá	pH 8; tempo contato - 60 minutos; velocidade de agitação - 120 rpm; temperatura ambiente	80,17 mg.g <sup>-1</sup>	93,92% - Cu(II); 98,86% - Pb(II), 80,91% - Zn(II), 72,42% - Ni(II) e 58,65% - Cr(II)
Costa e Paranhos (2019)	Brasil	Corante Remazol Red	Cinza da casca de arroz	pH 2; tempo de contato - 30 min; velocidade de agitação - 400 rpm; temperatura ambiente	11,83 mg.g <sup>-1</sup>	90,93%

Beltran <i>et al.</i> (2020)	Brasil	Azul de metileno	Casca de tangerina ( <i>citrus reticulata</i> )	pH 7,0; tempo de contato – 24h; velocidade de agitação – 150 rpm; 25°C;	100,73 mg.g <sup>-1</sup>	>90%
Lima <i>et al.</i> (2020)	Brasil	Cu(II), Zn(II) e Ni(II)	Resíduo de açaí ( <i>Euterpe oleracea</i> Mart.)	pH 5,0 - Cu(II) e Ni(II) e pH 6,0 - Zn(II); tempo de contato - 6h para Cu(II) e Zn(II) e 1h para o Ni(II); velocidade de agitação – 150 rpm; temperatura ambiente	15,77 mg.g <sup>-1</sup> - Cu(II); 24,69 mg.g <sup>-1</sup> - Zn(II); 3,30 mg.g <sup>-1</sup> - Ni(II)	68% - Cu(II); 33,5% - Zn(II); 25% - Ni(II)
Araujo <i>et al.</i> (2021)	Brasil	Vermelho neutro	Casca de pinha ( <i>Annona squamosa</i> )	pH 7,84; tempo de contato - 1.080 min; velocidade de agitação – 150 rpm; 25°C	23 mg.g <sup>-1</sup>	92%
Alessandretti <i>et al.</i> (2021)	Brasil	Vermelho escarlate	Bagaço de mandioca	pH 2; tempo de contato – 300 min; velocidade de agitação – 90 rpm; 50°C	25 mg.g <sup>-1</sup>	84%
Garg <i>et al.</i> (2021)	Índia	Flúor	Bagaço da cana em pó (SBP), cinza de casca de arroz (RHA), pós de casca de fruta residual (WFPP) e mistura de pó (PB)	pH – 6 (SBP, RHA e PB), pH 4 (WFPP);	1,2 g por 100 mL de solução	85%
Nurain <i>et al.</i> (2021)	Bangladesh	Pb <sup>2+</sup>	Casca de banana ( <i>Musa sapientum</i> )	pH 5; tempo de contato – 30 min; velocidade de agitação – 150 rpm; 25°C	45 g.L <sup>-1</sup>	88,06%
Tokay e Akpinar (2021)	Reino Unido	Cu, Ni e Zn	casca de arroz, fibra de coco e sementes de moringa	pH 6; tempo de contato – 2h; velocidade de agitação; 25°C	Cu – 23,3 mg.g <sup>-1</sup> , Zn – 42,3 mg.g <sup>-1</sup> , 16,1 mg.g <sup>-1</sup> para sementes de moringa; Cu – 1,56 mg.g <sup>-1</sup> , Zn – 0,89 mg.g <sup>-1</sup> , Ni - 0,64 mg.g <sup>-1</sup> para casca de arroz; Cu – 1,34 mg.g <sup>-1</sup> , Zn – 1,53 mg.g <sup>-1</sup> , Ni – 2,6 mg.g <sup>-1</sup> para fibra de coco;	Cu – 99%, Ni - 99%, Zn - 99% para sementes de moringa; Cu – 75%, Ni – 98%, Zn - 70% para casca de arroz; Cu – 99%, Ni - 99%, Zn - 99 % para fibra de coco

Fonte: autoria própria.



A fim de comparar e analisar os parâmetros que influenciam na bioadsorção e na respectiva utilização dos bioadsorventes, dividiu-se o quadro por ano de publicação, países, substância de interesse, bioadsorvente, condições ótimas, capacidade bioadsortiva e porcentagem de remoção.

