



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ  
CENTRO DE TECNOLOGIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA  
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA**

**DOUGLAS FERREIRA CAVALCANTE**

**BIOSSORÇÃO DO ÍON METÁLICO Cd<sup>2+</sup> UTILIZANDO BIOMASSAS  
RESIDUAIS COMO ADSORVENTES ALTERNATIVOS**

**FORTALEZA  
2024**

DOUGLAS FERREIRA CAVALCANTE

BIOSSORÇÃO DO ÍON METÁLICO Cd<sup>2+</sup> UTILIZANDO BIOMASSAS  
RESIDUAIS COMO ADSORVENTES ALTERNATIVOS

Trabalho de conclusão de curso  
apresentado ao Curso de Graduação em  
Engenharia Química do Centro de  
Tecnologia da Universidade Federal do  
Ceará, como requisito parcial à obtenção  
do grau de Bacharel Engenharia Química.

Orientador: Prof. Dr. Francisco Murilo  
Tavares de Luna.

FORTALEZA

2024

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação

Universidade Federal do Ceará

Sistema de Bibliotecas

Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

---

C364b Cavalcante, Douglas Ferreira.

Biossorção do íon metálico Cd<sup>2+</sup> utilizando biomassas residuais como adsorventes alternativos / Douglas Ferreira Cavalcante. – 2024.

36 f. : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Curso de Engenharia Química, Fortaleza, 2024.

Orientação: Prof. Dr. Francisco Murilo Tavares de Luna.

1. Biossorção. 2. Cádmio. 3. Polarografia. 4. Biomassa. 5. Tratamento de efluente. I. Título.

---

CDD 660

DOUGLAS FERREIRA CAVALCANTE

BIOSSORÇÃO DO ÍON METÁLICO Cd<sup>2+</sup> UTILIZANDO BIOMASSAS  
RESIDUAIS COMO ADSORVENTES ALTERNATIVOS

Monografia apresentada à disciplina de Trabalho Final de Curso do Departamento de Engenharia Química da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial para obtenção do Grau de Bacharel em Engenharia Química.

Aprovado em 17/09/2024

BANCA EXAMINADORA

---

Prof. Dr. Francisco Murilo Tavares de Luna (Orientador)  
Universidade Federal do Ceará

---

Dra. Darlane Wellen Freitas Soares  
Universidade Federal do Ceará

---

Prof. Dr. Daniel Vasconcelos Gonçalves  
Universidade Federal do Ceará

Aos meus pais, Maria Ednilza Ferreira de Oliveira Cavalcante e José Aerton Cavalcante, por serem a minha inspiração e o meu maior apoio. A vocês dedico este trabalho com imenso carinho e gratidão.

## AGRADECIMENTOS

A Deus, por ter me concedido saúde, forças, paciência e sabedoria para superar todos os desafios desta jornada.

Aos familiares, que sempre estiveram ao meu lado e acreditaram em mim. De modo particular à minha tia Josefa Ferreira de Lima Neta (Professora), que na minha infância contribuiu de forma significativa no processo educacional e a minha vó Luiza Dilza Ferreira de Lima (*in memoria*) pelo carinho e amor.

Ao Pe. Francisco Adair Ramos de Abreu, padre da Arquidiocese de Fortaleza, que sempre me apoiou e acreditou no meu potencial e que até os dias de hoje sempre se alegra com as minhas conquistas. Obrigado pela amizade, nunca esquecerei das pequenas e grandes coisas que fez por mim.

A Dra. Darlane Wellen Freitas Soares que no início da faculdade acreditou em mim e me incentivou a vivenciar o mundo da pesquisa científica, no qual aprendi muito.

Ao professor Dr. Francisco Murilo Tavares de Luna, pela orientação e pelas contribuições para a realização deste trabalho.

Agradeço aos meus amigos Diony, Vitória, e Vitor, que desde o início do curso estiveram ao meu lado, me apoiando em todos os momentos. A paciência do Diony nas explicações, além de sua preocupação em sempre querer o meu melhor foi algo inesquecível, a alegria da Vitória e do Vitor em cada conquista foram fundamentais para mim. Desejo todo o sucesso a cada um de vocês e nunca me esquecerei de todos os momentos de companheirismo e amizade que tornaram essa jornada mais leve e significativa.

E aos demais amigos, que me estiveram comigo durante toda a minha vida e me ajudaram seja com uma palavra de apoio, uma conversa amiga ou um incentivo para a vida.

“Se cheguei até aqui foi porque me apoiei  
no ombro dos gigantes.” *Isaac Newton*

## RESUMO

O meio ambiente vem sendo contaminado constantemente por metais em decorrência de atividades industriais e agroindustriais. A consequência deste tipo de contaminação é preocupante, prejudicando a fauna, a flora e os seres humanos. Sendo assim, faz-se necessário trabalhar para solucionar este problema por meio da descontaminação de efluentes líquidos feita através da recuperação ou remoção dos metais do meio ambiente, entretanto, os tratamentos convencionais empregados apresentam uma baixa eficiência de remoção e sua aplicação requer um alto investimento. Este trabalho tem como objetivo analisar a capacidade duas biomassas, identificadas como B1 e B2, no processo de adsorção do metal  $Cd^{2+}$  em solução sintética. Foram avaliadas as características de superfície da biomassa através da determinação do ponto de carga zero. Para os ensaios, foram utilizados  $6\text{ g.L}^{-1}$  de cada biomassa, em contato com soluções sintéticas de  $Cd^{2+}$  com concentrações de  $10\text{ mg.L}^{-1}$  e  $20\text{ mg.L}^{-1}$ , ambas as biomassas foram submetidas às mesmas condições experimentais. A capacidade de adsorção das biomassas foi determinada através de estudos cinéticos. O ponto de Carga Zero das biomassas B1 e B2 estão a partir do pH 5,5 e do pH 4,7, respectivamente. Para as análises, foi utilizada a técnica de voltametria de pulso diferencial, por meio de um polarógrafo acoplado a um potenciómetro, empregando um eletrodo de mercúrio com gota pendente (HMDE) para a determinação do cádmio. Ao fim dos experimentos, pode-se concluir que as biomassas apresentaram resultados satisfatório, principalmente a biomassa B2. Isso porque, a biomassa B1 apresentou uma capacidade de adsorção em 63% após 90 min em contato com  $10\text{ mg.L}^{-1}$  do metal e 47% nos primeiros 30 min. No caso da biomassa B2, a capacidade de adsorção foi de 100% nos primeiros 30 min para as duas concentrações do metal estudado. Assim, concluiu-se que as biomassas apresentam potencial satisfatório no processo de remoção do metal  $Cd^{2+}$ .

**Palavras-chave:** Biossorção; Cádmio; Polarografia; Biomassa; Tratamento de Efluente.

## ABSTRACT

The environment is constantly being contaminated by metals as a result of industrial and agro-industrial activities. The consequences of this type of contamination are worrying, damaging fauna, flora and human beings. It is therefore necessary to work to solve this problem by decontaminating liquid effluents through the recovery or removal of metals from the environment. However, the conventional treatments used have low removal efficiency and their application requires a high level of investment. The aim of this study was to analyze the ability of two biomasses, identified as B1 and B2, to adsorb the metal Cd<sup>2+</sup> in a synthetic solution. The surface characteristics of the biomass were evaluated by determining the zero charge point. For the tests, 6 g.L<sup>-1</sup> of each biomass was used, in contact with synthetic Cd<sup>2+</sup> solutions with concentrations of 10 mg.L<sup>-1</sup> and 20 mg.L<sup>-1</sup>. Both biomasses were subjected to the same experimental conditions. The adsorption capacity of the biomasses was determined through kinetic studies. The Zero Charge point of biomasses B1 and B2 are at pH 5.5 and pH 4.7, respectively. For the analyses, the differential pulse voltammetry technique was used, using a polarograph coupled to a potentiostat, employing a mercury drop electrode (HMDE) for the determination of cadmium. At the end of the experiments, it can be concluded that the biomasses showed satisfactory results, especially biomass B2. This is because biomass B1 showed an adsorption capacity of 63% after 90 min in contact with 10 mg.L<sup>-1</sup> of the metal and 47% in the first 30 min. In the case of biomass B2, the adsorption capacity was 100% in the first 30 min for the two metal concentrations studied. Thus, it was concluded that the biomasses have satisfactory potential in the Cd<sup>2+</sup> metal removal process.

