

INSTITUTO FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO  
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AMBIENTAL

**PHELIPE AUGUSTO CARVALHO CAMPOS**

**ESTUDO DA ADSORÇÃO DE COBRE(II) UTILIZANDO BORRA DE CAFÉ  
LAVADO (BCL)**

Ibatiba  
2022

**PHELIPE AUGUSTO CARVALHO CAMPOS**

**ESTUDO DA ADSORÇÃO DE COBRE(II) UTILIZANDO BORRA DE CAFÉ  
LAVADO (BCL)**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia Ambiental do Instituto Federal do Espírito Santo - Campus Ibatiba, como requisito parcial para a obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Ambiental.

Orientador: Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Anna Isabel Guido Costa

Ibatiba

2022

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)  
(Biblioteca Ifes - Campus Ibatiba)

---

C198e Campos, Phelipe Augusto Carvalho, 1998-  
Estudo da adsorção de cobre (II) utilizando borra de café  
lavado (BCL). - 2022.  
45 f. : il.

Orientadora: Anna Isabel Guido Costa.  
Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) - Instituto  
Federal do Espírito Santo, 2022.

1. Engenharia ambiental - Monografias. 2. Água - Poluição. 3.  
Metais pesados. 4. Cobre - Adsorção. 5. Borra de café. I. Costa,  
Anna Isabel Guido. II. Instituto Federal do Espírito Santo. Campus  
Ibatiba. III. Título.

CDD 628

**PHELIPE AUGUSTO CARVALHO CAMPOS**

**ESTUDO DA ADSORÇÃO DE COBRE(II) UTILIZANDO BORRA DE CAFÉ  
LAVADO (BCL)**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia Ambiental do Instituto Federal do Espírito Santo - Campus Ibatiba, como requisito parcial para a obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Ambiental.

Aprovado em: 21 de janeiro de 2022

**COMISSÃO EXAMINADORA**

Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Anna Isabel Guido Costa  
Instituto Federal do Espírito Santo - Campus Ibatiba  
Orientador

Prof. Dr. Benvindo Sirtoli Gardiman Junior  
Instituto Federal do Espírito Santo - Campus Ibatiba  
Membro Interno

Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Luciene Paula Roberto Profeti  
Universidade Federal do Espírito Santo - Campus Alegre  
Membro Externo

Para Adilson Barbosa Campos e Luciene Carvalho, que conduziram e incentivaram a minha educação formal.

Para Paloma Vitória Carvalho Campos, que tenha a opção, a escolha, da própria formação.

Para todos os alunos e professores que passaram, que continuarão e que virão a integrar o curso de Bacharelado em Engenharia Ambiental no *campus* Ibatiba, desejo a todos, uma brilhante caminhada e deixo o legado dessa primeira defesa de Trabalho de Conclusão de Curso.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço a todos os servidores e professores do Instituto Federal de Ciência e Tecnologia do Espírito Santo, *Campus Ibatiba*, por todo apoio e por proporcionarem um ambiente adequado para o desenvolvimento do meu Trabalho de Conclusão de Curso.

Aos professores Dr. Abiney Lemos Cardoso e Me. Remilson Figueiredo, por todos os conselhos e recomendações de ajustes durante a fase de experimentação do meu Trabalho de Conclusão de Curso.

Quero agradecer a professora orientadora Dr<sup>a</sup>. Anna Isabel Guido Costa por acolher a proposição do projeto e contribuir em todos os estágios da pesquisa, desde o surgimento da ideia até a execução e finalização da mesma.

Gostaria de deixar o meu profundo agradecimento aos professores Dr. Benvindo Sirtoli Gardiman Junior, Dr. Dihego de Oliveira Azevedo, Me. Flavio Costa de Cerqueira e Me. Nelson Rubens Nascimento Del'Antonio que tanto me incentivaram durante os anos de graduação e acompanham a conclusão da minha formação.