No geral os estudos apresentaram boa capacidade bioadsortiva e porcentagem de remoção da substância de interesse, comprovando que a aplicação de bioadsorventes é viável na substituição das técnicas comumente utilizadas para remoção de poluentes. No que se refere a utilização de diferentes bioadsorventes, é importante analisar diversos a fim de compreender melhor as propriedades, grupos funcionais e parâmetros que influenciam em cada um, para que estudos futuros consigam aprimorar ainda mais a técnica e obter maiores remoções.

Por fim, a seguir, encontra-se a discussão das condições ótimas obtidas nos estudos escolhidos:

### 5.1.1 pH

A análise de pH no sistema de bioadsorção não é tão simples, isso devido a interferências que algumas variáveis podem gerar como a complexidade química da biomassa e o modo de uso do bioadsorvente (in natura ou modificado quimicamente).

Entre os estudos apresentados na Tabela 3, nota-se que a maioria desses apresentaram capacidade ótima de bioadsorção em pH ácido, como os estudos dos autores: Rezende *et al.* (2014), Silva Capri e Capri Neto (2016), Castro *et al.* (2018), Stavrinou, Aggelopoulos e Tsakiroglou (2018), Costa e Parambos (2019), Lima *et al.* (2020) e Alessandretti *et al.* (2021), Garg *et al.* (2021), Nurain *et al.* (2021) e Tokay e Akpınar (2021).

Segundo Moreira *et al.* (2009), a dependência de disponibilidade do metal está diretamente ligada aos grupos funcionais presentes no bioadsorvente e a química do metal. Em pH baixo, a superfície do bioadsorvente está associada aos os íons hidrônios que através de forças repulsivas limitam a aproximação de cátions metálicos, já que esses íons disputam com o cátion metálico pelos sítios ativos do bioadsorvente. Em contrapartida, em valores altos de pH há uma baixa disponibilidade de íons metálicos em razão da formação de complexos de hidróxidos solúveis.

Rigueto *et al.* (2020), afirma que quando há uma alta eficiência de remoção em pHs ácidos e, ao aumentar o pH ocorre a diminuição ou até mesmo a inibição da capacidade adsortiva, pode ser que os grupos orgânicos presentes na superfície do bioadsorventes tenham se solubilizados.

No estudo realizado por Lima *et al.* (2020) utilizando resíduos de açaí, as maiores remoções ocorrem em pH 5 e 6, que segundo Moreira (2010), é a faixa que se encontram os

valores de  $K_{ps}$  dos ácidos carboxílicos presentes na superfície do biossorvente, portanto quando o pH está próximo a esse valor, ocorre uma maior dissociação desses ácidos, que geram uma maior quantidade de espécies ( $\text{COO}^-$ ) responsáveis pela adsorção de íons metálicos.

Ramos *et al.* (2019) concluíram que cada uma das substâncias de interesse (Cu(II), Pb(II), Zn(II), Ni(II) e Cr(II)) apresentou uma eficiência utilizando a casca de maracujá, o que se é esperado, variando entre 58,65% e 98,86%, ocorrendo em pH 8 (básico). Esse valor adotado no estudo foi determinado através da determinação do PCZ (ponto de carga zero) que apresentou valor de 8,5. No entanto, segundo os autores, em valores de pH muito menores que o PCZ, as superfícies ionizáveis estão protonadas, podendo provocar uma repulsão entre os íons metálicos e a superfície. E, em pH maiores que o PCZ, pode ocorrer a precipitação de hidróxidos metálicos insolúveis, o que faz necessário avaliar outros fatores de adsorção, e não apenas a relação de pH com o biossorvente.

Utilizando pó da casca de coco verde, Castro *et al.* (2018) teve altas eficiências em pH ácido, onde os autores afirmam que as substâncias de interesse ( $\text{Pb}^{2+}$  e  $\text{Ni}^{2+}$ ) em pH básico formam bases insolúveis que não são adsorvidas pela fibra de coco.

Rezende *et al.* (2014) e Silva, Capri e Capri Neto (2016) estudaram como substância de interesse o Cr(IV), onde os pHs ótimos de remoção foram de 2 e 2,5 que, de acordo com Silva, Capri e Capri Neto (2016), nas soluções contendo Cr(VI) o íon predominante é o  $\text{HCrO}_4^-$ , o qual é atraído através da superfície do biossorvente que é protonada.