**Keywords:** Biosorption; Cadmium; Polarography; Biomass; Effluent Treatment.

## **LISTA DE ILUSTRAÇÕES**

Figura 1 – Diagrama esquemático de um processo de bioassorção .....	19
Figura 2 - Processo de adsorção de um fluido aquoso .....	22
Figura 3 - Exemplo de gráfico polarográfico.....	23
Figura 4 - Potenciómetro/Galvanômetro Autolab PGSTAT100N acoplado ao módulo polarográfico Metrohm 663 VA Stand ® da Metrohm.....	27

## **LISTA DE GRÁFICOS**

Gráfico 1 - Aplicações Mundiais de Cádmio (2019).....	17
Gráfico 2 - Potencial de carga zero (pHpcz) para as biomassas B1 e B2.....	29

## **LISTA DE TABELAS**

Tabela 1 – Resíduos contendo metais pesados produzidos nos países desenvolvidos.....	15
Tabela 2 – limites de concentrações aceitáveis pelo EPA e CONAMA.....	16
Tabela 3 - Parâmetros utilizados nas análises para determinação do metal Cádmio.....	28
Tabela 4 – Variação de pH no processo de adsorção.....	30
Tabela 5 - Resultados da do processo de adsorção.....	31

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>11</b>
<b>2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>14</b>
<b>2.1 Metais Pesados .....</b>	<b>14</b>
<b>2.2 Cádmio .....</b>	<b>15</b>
<b>2.2.1 Descrição do metal .....</b>	<b>15</b>
<b>2.2.2 Produção do Cádmio .....</b>	<b>16</b>
<b>2.2.3 O Cádmio no meio ambiente.....</b>	<b>17</b>
<b>2.3 Biossorção.....</b>	<b>17</b>
<b>2.4 Métodos utilizados para a remoção de metais pesados .....</b>	<b>18</b>
<b>2.4.1 Precipitação Química .....</b>	<b>18</b>
<b>2.4.2 Troca Iônica .....</b>	<b>19</b>
<b>2.4.3 Osmose Reversa.....</b>	<b>19</b>
<b>2.4.3 Tratamento eletroquímico .....</b>	<b>20</b>
<b>2.4.4 Adsorção .....</b>	<b>20</b>
<b>2.5 Polarografia .....</b>	<b>21</b>
<b>2.6 Legislação Ambiental .....</b>	<b>22</b>
<b>3. MATERIAL E MÉTODOS.....</b>	<b>24</b>
<b>3.1 Biomassas .....</b>	<b>24</b>
<b>3.1.1 Captação das Biomassas.....</b>	<b>24</b>
<b>3.1.2 Preparo das Biomassas .....</b>	<b>24</b>
<b>3.2 Determinação do Ponto de Carga Zero (pH<sub>PCZ</sub>) .....</b>	<b>24</b>
<b>3.3 Preparo da solução aquosa do metal Cd (II).....</b>	<b>25</b>
<b>3.4 Esterilização de recipientes para os ensaios polarográficos .....</b>	<b>25</b>
<b>3.5 Cinética de adsorção .....</b>	<b>26</b>
<b>3.6 Determinação das concentrações dos metais por Polarografia.....</b>	<b>26</b>
<b>4. RESULTADOS E DISCUSÕES.....</b>	<b>28</b>
<b>4.1 Potencial de Carga Zero .....</b>	<b>28</b>
<b>4.2 Variação do pH durante o processo de adsorção .....</b>	<b>29</b>
<b>4.3 Cinética de adsorção de cádmio .....</b>	<b>29</b>
<b>5. CONCLUSÃO .....</b>	<b>32</b>
<b>TRABALHOS FUTUROS .....</b>	<b>32</b>
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>33</b>

## 1. INTRODUÇÃO

A poluição do solo e de sistemas aquáticos por metais pesados é um fator que afeta a qualidade do meio ambiente e acarreta grandes riscos de contaminação na vida do homem e dos seres vivos. Várias são as pesquisas que buscam métodos e meios de remoção destes contaminantes e seus impactos no ecossistema como um todo decorrente dos seus altos níveis de concentração. Esses metais são originários de processos naturais ou de atividades humanas, como a utilização de fertilizantes em áreas agrícolas e a atividade mineradora (MUNIZ, 2016).

A alta toxicidade dos metais pesados em contato com o corpo humano provoca o bloqueio nas atividades biológicas, inativando assim as enzimas devidos à ligação do metal aos sulfidrilos das proteínas. Com isso, o organismo pode sofrer danos irreversíveis em suas diferentes partes (VULLO, 2003).

Vários métodos de remoção de metais provenientes de águas residuais têm sido estudados e implantados em nível industrial. Destacam-se a adsorção utilizando carvões ativados ou outros sorventes apropriados (alumina, zeólitas etc.), precipitação e trocadores iônicos, os quais almejam remover a maior quantidade possível de concentrações residuais tóxicas de metais. Entretanto, foram observados certos entraves nesses métodos, tais como alto custo, baixa eficiência, complexidade operacional entre outros (CALFA e TOREM, 2007).

Na busca por novos métodos para o tratamento de metais pesados em soluções aquosas, vem sendo estudado o uso de biomassas residuais como ferramenta bioissorvente, a qual vem ganhando confiança nos últimos anos pelo seu bom desempenho na retirada desses contaminantes.

Os resíduos agroindustriais apresentam aplicações alternativas e mercados ainda pouco explorados. A indústria de alimentos, um dos setores mais importantes de transformação no Brasil, transforma recursos naturais em alimentos processados para atender as necessidades da população e garantir, com segurança, o abastecimento dos grandes centros urbanos (Timofiecsyk e Pawlowsky, 2000). Quantidades apreciáveis de casca, caroço dentre outros são descartados diariamente pela indústria alimentícia, gerando elevada quantidade de resíduos fibrosos com potenciais aplicações (Coelho et al., 2011).

Há inúmeras possibilidades de se fazer biossorção através de materiais biológicos, exemplo disso é a casca do coco verde (PINO, 2005), a casca da castanha do caju (COELHO, 2014), semente de manga (GARRIDO, 2021) e outros. Tais materiais apresentam baixo custo e grande eficiência no tratamento.

Nesse sentido, o uso das biomassas no processo adsorvente pode fortalecer o seu cultivo e descarte consciente, gerando uma diminuição do impacto ambiental e agregando valor às mesmas. Contribuindo, assim, para o fortalecimento da economia da região produtora.

Nesse estudo foi escolhido duas biomassas para estudo. A Biomassa 1 é proveniente do desperdício gerado por práticas na indústria alimentícia onde apenas uma pequena parte do alimento é aproveitada e o restante é descartado de forma inadequada prejudicial ao meio ambiente. Com mais de 1,5 milhões de toneladas produzidas anualmente, essa sobra poderia ser reaproveitada ao invés de contribuir para a poluição do solo e dos corpos d'água.

O fruto associado à Biomassa 1 contém um núcleo volumoso constituindo quase todo o seu volume e que é coberto por camadas fibrosas contendo substâncias de aproveitamento industrial, como celulose e lignina. Essa matéria-prima, atualmente desprezada, possui alta viabilidade para um aproveitamento sustentável e abre possibilidades para soluções que diminuam o impacto ambiental.

A biomassa 2 encontrado em abundância no Nordeste, consiste em um pequeno fruto de formato arredondado, casca fina e polpa envolvendo um caroço central, cuja coloração muda com o aperfeiçoamento do processo de maturação, variando de verde até tons de marrom apresenta um diâmetro que raramente ultrapassa os 2 centímetros. A presença de fibras e de constituintes vegetais em sua composição abre possibilidades de aplicação em diferentes áreas.

Esse tipo de fruto, apesar de não ter uma ampla comercialização na alimentação humana, desempenha, de qualquer modo, um peso importante no ciclo de vida da planta de onde é originado, além de ser um recurso natural que apresenta um potencial para ser explorado em diversos processos industriais, de forma sustentável. O desenvolvimento de novas aplicações para esse fruto pode resultar em produtos mais ecológicos e eficientes, com vantagens competitivas para o meio ambiente e a economia.

Neste contexto, o presente trabalho utilizou essas duas biomassas lignocelulósicas como adsorventes de baixo custo e alta eficiência para a remoção de

cádmio em solução aquosa. Através da determinação do ponto de carga zero, foi definido o pH ideal para os experimentos. Assim, busca-se avaliar o potencial dessas biomassas como alternativa sustentável aos métodos convencionais de tratamento de efluentes. A quantificação do cádmio na solução adsorvida foi realizada por voltametria de pulso diferencial, por meio de um polarógrafo acoplado a um potencistato, uma técnica eletroanalítica amplamente utilizada em estudos de biossorção e que possui alta sensibilidade e precisão.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 Metais Pesados

Os metais pesados possuem um grupo de aproximadamente 40 elementos. Para um metal ser atribuído como pesado é preciso em sua forma elementar apresentar densidade igual ou superior a 5 g/cm<sup>3</sup>, um elemento também pode ser atribuído como metal pesado se o seu número atômico for maior que 20 (CAÑIZARES, 2000).

A concentração desses metais nos vários efluentes gera grandes problemas ambientais, mesmo que estes sejam depositados em menores concentrações, acarretando diversos problemas ambientais, como a modificação das propriedades físico-químicas da água afetando toda a fauna e flora da região, e com isso afetando diretamente o ser humano.

Aproximadamente 10% dos resíduos produzidos pelos países desenvolvidos são formados por metais pesados. As quantidades de rejeitos produzidos nos países desenvolvidos são apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1 – Resíduos contendo metais pesados produzidos nos países desenvolvidos.

Setor	Limite (%)
Minas	57%
Agricultura	21%
Águas Residuais	9%
Indústria	8%
Urbano	5%

**Fonte:** ( MILIARUM, 2004 *apud* PINO, 2005).

Na Tabela 2 são apresentados os limites máximos aceitáveis para alguns metais em águas, segundo EPA (Environmental Protection Agency) e o CONAMA (Conselho Nacional do Meio Ambiente, resolução 357 de 2005) para águas de classe II.

Tabela 2 – limites de concentrações aceitáveis pelo EPA e CONAMA.

Elemento	Limite EPA	Limite CONAMA
Arsênio	0 µg/L	50 µg/L
Cromo (III)	10 µg/L	50 µg/L
Cromo (VI)	1 µg/L	5 µg/L
Cádmio	0,5 µg/L	1 µg/L
Chumbo	0 µg/L	30 µg/L
Níquel	7 µg/L	25 µg/L
Zinco	500 µg/L	500 µg/L

Fonte: PINO (2005).

## 2.2 Cádmio

### 2.2.1 Descrição do metal

Descoberto pelo químico Friedrich Strohmeyer na Alemanha em 1817, após estudos de compostos de zinco, o Cádmio (Cd) é um elemento que a 25°C apresenta-se em estado sólido, possui o número atômico 48 e uma massa atômica de 112,411 u. Integra o grupo dos metais, possui uma coloração cinza prateada metálica tornando-o inconfundível. Pode-se apresentar em diversas formas, como: folha, grânulo, pellet, pó, bastão, fio etc (BRADY e HUMISTON, 1986).

Além das propriedades citadas anteriormente, o Cádmio é macio, maleável e pode ser facilmente cortado. Porém, o mesmo apresenta um alto poder de toxicidade o que exige muita cautela em seu manuseio a fim de proteger a si mesmo e o meio ambiente. A sua produção está muito atrelada como um subproduto da extração de outros metais, como Zn, Cu e Pb (BRADY e HUMISTON, 1986).

Por apresentar propriedades únicas, o Cádmio está presente em diversas atividades industriais, como:

- **Anticorrosivo para o Aço Galvanizado:** atua como um escudo protetor contra a ferrugem no aço galvanizado, prolongando sua vida útil em estruturas, tubulações e outros componentes.
- **Pigmentos Vibrantes em Plásticos:** O sulfeto de cádmio e o selenito de cádmio conferem cores vibrantes e duradouras aos plásticos, utilizados em diversos produtos, desde brinquedos até eletrodomésticos.
- **Baterias Recarregáveis e Eficientes:** O cádmio é uma matéria-prima essencial para a fabricação das baterias recarregáveis de níquel-cádmio, que conferem energia portátil a ferramentas e produtos eletrônicos.

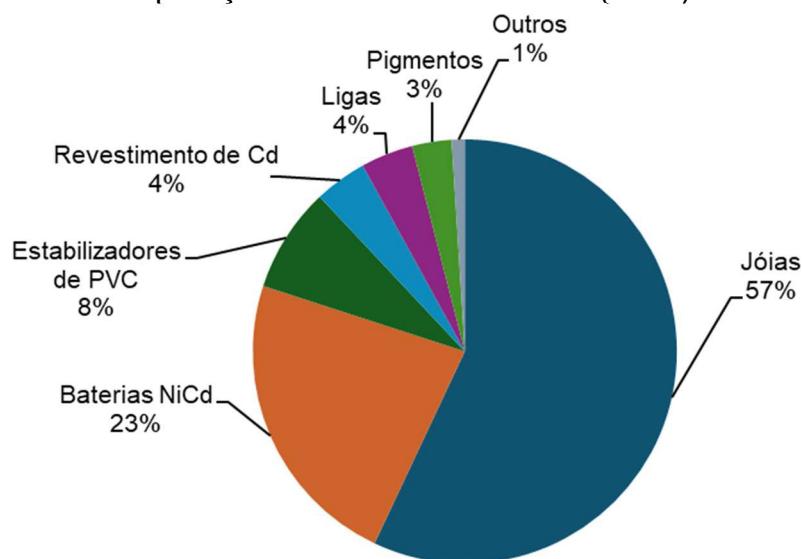
(CETESB, 2012)

### 2.2.2 Produção do Cádmio

O aumento da produção de cádmio está intrinsecamente ligado a atividades humanas. Essa produção no âmbito global oscilou entre 20.000 e 25.000 toneladas por ano nos últimos tempos, com algumas flutuações devido a fatores como demanda do mercado, preços e regulamentações ambientais (ICDA, 2021)

Essa quantidade cresce à medida que novos materiais que necessitam de Cd na sua composição são implementados. No gráfico 1, é possível visualizar as aplicações mundiais do cádmio.

Gráfico 1 - Aplicações Mundiais de Cádmio (2019).



Fonte: ICDA (2021).