Costa e Maffessoni (2019) utilizando o bagaço e engaço na remoção dos íons  $\text{Cu}^{2+}$  obteve como remoção máxima de biossorção o pH 10. Conformes os autores, a justificativa se dá pela concorrência entre os íons  $\text{OH}^-$  e as espécies de metais pela superfície do biossorvente. Ma *et al.* (2018) utilizaram a casca de uva na remoção do corante azul de metileno e também tiveram a maior remoção em pH básico.

Beltran *et al.* (2020) decidiu utilizar o pH 7, mesmo o experimento tendo uma maior capacidade adsortiva em pH 6. Segundo os autores, a diferença entre a capacidade entre ambos os pHs é pouca e, então, optou-se pelo pH natural.

Na realização de seu estudo, Araujo *et al.* (2021) utilizou o pH 7,84, natural da solução, mas não justificou a escolha.

Já nos estudos feitos por Alessandretti *et al.* (2021) e Costa e Paranhos (2019), ambos tiveram o pH 2 como maior capacidade de biossorção, onde Costa e Paranhos (2019), explicam que a remoção é devido a protonação de grupos presentes no biossorvente, bem como pelas propriedades aniônicas do corante.

Com a análise do pH foi possível notar que boa parte dos estudos analisados apresentaram maiores eficiências em pH ácido. No entanto, não é possível concluir que quanto mais ácido for a substância, maior será a eficiência, já que diversos fatores podem interferir na análise como leituras incorretas, aparelhos calibrados incorretamente, características próprias dos bio sorventes, entre outros. Aliás, na análise de pH, após atingir a maior capacidade de remoção da substância de interesse, o pH sofre alteração, o que pode ser explicado pelo fato das mudanças nas cargas superficiais da biomassa e também da disputa dos sítios ativos por outros íons.

### **5.1.2 Temperatura**

Em relação a temperatura dos estudos analisados, quase todos os autores não analisaram a interferência desse fator e fizeram o método em temperatura ambiente. Alessandretti *et al.* (2021) foram os únicos a analisarem esse parâmetro e avaliaram a eficiência em temperaturas de 30°, 40°C e 50°, tendo como condição ótima, 50°C. Segundo Dias *et al.* (2019), a temperatura age principalmente na constante de velocidade de reação, onde o aquecimento aumenta a energia cinética, a mobilidade dos componentes do adsorbato e a difusão intrapartícula do componente a ser adsorvido. Além disso, o aumento da temperatura pode desobstruir os poros internos do bio sorvente, aumentando a área superficial e promovendo a entrada de moléculas maiores no interior do material.

A análise de temperatura não apresentou relação com outros parâmetros, visto que apenas um dos autores selecionados analisaram tal parâmetro. Para estudos futuros recomenda-se variar os valores de temperatura, pois alguns trabalhos conseguiram ótimas eficiências de remoção mesmo em temperatura ambiente, o que possivelmente pode aumentar em temperaturas maiores.

### **5.1.3 Velocidade de agitação**

Silva Capri e Capri Neto (2016) analisaram as velocidades de agitação de 300, 400, 500, 600 e 1000 rpm, como conclusão teve-se que esse parâmetro não influenciou consideravelmente na capacidade de adsorção. No entanto, os autores apenas estudaram o parâmetro separado, sem variar outros parâmetros, como por exemplo o pH, o que poderia ter gerado outros resultados.

Analisando os estudos e os parâmetros sobre velocidade de agitação, também foi possível perceber que a maioria dos autores não estudaram esse parâmetro, apenas estabeleceram determinada velocidade para seu estudo. Uma possível explicação se dá pelo fato de os autores terem analisados outros estudos inicialmente e então optou-se por velocidades disponíveis na literatura pesquisada. Porém, para maiores conclusões, os autores deveriam ter variado os valores do parâmetro a fim de se encontrar uma relação com os demais.

#### 5.1.4 Tempo de contato

Alguns dos autores utilizaram intervalos de tempo para se obter o tempo ideal, sendo esse a condição ótima para a bioadsorção. Já outros optaram por escolher tempos utilizados em outros estudos, como é o caso de Castro *et al.* (2018).