### **2.2.3 O Cádmio no meio ambiente**

O cádmio (Cd) é liberado na atmosfera por fontes naturais, como atividades vulcânicas, erosão de rochas e incêndios florestais, e por fontes humanas, como mineração e produção de produtos contendo cádmio (baterias, pigmentos, PVC, recobrimentos, ligas e componentes eletrônicos).

Ele também é liberado inadvertidamente em materiais processados, como metais não-ferrosos e combustíveis fósseis. Na atmosfera, está presente como partículas suspensas, podendo se volatilizar em altas temperaturas, como na indústria de ferro e aço.

O cádmio na água pode ser resultado de contaminação por tubulações galvanizadas e acessórios metálicos. O pH do solo afeta sua disponibilidade, com maior acidez aumentando sua mobilidade. Além disso, acumula-se em plantas aquáticas, invertebrados, peixes e mamíferos, com altas concentrações encontradas em moluscos e crustáceos (CETESB, 2012).

## **2.3 Biossorção**

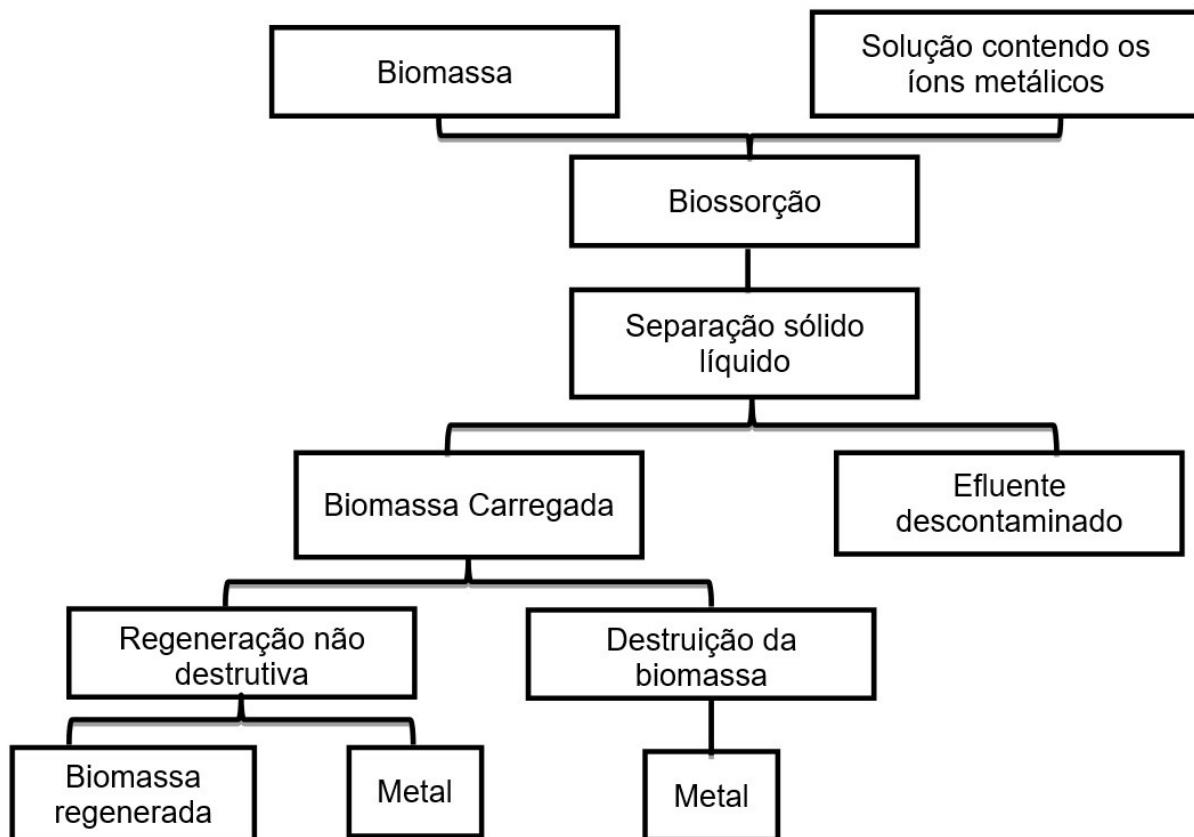
A biossorção compreende a ligação de metais à biomassa por um processo que não envolva energia metabólica ou transporte, embora tais processos possam ocorrer simultaneamente quando biomassa viva for usada, pois a biossorção pode ocorrer com biomassa viva ou morta (MOREIRA, 2007).

As vantagens do processo de biossorção são muitas, uma delas é que apresenta um bom desempenho na remoção de várias espécies metálicas, e o baixo custo do material utilizado como biossorvente, já que este pode ser aplicado como biomassa, matéria orgânica descartada por indústrias do ramo alimentício, farmacêutico entre outras.

O processo de biossorção ocorre em diferentes etapas que são: a adsorção, a separação sólido-líquido e a possível regeneração da biomassa carregada com o metal (BENVINDO DA LUZ *et al.*, 2002). Na biossorção, a captura dos íons metálicos pela biomassa é um processo passivo que se dá por interações físico-químicas entre os íons e os grupos funcionais presentes na superfície da biomassa (VOLESKY, 2004).

Esse método envolve uma fase sólida (sorvente) e uma fase líquida (solvente) que contém as espécies dissolvidas que serão sorvidas (sorvato, por exemplo os íons) devido à grande afinidade do sorvente pelas espécies do sorvato. O sorvato é atraído pelo sólido e capturado por diferentes mecanismos em que o processo continua até atingir o equilíbrio entre os íons capturados e os íons dissolvidos (VOLESKY, 2004), como pode ser visto na Figura 1.

Figura 1 – Diagrama esquemático de um processo de bioassorção.



Fonte: BENVINDO DA LUZ ET. AL. (2002).

## 2.4 Métodos utilizados para a remoção de metais pesados

### 2.4.1 Precipitação Química

A precipitação química é uma técnica bastante utilizada na remoção de metais pesados em soluções aquosas. Neste caso, compostos químicos são lançados para reagirem com os íons metálicos presentes, formando substâncias sólidas que

são insolúveis em água, denominadas precipitados. Esses precipitados podem ser mais facilmente separados da solução por filtração e sedimentação.

Os hidróxidos são os reagentes mais utilizados para a precipitação dos metais, devido à simplicidade do procedimento, ao baixo custo e à facilidade de controle do pH da solução. Contudo, quando se trabalha com misturas de diferentes metais, a eficiência da precipitação pode ser afetada, pois o pH ideal para a precipitação de um metal pode não ser o mesmo do outro. Nesses casos, pode haver redissolução de alguns metais, reduzindo a eficiência da técnica (NASCIMENTO et al., 2019).

Além disso, há uma grande geração de lodos no processo, necessidade de grandes quantidades de produtos químicos e tratamento adicional ao fim do processo (GALINDO, 2012).

#### **2.4.2 Troca Iônica**

A adsorção de troca iônica é um fenômeno eletrostático em que as moléculas proteicas em solução, portadores de carga elétrica, interagem com os grupos funcionais ionizáveis existentes na superfície da resina. Elas situam-se em interação eletrostática com grupos da matriz do adsorvente.

Para manter eletricamente neutra a resina, existem contra-íons, como cloretos de metais ou íons metálicos, que neutralizam a carga da resina. Com isso, durante o processo de adsorção, as proteínas retiram os contra-íons de seus locais de ligação na resina, estes locais são ocupados pelas proteínas, e as ligações eletrostáticas correspondentes são estabelecidas entre a matriz do adsorvente e as proteínas ali adsorvidas. A região da resina onde se encontra a proteína adsorvida torna-se eletricamente neutra, o que dá sentido ao termo "troca iônica" (CRUZ, 1997).

#### **2.4.3 Osmose Reversa**

De acordo com Kadirvelu e Goel (2007), os processos com membranas, especialmente a osmose reversa e a eletrodiálise, destacam-se pela capacidade de remover e recuperar íons metálicos de efluentes, graças à seletividade das membranas empregadas. Essa característica, aliada à alta eficiência dos processos,

tem impulsionado sua utilização. Contudo, a aplicação dessas técnicas é limitada em efluentes com concentrações elevadas de metais.

#### **2.4.3 Tratamento eletroquímico**

O tratamento eletroquímico é uma tecnologia promissora para remoção e recuperação de metais pesados presentes em efluentes industriais. Uma de suas principais vantagens é a possibilidade de recuperação dos metais em sua forma metálica ou como compostos de elevado valor agregado, o que torna o processo economicamente atrativo por transformar resíduo em recurso valioso.

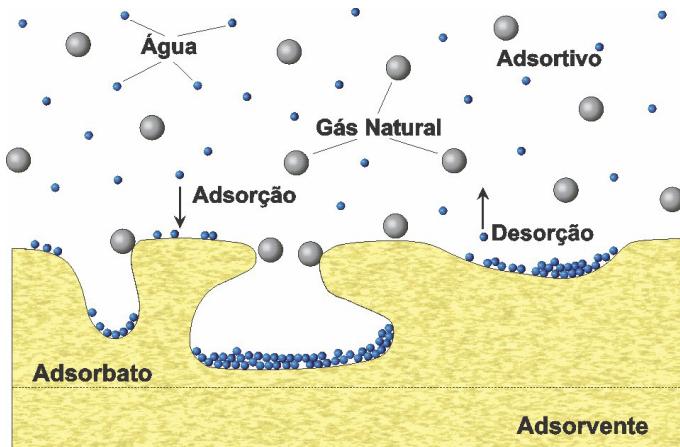
Entretanto, a aplicação do tratamento eletroquímico possui algumas limitações. Uma das principais limitações está em sua eficiência para altas concentrações de metais e a presença de certos compostos na solução, como agentes complexantes, que podem interferir no processo eletroquímico, reduzindo sua eficiência (ZOUBOULIS et al., 2004).

#### **2.4.4 Adsorção**

A adsorção tem sido objeto de interesse dos cientistas desde o início do século, apresentando importância tecnológica, biológica, além de aplicações práticas na indústria e na proteção ambiental, tornando-se uma ferramenta útil em vários setores (VIDAL et al., 2014).

A adsorção pode ser confundida com absorção, mas ambas possuem processos diferentes. A absorção implica no acúmulo da substância absorvida em todo volume do absorvente (ex.: uma esponja que absorve água), ao contrário da absorção, a adsorção ocorre na superfície do adsorvente, ou seja, o adsorvido não penetra no volume do adsorvente. A figura 2 explica esse processo.

Figura 2 - Processo de adsorção de um fluido aquoso



**Fonte:** CARDOSO (2012)

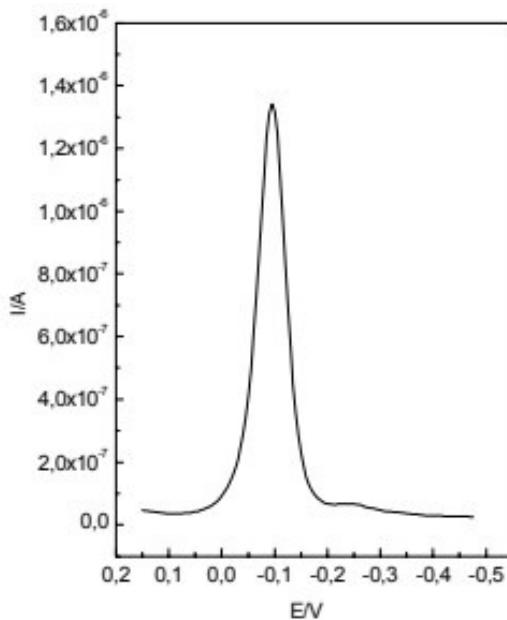
## 2.5 Polarografia

A polarografia, desenvolvida por Jaroslav Heyrovsky em 1922, traçou um marco na história da eletroquímica analítica. O uso do eletrodo de mercúrio trouxe um novo instrumento para a análise de íons metálicos e outras espécies eletroativas. Com o passar das décadas, a técnica polarográfica evoluiu e passou a ser uma técnica de referência em diferentes áreas.

A polarografia é explorada na determinação de parâmetros cinéticos, da constante de estabilidade, além da realização de análises qualitativas e quantitativas de substâncias inorgânicas e orgânicas nos mais variados meios. Por meio delas, também é possível estudar mecanismos de reações eletroquímicas (GIOVEDI, 1994). Além disso, a mesma pode ser usada na determinação de metais em amostras ambientais ou investigação de mecanismo de corrosão.

Esta técnica possui como principal vantagem a alta sensibilidade de detecção, explicada pela aplicação gradual de uma diferença de potencial através de eletrodos imersos em solução sob análise, medindo pequenas correntes da ordem de microampères produzidas pela redução de íons no cátodo de mercúrio gotejante, ou oxidação se o eletrodo estiver operando anodicamente (HEYROVSKY, 1966 *apud* LUGON 2008). Na figura 3 pode-se observar um exemplo de gráfico polarográfico.

Figura 3 - Exemplo de gráfico polarográfico



**Fonte:** ALEIXO; SITTON; RIBEIRO (2001).

## 2.6 Legislação Ambiental

A problemática ambiental é preocupante em nosso país e exige que haja fiscalizações intensivas, de modo particular nas indústrias. Assim, órgãos federais, estaduais e até mesmo municipais foram criados para que essa fiscalização seja cumprida de forma eficácia.

No âmbito federal o Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) exerce um papel decisivo na elaboração de políticas públicas em matéria ambiental no Brasil. Ao CONAMA compete orientar e oferecer diretrizes para a gestão e proteção dos recursos naturais e do meio ambiente. A resolução CONAMA nº 430/2011, por exemplo, determina os limites e as condições para o lançamento de efluentes nos corpos d'água, objetivando assegurar tanto a qualidade ambiental quanto a saúde pública.

O objetivo principal da Resolução CONAMA nº 430/2011 é regularizar e padronizar, a partir da associação com a Resolução nº 357/2005, a disposição de efluentes líquidos em corpo d'água, especificando os padrões de qualidade para os efluentes, visando à minimização dos efeitos decorrentes da disposição inadequada de resíduos líquidos.

No âmbito estadual, de forma particular no estado do Ceará, a Superintendência Estadual do Meio Ambiente (SEMAC) é a responsável pela implementação e fiscalização das normas ambientais, incluindo aquelas relacionadas ao lançamento de efluentes. A Portaria SEMACE nº 154/2002, que complementa a legislação federal, prevê requisitos específicos para o estado, adequando-se às particularidades do local.

### 3. MATERIAL E MÉTODOS

#### 3.1 Biomassas

##### 3.1.1 *Captação das Biomassas*

A Biomassa 1 (B1) foi adquirida no comércio de um estado localizado na região Norte do Brasil. A amostra foi transportada em recipiente térmico, a  $0^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ , para o laboratório de pesquisa de uma universidade localizada em Fortaleza-CE.

A Biomassa 2 (B2) foi coletada manualmente em uma cidade localizada na região metropolitana de Fortaleza-CE, onde há abundância dessa biomassa e que é descartada em processo natural. A amostra foi levada para o mesmo laboratório de pesquisa que recebeu a B1.

##### 3.1.2 *Preparo das Biomassas*

Ambas as biomassas foram submetidas ao processo de despolpamento para a obtenção das fibras, após isso passaram por um processo de lavagem com água destilada a fim de eliminar qualquer resquício de polpa, garantindo que seriam utilizadas apenas as fibras pretendidas nas análises.