Costa e Maffessoni (2019) utilizaram três tempos de contato: 30 min, 60 min e 90 min, com percentuais de remoção de 72%, 75% e 30%, sendo que a maior remoção ocorreu em 60 min. Porém, os autores escolherem como tempo ideal 30 min, com a justificativa de que se deve evitar tempos grandes a fim de economizar em gastos energéticos no processo de mistura.

Segundo Doğan, Özdemir e Alkan (2007), o tempo de contato é um dos fatores fundamentais no processo de adsorção, pois uma rápida adsorção do adsorbato e alcance ao equilíbrio significa que o adsorvente é eficiente. No entanto, nas adsorções que envolvem interação de natureza química, o tempo para atingir o equilíbrio é maior. Inicialmente, o contato entre o adsorvente e o adsorbato é rápido devido ao fácil acesso do adsorbato nos sítios ativos livres na superfície do adsorvente, mas durante o processo a quantidade de sítios ativos diminui, afetando o acesso a eles pela repulsão que ocorre entre o adsorbato presente no adsorvente e na solução, o que aconteceu na maioria dos estudos analisados.

Em relação ao tempo de contato, assim como dito anteriormente foi possível perceber que alguns autores identificaram o tempo ideal para seguir com o estudo, outros utilizaram tempos encontrados em estudos pré-escolhidos em literatura e outros diminuíram os tempos a fim de evitar gastos energéticos, o que é bastante vantajoso analisando pelo setor ambiental. Também foi notório que em alguns casos com tempos de contato não tão longos, foi obtido altas eficiências de remoção. No entanto, não há como concluir a relação com outros parâmetros.

#### 5.2 VANTAGENS E DESVANTAGENS DOS BIOSSORVENTES ANALISADOS

Analisando os estudos no geral, a vantagem que mais se destaca é a não utilização de tratamento químicos, como no estudo de Silva, Capri e Capri Neto (2019), onde os autores optaram por não realizar o tratamento químico, que favorece a capacidade de bioadsorção, pensando na geração de efluentes quando a metodologia for aplicada em amostras reais, além de evitar custos na técnica em si, já que a utilização das biomassas tem como uma de suas vantagens remover poluentes com custos de operação e implantação baixas. Além disso, mesmo não se utilizando pré-tratamentos, os bioadsorventes apresentam capacidades de bioadsorção consideráveis, comprovado no estudo feito por Stavrinou, Aggelopoulos e Tsakiroglou (2018), onde foram utilizadas casca de banana, casca de pepino e casca de batata na remoção dos corantes azul de metileno e Orange G. Como resultado foi possível concluir que os

biossorventes tiverem capacidades adsorptivas maiores ou parecidas com corantes usados em outros estudos e que foram modificados quimicamente.

Enquanto a desvantagem, foi possível notar que muitos autores analisam poucos parâmetros, o que pode acarretar em resultados menos efetivos da capacidade de biossorventes. Por se tratar de uma técnica que ainda é considerada como nova da área e vem sendo estudada, seria interessante realizar estudos completos, com maiores intervalos de pH, tempos de contato, velocidades de agitação, entre outros. Pois, além de ser possível identificar estudos com poucos parâmetros de estudo, também foi possível notar que alguns utilizam valores encontrados em literatura, sendo que seria mais interesse que os próprios autores pudessem tirar suas próprias conclusões e assim, auxiliar no desenvolvimento do estudo da técnica de biossorção e no uso de biossorventes.

## **6 CONSIDERAÇÕES FINAIS**

Através da realização desse estudo, foi possível notar que a busca por métodos alternativos aos convencionais aumentou consideravelmente nas últimas décadas, principalmente a aplicação de biossorventes na técnica de biossorção por se tratar de um método econômico e eficiente.

Além disso, a utilização de resíduos agroindustriais se torna uma boa opção, visto que o setor agroindustrial no Brasil é extenso e com grandes variedades de resíduos. Avaliando o pilar ambiental, há a redução de resíduos descartados de maneira inadequada e a descontaminação de recursos hídricos, favorecendo ao meio ambiente e alcançando o desenvolvimento sustentável.