Para a secagem, as fibras foram levadas para estufa de circulação de ar, marca Marconi, por  $48\text{h}$  a  $\pm 60^{\circ}\text{C}$ . Esse processo é necessário para que seja eliminada a água proveniente da lavagem.

Com as biomassas lavadas e secas, pode-se iniciar o processo de Trituração no qual foi utilizado um triturador elétrico para facilitar o processo. Posteriormente, as fibras foram peneiradas, utilizando-se peneiras com tamanho de partículas  $20 < \text{mesh} < 80$ , o tamanho da partícula foi pré-definido baseando-se em trabalhos onde se usam biomassas sólidas semelhantes.

#### 3.2 Determinação do Ponto de Carga Zero (pH<sub>PCZ</sub>)

O valor de pH utilizado nos ensaios de biossorção foi determinado por meio do Ponto de Carga Zero (pH<sub>PCZ</sub>/PCZ) dos biossorventes. Para isso, adicionou-se 0,5

g do bioassorvente em 50 mL de solução NaCl 0,1M, sob diferentes condições de pH (2 a 9), ajustados com solução de ácido clorídrico (HCl, Vetec) 0,1M, para os valores na faixa ácida, e hidróxido de sódio (NaOH, Biotec) 0,1M para valores de pH básico.

Após 24h de agitação em incubadora shaker modelo LAC-2000 da marca Lactea, a 30°C e 150 rpm, as amostras foram filtradas e a leitura do pH final foi realizada, os valores obtidos foram expressos em um gráfico de  $\Delta\text{pH}$  x pH inicial, sendo o  $\text{pH}_{\text{PCZ}}$  o valor que intercepta o eixo x, ou seja,  $\Delta\text{pH} = 0$  (CUNHA, 2014).

### **3.3 Preparo da solução aquosa do metal Cd (II)**

Para as amostras sintéticas aquosas do metal Cd (II), inicialmente foi realizada a pesagem do metal e em seguida dissolveu-se o metal de forma a obter soluções com concentrações de 10 mg.L<sup>-1</sup> e 20 mg.L<sup>-1</sup>, respectivamente.

Os testes de adsorção serão conduzidos em triplicata, utilizando reatores de vidro de 125 mL, contendo 50 mL de solução aquosa monoelementar fortificada do metal e em regime batela.

### **3.4 Esterilização de recipientes para os ensaios polarográficos**

A contaminação de recipientes por partículas, compostos orgânicos e metais é um desafio no processo analítico das análises de traços e ultra-traços de metais, visto que esses contaminantes podem distorcer e invalidar o processo. A confiabilidade dos resultados depende da rigorosa aplicação de boas práticas de laboratório, assim pode-se garantir a qualidade e a validade dos dados obtidos.

Nesse sentido, os recipientes foram submetidos ao contato com solução de HNO<sub>3</sub> a 10% por 24h, para vidros e 20% por 48h para plásticos. Uma vez que esses recipientes adsorvem íons em sua estrutura devido ao efeito da troca iônica e outras partículas, o ácido nítrico é um reagente utilizado para esse fim devido à sua alta capacidade oxidante, permitindo assim a remoção de contaminantes orgânicos e inorgânicos.

Após isso, os materiais foram lavados várias vezes com água deionizada de alta pureza, obtida através do sistema de purificação Millipore Milli-Q que fornece Água Milli-Q, para remoção da solução ácida.

### 3.5 Cinética de adsorção

Para os ensaios de adsorção adicionou-se 6,0 g.L<sup>-1</sup> de Biomassa (B1 e B2) em 50 mL de Cd (II) com concentrações de 10,0 mg.L<sup>-1</sup> e 20,0 mg.L<sup>-1</sup> para ambas as biomassas testadas. Os ensaios foram conduzidos em agitador de bancada (tipo shaker) com velocidade de 150 rpm, a 30°C, por 90 min.

Alíquotas de 1 mL foram retiradas em intervalos de tempo de 30, 60 e 90 min, adicionadas a tubos cônicos, tipo Falcon, e centrifugadas a 3.000 rpm para separar a matéria orgânica do soluto a ser analisada. O pH de cada alíquota foi medido para verificar possíveis variações durante o ensaio.

### 3.6 Determinação das concentrações dos metais por Polarografia

As medidas para determinação de metal presente na amostra foram realizadas em um Potenciómetro/Galvanostato Autolab PGSTAT100N controlado através de computador com software NOVA 2.0 acoplado ao módulo polarográfico Metrohm 663 VA Stand ® da Metrohm que viabiliza ensaios voltamétricos e polarográficos, o equipamento pode ser visualizado na figura 4.

Figura 4 - Potenciómetro/Galvanostato Autolab PGSTAT100N acoplado ao módulo polarográfico Metrohm 663 VA Stand ® da Metrohm



**Fonte:** Metrohm (2024)

O sistema é fornecido com eletrodo gotejante de mercúrio, que pode ser operado em vários modos: Eletrodo Gotejante de Mercúrio (Dropping Mercury Electrode - DME), Eletrodo de Mercúrio com Gota Pendente (Hanging Mercury Drop

Electrode - HMDE) e Eletrodo de Mercúrio com Gota Estática (Static Mercury Drop Electrode - SMDE).

Para a presente análise, será utilizado o método gota pendente, com varredura no sentido anódico. Como eletrodo de referência, será utilizado o eletrodo de KCl 3 M. O contra eletrodo será de carbono vítreo. Além disso, uma amostra padrão de Cd com concentração de 1.000 mg.L<sup>-1</sup> será utilizada em cada repetição da análise.

Na tabela 3, são descritos os parâmetros utilizados para as análises. Estes são inseridos em rotinas criadas dentro do software e levam em consideração o metal analisado, que neste caso é o cádmio.

Tabela 3 - Parâmetros utilizados nas análises para determinação do metal Cádmio.

Descrição	Referência	Medida
Eletrodo de trabalho	HMDE	-
Tamanho da gota	4	-
Agitação	2.000	rpm
Tempo de purga	300	s
Potencial de depósito	-0,8	V
Tempo de depósito	90	s
Potencial inicial	-0,8	V
Potencial final	-0,4	V
Amplitude de pulso	-0,05	V
Tempo de pulso	0,04	s
Potencial de pulso	0,006	V
Tempo de potencial de pulso	0,4	s
Tempo de potencial de pulso	0,06	V/s

**Fonte:** Autor

Na célula polarográfica foram adicionados 20 mL de água Milli-Q, 1 mL de eletrólito (KCl), 0,1 mL da amostra e, nas segunda e terceira repetições, 0,1 mL da amostra padrão.

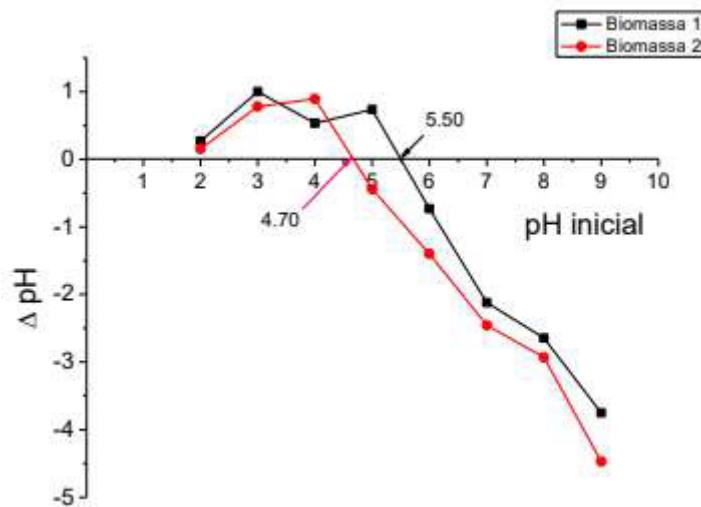
## 4. RESULTADOS E DISCUSÕES

### 4.1 Potencial de Carga Zero

A determinação do pHPCZ é importante para avaliar em qual faixa de pH as cargas superficiais do adsorvente encontram-se em equilíbrio, ou seja, a carga superficial é nula. Considera-se como uma informação importante na caracterização do adsorvente, uma vez que influencia na capacidade de adsorção (MIMURA; VIEIRA; MARTELLI; GORGULHO, 2010).