Nas análises feitas através dos biossorventes provenientes de biomassas agroindustriais, todos apresentaram boa capacidade de biossorção, comprovando a eficiência do biossorvente na técnica. Ao analisar cada um dos parâmetros (pH, temperatura, velocidade de agitação e tempo de contato) não foi possível identificar relações com outros parâmetros, devido a falta de análise de parâmetros de alguns autores. No entanto, mesmo não sendo possível ter uma conclusão, notou-se que em alguns estudos com pH ácido e tempos de contatos não tão longos, foi alcançado eficiências altas

Por fim, recomenda-se que para estudos futuros sejam estudados e analisados mais parâmetros que possam interferir na técnica, visto que alguns autores se limitaram a alguns parâmetros, ou ainda, se basearam em estudos já encontrados na literatura.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AKSU, Zümriye. Application of biosorption for the removal of organic pollutants: a review. *Process biochemistry*, v. 40, n. 3-4, p. 997-1026, 2005.
- ALESSANDRETTI, I. *et al.* Biossorção do corante vermelho escarlate direto por bagaço de mandioca. **Research, Society and Development**, v. 10, n. 4, p. 16510413964-16510413964, 2021.
- ALLEONI, L. R. F.; CAMARGO, O. A.; CASAGRANDE, J. C. Isotermas de Langmuir e de Freundlich na descrição da adsorção de boro em solos altamente intemperizados. **Scientia Agricola**, v. 55, p. 379-387, 1998.
- ARAÚJO, L. A. *et al.* Estudo cinético da biossorção de vermelho neutro por casca de pinha (*Annona squamosa*). **Brazilian Journal of Development**, v. 7, n. 4, p. 43317-43326, 2021.
- BARROS, A. J. M. **Estudo da formação de complexos pelo processo de biossorção**. 2006. Dissertação (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Química, Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2006.
- BARROS, D. C.; CARVALHO, G.; RIBEIRO, M. A. Processo de biossorção para remoção de metais pesados por meio de resíduos agroindustriais: uma revisão. **Revista Biotecnologia & Ciência**, v. 6, n. 1, p. 01-15, 2017.
- BELTRAN, L. B. *et al.* Processo de biossorção de corante utilizando casca de tangerina (*Citrus reticulata*). **Brazilian Journal of Development**, v. 6, n. 6, p. 41760-41771, 2020.
- BITTAR, D. B. **Determinação dos metais pesados Cd, Cu, Cr e Pb nas águas do Rio Uberabinha e proposta de adsorção por adsorventes naturais**. 2008. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-graduação em Química. Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2008.
- BONIOLO, M. R. **Biossorção de urânio nas cascas de banana**. 2008. Dissertação (Doutorado) – Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares. Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008.
- BOOCK, M. V.; MACHADO NETO, J. G. Estudos sobre a toxicidade aguda do oxicloreto de cobre para o peixe *Poecilia reticulata*. **Boletim do Instituto de Pesca**, v. 31, n. 1, p. 29-35, 2005.
- BOTREL, B. M. C. **APROVEITAMENTO DE RESÍDUOS AGROINDUSTRIAIS NA ADSORÇÃO DO CORANTE AZUL DE METILENO: ALIANÇA FAVORÁVEL ENTRE VIABILIDADE ECONÔMICA E DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL**. 2013. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-graduação em Agroquímica. Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2013.
- BRUNDTLAND, G. H. Nosso Futuro Comum. Relatório Brundtland. **Our Common Future: United Nations**, 1987.

- CARMO, T. S. **Biossorção de cromo hexavalente em cascas de frutas**. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química. Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2013.
- CARVALHO, T. E. M.; FUNGARO, D. A.; IZIDORO, J. C. Adsorção do corante reativo laranja 16 de soluções aquosas por zeólita sintética. **Química Nova**, v. 33, n. 2, p. 358-363, 2010.
- CASTRO, B. *et al.* Material biossorvente para remoção de metais potencialmente tóxicos em água de abastecimento. **Ciência e Natura**, v. 42, p. 19, 2018.
- COSTA, J. A. S.; PARANHOS, C. M. Evaluation of rice husk ash in adsorption of Remazol Red dye from aqueous media. **SN Applied Sciences**, v. 1, n. 5, p. 1-8, 2019.
- COSTA, L. F. F.; MAFFESSIONI, D. Utilização da biomassa de uva como biossorvente na remoção de metais pesados de águas residuais. **Revista Brasileira de Ciência, Tecnologia e Inovação**, v. 4, n. 2, p. 157-168, 2019.
- COUTO, G. M. *et al.* **Utilização de serragem de Eucalyptus sp. na preparação de carvões ativados**. 2009. Dissertação (Mestrado) - Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia da Madeira. Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2009.
- DIAS, G. *et al.* Biorremediação de efluentes por meio da aplicação de microalgas-uma revisão. **Química Nova**, v. 42, p. 891-899, 2019.
- DOĞAN, M.; ÖZDEMİR, Y.; ALKAN, M. Adsorption kinetics and mechanism of cationic methyl violet and methylene blue dyes onto sepiolite. **Dyes and Pigments**, v. 75, n. 3, p. 701-713, 2007.
- EL-SAYED, H. E. M.; EL-SAYED, M. M. H. Assessment of food processing and pharmaceutical industrial wastes as potential biosorbents: a review. **BioMed research international**, v. 2014, 2014.
- ESPOSITO, A.; PAGNANELLI, F.; VEGLIÒ, Francesco. pH-related equilibria models for biosorption in single metal systems. **Chemical Engineering Science**, v. 57, n. 3, p. 307-313, 2002.
- FERREIRA, R. V. P. **Aplicação de biossorventes no tratamento de rejeitos radioativos líquidos**. 2014. Dissertação (Doutorado) – Instituto de Pesquisa Energéticas e Nucleares. Universidade de São Paulo, São Paulo, 2014.
- FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS (FAO). **O desperdício alimentar tem consequências ao nível do clima, da água, da terra e da biodiversidade - novo estudo da FAO**. Disponível em: <https://www.fao.org/news/story/pt/item/204029/icode/>. Acesso em: 30 jan. 2022.
- FRANCO, C. C.; CASTRO, M. M.; WALTER, M. E. Estudo das cascas de banana das variedades prata, caturra e maçã na biossorção de metais pesados gerados pelos efluentes dos laboratórios do Centro Universitário de Belo Horizonte. **e-xacta**, v. 8, n. 1, p. 99-115, 2015.



FROTA, E. B; VASCONCELOS, N. M. S. **Química Ambiental**. 2. ed. Fortaleza: Editora da Universidade Estadual do Ceará, 2019.

GARG, R. *et al.* Water remediation using biosorbent obtained from agricultural and fruit waste. **Materials Today: Proceedings**, 2021.

GONÇALVES JÚNIOR, A. C. Descontaminação e monitoramento de águas e solos na região amazônica utilizando materiais adsorventes alternativos, visando a remoção de metais pesados tóxicos e pesticidas. **Inclusão Social**, Brasília, v. 6, n. 2, p. 105-113, 2013.

IBERDROLA. **A poluição da água: como não colocar em perigo a nossa fonte de vida.** s.d. Disponível em: <https://www.iberdrola.com/sustentabilidade/poluicao-da-agua#:~:text=CONSEQUÊNCIAS%20DA%20POLUIÇÃO%20DA%20ÁGUA.%20A%20de%20terioração%20da,crescimento%20e%20agrava%20a%20pobreza%20em%20muitos%20países>. Acesso em: 18 mar. 2022.

KURNIAWAN, T. A. *et al.* Physico–chemical treatment techniques for wastewater laden with heavy metals. **Chemical engineering journal**, v. 118, n. 1-2, p. 83-98, 2006.

LIMA, K. D. *et al.* 2021. PORONGO COMO BIORSORVENTE: CARACTERÍSTICAS FÍSICO-QUÍMICAS, APLICAÇÕES TECNOLÓGICAS E AMBIENTAIS. **Revista Mundi Engenharia, Tecnologia e Gestão**. v. 6, n. 4, p. 384-01, 384-17, 2021.

LIMA, L. R. *et al.* Remoção de Cu (II), Zn (II) e Ni (II) utilizando resíduo de açaí (*Euterpe oleracea* Mart.) como biossorvente em solução aquosa. **Revista Virtual de Química**, v. 12, n. 5, 2020.

MA, L. *et al.* Microwave-hydrothermal treated grape peel as an efficient biosorbent for methylene blue removal. **International journal of environmental research and public health**, v. 15, n. 2, p. 239, 2018.

MAGDALENA, C. P. **Adsorção de corante reativo remazol vermelho RB de solução aquosa usando zeólita de cinza de carvão e avaliação da toxicidade aguda com *Daphnia similis***. 2010. Dissertação (Mestrado) - Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares. Universidade de São Paulo, São Paulo, 2010.