No gráfico 1 é possível vermos os valores encontrados no teste, onde mostra que para a Biomassa 1 e Biomassa 2 os valores de PCZ foram de 4,7 e 5,5, respectivamente.

Gráfico 2 - Potencial de carga zero (pHpcz) para as biomassas B1 e B2



Fonte: Autor

Em condições de pH abaixo do pH PCZ, há o favorecimento de adsorção de ânions e em valores acima do pH PCZ, o favorecimento de cátions. Ainda nesse sentido, e considerando que os íons metálicos estão na forma de cátions no meio aquoso, caso o valor de pH do meio encontra-se abaixo do PCZ, significando que a superfície do adsorvente está fortemente carregada com íons positivos, acontecerá uma repulsão eletrostática com os cátions do metal, o que dificulta o processo de adsorção. Ressalta-se ainda que em pH alcalino pode haver a precipitação dos hidróxidos metálicos de alguns metais, e isso pode ocorrer tanto no meio aquoso

(amostra) quanto na superfície do adsorvente, o que pode causar equívoco com o processo de adsorção (MIMURA; VIEIRA; MARTELLI; GORGULHO, 2010).

Para este estudo optou-se por utilizar valores próximos ao pH PCZ, isso por causa da ausência de uma caracterização completa dos bioassorventes e da otimização dos ensaios.

#### 4.2 Variação do pH durante o processo de adsorção

Foi realizada a medição de pH das amostras antes e após o ensaio de adsorção, para cada amostra. Os resultados são apresentados na tabela 4. O intuito é avaliar se houve variações significativas de pH durante o processo e assim poder auxiliar nos resultados de adsorção. Nesse sentido, pode-se observar que não houve alterações significativas no pH. O aumento do pH observado para a biomassa B2 pode estar relacionado à liberação de íons hidroxila (OH-) durante o processo de adsorção, o que favorece a remoção do cádmio por mecanismos de precipitação ou complexação.

Tabela 4 – Variação de pH no processo de adsorção

Concentração	B1		B2	
	pH Inicial t = 0 min	pH Final t = 90 min	pH Inicial t = 0 min	pH Final t = 90 min
10 mg.L <sup>-1</sup>	6,18 ± 0,1	6,35 ± 0,1	6,18 ± 0,1	6,35 ± 0,1
20 mg.L <sup>-1</sup>	5,34 ± 0,1	6,35 ± 0,1	5,34 ± 0,1	6,0 ± 0,1

**Fonte:** Autor

#### 4.3 Cinética de adsorção de cádmio

Após as análises dos gráficos polarográficos pode-se obter os valores de concentrações finais presentes nas amostras. Assim, por meio da equação 1, pode-se calcular a porcentagem de remoção de metal pelas biomassas.

$$\%R = 100 - \left( \frac{C_f}{C_i} \cdot 100 \right) (1)$$

no qual: %R é a porcentagem de remoção do íon pelo adsorvente,  $C_f$  é a concentração de íon final ( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ) e  $C_i$  é a concentração inicial do íon na solução ( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ). Os resultados estão descritos na tabela 4.

Tabela 5 - Resultados da do processo de adsorção

Concentração ( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )	Tempo (min)	B1		B2	
		Conc. Final $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	% de Remoção	Conc. Final $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	% de Remoção
10	30	6,86	31,4	0	100
10	60	6,33	36,7	-	100
10	90	3,69	63,1	-	100
20	30	10,55	47,25	0	100
20	60	10,55	47,25	-	100
20	90	10,55	47,25	-	100

Fonte: Autor

As duas biomassas, subprodutos de fácil obtenção, apresentaram resultados promissores, revelando grande potencial como adsorventes para remoção de cádmio (II) de soluções aquosas. De modo especial, a biomassa B2 destacou pois removeu 100% do cádmio em todas as condições avaliadas.

A biomassa B1 mostrou eficiência na remoção do cádmio, apresentando em 90 minutos 63% de remoção para a concentração de 10 mg/L. Embora a eficiência tenha sido ligeiramente menor para a concentração de 20 mg/L, os resultados ainda são considerados satisfatórios, pois a menor quantidade de remoção nesta concentração pode ser relacionada à quantidade de biomassa utilizada, pois, possivelmente, não foi suficiente para adsorver o total de metal encontrado.

Nos tempos especificados, já é possível observar a presença de equilíbrio nas concentrações escolhidas, exceto na B1, com concentração inicial em  $10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ , o que dificulta o processo de construção da curva cinética, que determina o tempo de equilíbrio, e consequentemente as isotermas de adsorção. Isso significa que os tempos escolhidos não estão captando as variações que, neste caso, seriam necessárias para uma compreensão mais clara do comportamento da adsorção.

Para a resolução desse problema, é necessário repetir o experimento aumentando o tempo de coleta entre os intervalos que foram escolhidos neste estudo.

Desse modo, mais resultados podem ser obtidos e aplicados de forma eficaz na comparação dos modelos de isotermas de adsorção.

## 5. CONCLUSÃO

As biomassas utilizadas, adsorventes biodegradáveis e de baixo custo, tiveram grande eficiência na remoção de metais em todos os testes realizados. Embora a porcentagem de remoção pela biomassa 1 tenha sido de apenas 47,25% para uma concentração de 20 mg/L, esse é um resultado significativo, uma vez que quase metade da concentração total de cádmio na solução foi removida.

Além disso, a biomassa 2 eliminou completamente o metal em todas as concentrações e tempos estudados, uma vantagem significativa no que diz respeito a eficiência e confiabilidade de sua aplicação.

Nesse sentido, ela se estabelece como uma solução mais eficaz e versátil para o tratamento de águas contaminadas por metais. Essa alta eficiência indica que a Biomassa 2 pode ser usada em diversas condições sem comprometer seu desempenho, tornando-se uma opção mais viável e de maior impacto ambiental.

Com isso, pode-se concluir, que o uso das biomassas contribui para a diminuição da poluição proveniente do descarte irregular no meio ambiente, direcionando-as para locais apropriados e transformando-as em solução de remoção de metais pesados.

## TRABALHOS FUTUROS

- Caracterização química das biomassas, estrutura e morfologia;
- Efeito da massa dos adsorventes e do pH da solução;
- Diminuição dos intervalos de coletas para melhor compreensão do processo de adsorção;
- Construção das isotermas de adsorção.