MARIN, P. *et al.* ESTUDO DO EQUILÍBRIO DE BIORSORÇÃO DE ZINCO PELA MACRÓFITA *SALVINIA SP.* PARA OBTENÇÃO DE ÁGUA POTÁVEL. 2014. **Águas Subterrâneas**. Disponível em: <https://aguassubterraneas.abas.org/asubterraneas/article/view/28327/18432>. Acesso em 02 fev. 2022.

MCCABE, W. L.; SMITH, J. C.; HARRIOTT, P. Unit operations of chemical engineering. 5th ed. ed. New York: McGraw-hill, 1993.

MICHALAK, I.; CHOJNACKA, K.; WITEK-KROWIAK, A. State of the art for the biosorption process - a review. **Applied biochemistry and biotechnology**, v. 170, n. 6, p. 1389-1416, 2013.

MILANI, Priscila Aparecida. **Bagaço de cana-de-açúcar e raízes de alface empregados como bioissorventes de íons metálicos em meio aquoso**. 2017. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação Agricultura e Ambiente. Universidade Federal de São Carlos, Araras, 2017.

MOREIRA, D. R. *et al.* **Desenvolvimento de adsorventes naturais para tratamento de efluentes de galvanoplastia**. Programa de Pós-graduação em Engenharia e Tecnologia de Materiais. 2010. Dissertação (Mestrado) – Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2010.

MOREIRA, S. A. *et al.* Remoção de metais de solução aquosa usando bagaço de caju. **Química nova**, v. 32, p. 1717-1722, 2009.

MURALEEDHARAN, T. R.; IYENGAR, L; VENKOBACHAR, C. Biosorption: an attractive alternative for metal removal and recovery. **Current Science**, v. 61, n. 6, p. 379-385, 1991.

NASCIMENTO, R. F. *et al.* **Adsorção: aspectos teóricos e aplicações ambientais**. Fortaleza: Imprensa Universitária, 2014.

NURAIN, A. *et al.* Utilization of Banana (*Musa sapientum*) Peel for Removal of Pb<sup>2+</sup> from Aqueous Solution. **Journal of Multidisciplinary Applied Natural Science**, 2021.

OLIVEIRA, F. M. *et al.* Avaliação do processo adsorptivo utilizando bagaço de cana-de-açúcar como material adsorvente na remoção do corante azul de metileno. **Tecnologias em pesquisa: ciências exatas e biológicas**, v. 1, 2017.

PEREIRA, R.S. **POLUIÇÃO HÍDRICA: CAUSAS E CONSEQUÊNCIAS**. IPH-UFRGS. v. 1, n. 1. p. 20-36. 2004. Disponível em: <https://www.vetorial.net/~regissp/pol.pdf>. Acesso em 29 jan. 2022.

RAMOS, B. P. *et al.* Casca de maracujá como adsorvente de íons metálicos em efluente de galvanoplastia. **Brazilian Journal of Development**, v. 5, n. 6, p. 6076-6091, 2019.

REDDY, *et al.* Banana peel as a biosorbent in removal of nitrate from water. **International advanced research journal in science, engineering and technology**, v. 2, n. 10, 2015.

REZENDE, J. C. T. *et al.* Cinética de adsorção de Cr (VI) de soluções aquosas usando sementes de acerola. **Scientia Plena**, v. 10, n. 10, 2014.

RIGUETO, C. V. T. *et al.* Water hyacinth (*Eichhornia crassipes*) roots, an amazon natural waste, as an alternative biosorbent to uptake a reactive textile dye from aqueous solutions. **Ecological Engineering**, v. 150, p. 105817, 2020.

ROCHA, O. R. S. *et al.* Avaliação do processo adsorptivo utilizando mesocarpo de coco verde para remoção do corante cinza reativo BF-2R. **Química nova**, v. 35, n. 7, p. 1369-1374, 2012.

ROCHA, W. D. **Carvão ativado a partir de resíduos agrícolas e suas aplicações na adsorção de íons metálicos**. 2006. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-graduação do Departamento de Engenharia Mineral. Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2006.

RODRIGUES, R. F. *et al.* Adsorção de metais pesados em serragem de madeira tratada com ácido cítrico. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 11, n. 1, p. 21-26, 2006.

SANTOS, F. A. **Desempenho e conformidade de biossorventes produzidos a partir de resíduos florestais e sua aplicação no tratamento de cromo de efluente industrial de galvanoplastia**. 2013. Dissertação (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Tecnologia de Materiais. Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2013.

SCHNEIDER, I. A. H. **Biossorção de metais pesados com a biomassa de macrófitos aquáticos**. 1995. Dissertação (Doutorado) - Pós-graduação em Engenharia Metalúrgica e dos Materiais. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1995.

SFAIR, I. C. A. **Avaliação da utilização de cinzas de queima de bagaço de cana-de-açúcar na biossorção de corantes presentes em águas residuárias têxteis**. 2021. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Ambiental) - Universidade Federal de São Carlos, Buri, 2021.

SILVA, G. S.; CAPRI, M. R.; CAPRI NETO, A. BIOSSORÇÃO DE Cr (VI) PELA CASCA DE BANANA NANICA NO TRATAMENTO DE EFLUENTES. **Interfaces Científicas-Saúde e Ambiente**, v. 5, n. 1, p. 153-162, 2016.

SILVA, J. L. B. C. *et al.* Biossorção de metais pesados: uma revisão. **Revista Saúde & Ciência Online**, v. 3, n. 3, p. 137-149, 2014.

SILVA, L. L. *et al.* Utilização dos resíduos da extração do óleo bruto do café na produção de material adsorvente. **Revista Acta Ambiental Catarinense**, v. 13, n. 1/2, p. 17-30, 2016.

SILVA, M. S. P. *et. al.* Influência do método de preparo da casca do coco verde como biossorvente para aplicação na remoção de metais em soluções aquosas. **Revista DAE**, São Paulo, n. 193, p. 66-73. 2013.

SON, E. *et al.* A novel approach to developing a reusable marine macro-algae adsorbent with chitosan and ferric oxide for simultaneous efficient heavy metal removal and easy magnetic separation. **Bioresource technology**, v. 259, p. 381-387, 2018.

SOUSA, F.W. *et al.* The use of green coconut shells as absorbents in the toxic metals. **Química Nova**, v.30, p.1153-1157, 2007.

STAVRINOU, A.; AGGELOPOULOS, C. A.; TSAKIROGLOU, C. D. Exploring the adsorption mechanisms of cationic and anionic dyes onto agricultural waste peels of banana, cucumber and potato: adsorption kinetics and equilibrium isotherms as a tool. **Journal of environmental chemical engineering**, v. 6, n. 6, p. 6958-6970, 2018.

TARLEY, C. R. T.; ARRUDA, M. A. Z. Adsorventes naturais: potencialidades e aplicações da esponja natural (*Luffacylindrica*) na remoção de chumbo em efluentes de laboratório. **Revista Analytica**, v. 4, p. 25-31, 2003.

TIBURTIUS, E. R. L.; PERALTA-ZAMORA, P.; LEAL, E. Contaminação de águas por BTXs e processos utilizados na remediação de sítios contaminados. **Química nova**, v. 27, n. 3, p. 441-446, 2004.

TOKAY, B.; AKPINAR, I. A comparative study of heavy metals removal using agricultural waste biosorbents. **Bioresource Technology Reports**, v. 15, p. 100719, 2021.

VAGHETTI, J.C. P. **Utilização de biossorventes para remediação de efluentes aquosos contaminados com íons metálicos**. 2009. Dissertação (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Química. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Rio Grande do Sul, 2009.

VILAR, V. J. P. **Remoção de íões metálicos em solução aquosa por resíduos da indústria de extracção de agar**. 2006. Dissertação (Doutorado) – Departamento de Engenharia Química. Faculdade de Engenharia da Universidade de Porto, Porto, 2006.

VOLESKY, B. Biosorption and me. **Water Res.** 41: 4017-4029, 2007.

VOLESKY, B. Detoxification of metal-bearing effluents: biosorption for the next century. **Hydrometallurgy**, v. 59, n. 2-3, p. 203-216, 2001.

VOLESKY, B. **Sorption and Biosorption**. Chemical Engineering. McGill University. Montreal. 2003.

VON SPERLING, M. **Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos**. 2. Ed. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental da Universidade Federal de Minas Gerais, 1996.