## REFERÊNCIAS

- ALEIXO, Luiz Manoel; SITTON, Melissa; RIBEIRO, Fabiana Alves de Lima. ESTUDO POLAROGRÁFICO SOBRE A DETERMINAÇÃO DE Fe(III) UTILIZANDO-SE A TÉCNICA DA POLAROGRAFIA DE PULSO DIFERENCIAL. **Química Nova**, Campinas - Sp, v. 24, n. 6, p. 790-794, mar. 2001.
- BENVINDO DA LUZ, A. et. al. **Tratamento de minérios**. 3. ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2002.
- BRADY, James E.; HUMISTON, Gerard E.. **Química Geral**. 2. ed. [S.I.]: Livros Técnicos e Científicos, 1986. Vol 1.
- CALFA, Bruno Abreu; TOREM, Maurício Leonardo. **Uso de Biomassas em Processo Combinado Biossorção/Flotação para Remoção de Metais Pesados**. Rio de Janeiro: Puc - Pontifícia Universidade Católica, 2007. 69 p.
- CAÑIZARES, Rosa Olivia. Biosorción de metales pesados mediante el uso de biomasa microbiana. *Revista Latinoamericana de Microbiología*, México, v. 42, p.131-143, 2000.
- CARDOSO, Fernanda Ferreira. **PROPRIEDADES DE ADSORÇÃO DE ÁGUA EM FARINHAS MISTAS DE ARROZ E BAGAÇO DE CEVADA PRÉ-GELATINIZADAS POR EXTRUSÃO TERMOPLÁSTICA**. 2012. 53 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Goiás, Anápolis - Go, 2012.
- CETESB - Divisão de Toxicologia Humana e Saúde Ambiental. **Cádmio e seus compostos**: ficha de informação toxicológica. São Paulo, 2012. Atualizado em fevereiro de 2022.
- COELHO, Gustavo Ferreira. **Utilização da Casca da Castanha de Caju (*Anacardium occidentale* L.) como biossorvente de metais**. 2014. 133 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Agronomia, Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Marecham Cândido Rondon, 2014.
- CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE. **CONAMA 357/2005**: Resolução CONAMA nº 357, de 17 de março de 2005. Diário Oficial da União, 2005. Disponível em: <https://www.siam.mg.gov.br/sla/download.pdf?idNorma=2747>. Acesso em: 29 ago. 2024.
- CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE. CONAMA 430/2011: RESOLUÇÃO No 430, DE 13 DE MAIO DE 2011. Diário Oficial da União, 2011. Disponível em: [https://conama.mma.gov.br/?option=com\\_sisconama&task=arquivo.download&id=627](https://conama.mma.gov.br/?option=com_sisconama&task=arquivo.download&id=627). Acesso em: 29 ago. 2024.
- CRUZ, Joel Mesquita. **ADSORÇÃO DE INSULINA EM RESINA TROCADORA DE ÍON UTILIZANDO LEITOS FIXOS E FLUIDIZADOS**. 1997. 113 f. Dissertação (Doutorado) - Curso de Engenharia Química, Unicamp, Campinas - Sp, 1997.

CUNHA, Bruna dos Santos. Utilização De Biossorventes Alternativos Na Remoção De Corantes Têxteis. 2014. 62 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Ambiental, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Medianeira, 2014.

GALINDO, Luz Stella Gaona. REMOÇÃO DE IONS DE CHUMBO E CÁDMIO EM DIFERENTES SISTEMAS DE ADSORÇÃO/TROCA IÔNICA EM ARGILA BENTONÍTICA TIPO FLUIDGEL. 2012. 126 f. Dissertação (Doutorado) - Curso de Engenharia Química, Universidade Estadual de Campinas, Campinas - Sp, 2012.

GARRIDO, Adrielly. Adsorção de corante vermelho reativo BF-4B em efluentes utilizando semente de manga (*Mangifera Indica L.*). **Agropecuária Científica no Semiárido**, Patos, v. 17, n. 1, p. 7-12, mar. 2021.

GIOVEDI, Claudia. Estudo da redução do Cobalto (II) em meio aquoso de azoteto de sódio por polarografia de pulso. 1994. 94 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Ciências, Instituto de Química da Universidade de São Paulo, São Paulo, 1994.

ICDA - INTERNATIONAL CADMIUM ASSOCIATION. **Applications**. 2021. Disponível em: [www.cadmium.org](http://www.cadmium.org). Acesso em: 24 jul. 2024.

HEYROVSKY, J. *Principles of Polarography*, Academic Press, New York, 1996.

KADIRVELU, K.; GOEL, J. Eco-friendly technologies for removal of hazardous heavy metal from water and industrial wastewater. In: LEWINSKY, A.A. (Ed). *Hazardous Materials and Wastewater: Treatment, Removal and Analysis*. Nova York: Nova Science Publishers, 2007, p. 126-148.

LUGON, MMV. **Determinação de Sn (II) por polarografia: aplicação no controle de qualidade de reagentes liofilizados para radiodiagnóstico**. 2008. Tese de Doutorado. Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares-IPEN, São Paulo.

METROHM. Portfólio de produtos Metrohm: tituladores, tituladores karl fischer, cromatógrafos de íons, medidores de ph e íons, espectrômetros raman e nir, equipamentos de eletroquímica e analisadores de processos.. tituladores, tituladores Karl Fischer, cromatógrafos de íons, medidores de pH e íons, espectrômetros Raman e NIR, equipamentos de eletroquímica e analisadores de processos.. Disponível em: [https://www.metrohm.com/pt\\_br/produtos.html](https://www.metrohm.com/pt_br/produtos.html). Acesso em: 27 set. 2024.

MILIARUM. Contaminación por metales pesados. Disponível em: <<http://www.miliarum.com/Proyectos/Suelos/Manuales/Contmetalespesados.asp>>. Acesso em: 05 dez. 2004.

MIMURA, Aparecida Maria Simões; VIEIRA, Taciana Valéria de Almeida; MARTELLI, Patrícia Benedini; GORGULHO, Honória de Fátima. Aplicação da casca de arroz na adsorção dos íons Cu<sup>2+</sup>, Al<sup>3+</sup>, Ni<sup>2+</sup> e Zn<sup>2+</sup>. **Química Nova**, [S.L.], v. 33, n. 6, p. 1279-1284, 2010. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s0100-40422010000600012>.

NASCIMENTO, Valdivânia A. do *et al.* Estudo sobre a remoção de metais pesados em efluentes. **Semana Acadêmica Revista Científica**, Fortaleza, v. 167, p. 1-17, 24 maio 2019.

PINO, Gabriela Alejandra Huamán. **Biossorção de Metais Pesados Utilizando Pó da Casca de Coco Verde (Cocos nucifera)**. 2005. 113 f. Monografia (Especialização) - Curso de Engenharia Metalúrgica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro - Puc Rio, Rio de Janeiro, 2005.

SUPERINTENDÊNCIA ESTADUAL DO MEIO AMBIENTE. SEMACE 154/2002: Portaria SEMACE nº 154 DE 22/07/2002. Diário Oficial do Estado, 2002. Disponível em: [https://www.normasbrasil.com.br/norma/portaria-154-2002-ce\\_277693.html](https://www.normasbrasil.com.br/norma/portaria-154-2002-ce_277693.html). Acesso em: 29 ago. 2024.

TIMOFIECSYK, F.R.; PAWLOWSKY, U. Minimização de resíduos na indústria de alimentos: revisão. **Boletim do Centro de Pesquisa de Processamento de Alimentos**, Paraná, v. 18, n. 2, p.221-236, jul./dez. 2000.

VIDAL, Carla Bastos *et al.* **ADSORÇÃO**: aspectos teóricos e aplicações ambientais. Fortaleza: Ufc, 2014. 256 p. Disponível em: <<http://livros.ufc.br/ojs/index.php/02/article/view/19/17>>. Acesso em: 30 maio 2016.

VULLO, Diana L.. MICROORGANISMOS Y METALES PESADOS: una interacción en beneficio del medio ambiente. **Químicaviva**, Buenos Aires, v. 2, n. 3, p. 93-104, dez. 2003.

ZOUBOULIS, Ai *et al.* Biosorption of toxic metals from aqueous solutions by bacteria strains isolated from metal-polluted soils. **Process Biochemistry**, [S.I], v. 39, n. 8, p. 909-916, 30 nov. 2004.