Por fim, expresso a minha profunda gratidão a Laysa Melyssa Miranda Rodrigues por dedicar parte de seu tempo e estar presente durante esse 1 ano de pesquisa junto a mim.

Um cientista em seu laboratório não é um mero técnico: ele também é uma criança que confronta fenômenos naturais que o impressionam como se eles fossem contos de fadas.

*Marie Curie*

## RESUMO

Nos últimos anos, a ação antrópica vem provocando grandes modificações no meio ambiente, através de impactos positivos ou negativos. O aumento do consumo e exploração de matérias-primas, como fósseis e minerais, aliados ao crescimento da população, tem causado um agravamento nos problemas acerca da ambiência, sobretudo, os resíduos contendo metais tóxicos, como os metais pesados. Os resíduos de metais pesados têm como principais fontes de geração: os efluentes industriais obtidos ao fim do ciclo de produção ou enriquecimento de algum material, as atividades que envolvam a mineração e a introdução de agrotóxicos nas lavouras. Com o aumento da produção de café, a expansão do plantio de lavouras e o crescente consumo da bebida no Brasil e no mundo, quantidades apreciáveis de resíduos agroindustriais são geradas todos os dias, dentre eles, a borra de café. Portanto, este trabalho pretende estudar a viabilidade de utilização da borra de café lavada (BCL) como bioissorvente para a adsorção de Cobre(II) em solução aquosa. Esta pesquisa poderá trazer resultados inovadores, pois são escassos na literatura estudos que empregam a BCL na remoção de metais pesados. A matéria-prima utilizada neste trabalho como material adsorvente foi a borra de café que passou por processos de lavagem para a remoção de compostos solúveis. Para a caracterização do material adsorvente foi realizada a aferição do pH, ponto de carga zero (PCZ), teor de matéria orgânica a 350°C, teor de matéria orgânica a 450°C e teor de cinzas. Realizou-se o estudo cinético e a determinação do tempo de equilíbrio, ajustou-se os resultados obtidos com os modelos cinéticos de pseudo-primeira ordem e pseudo-segunda ordem, por fim, executou-se o experimento de pH ótimo de sorção. Os resultados demonstraram que a BCL é um adsorvente que possui potencial para exploração nos processos de adsorção de Cobre(II), sendo esta, uma opção disponível pela grande quantidade de material disponível e descartado sem aproveitamento.

**Palavras-chave:** Metais. Efluentes. Café. Adsorção. Cobre.



## ABSTRACT

In recent years, human action has caused major changes in the environment, through positive or negative impacts. The increase in consumption and exploitation of raw materials, such as fossils and minerals, combined with population growth, has caused an aggravation of problems about the environment, especially waste containing toxic metals, such as heavy metals. Heavy metal residues have as main sources of generation: industrial effluents obtained at the end of the production cycle or enrichment of some material, activities involving mining and the introduction of pesticides in crops. With the increase in coffee production, the expansion of plantations and the growing consumption of the drink in Brazil and in the world, appreciable amounts of agro-industrial residues are generated every day, including coffee grounds. Therefore, this work intends to study the feasibility of using washed coffee grounds (BCL) as a biosorbent for the adsorption of Copper(II) in aqueous solution. This research may bring innovative results, as there are few studies in the literature that employ BCL in the removal of heavy metals. The raw material used in this work as adsorbent material was coffee grounds that underwent washing processes to remove soluble compounds. For the characterization of the adsorbent material, the pH, zero charge point (PCZ), organic matter content at 350°C, organic matter content at 450°C and ash content were carried out. The kinetic study and the determination of the equilibrium time were carried out, the results obtained with the pseudo-first order and pseudo-second order kinetic models were adjusted, finally, the experiment of optimal sorption pH was performed. The results showed that BCL is an adsorbent that has the potential to be explored in Copper(II) adsorption processes, which is an option available due to the large amount of material available and discarded without use.

**Keywords:** Metals. Effluents. Coffee. Adsorption. Copper.

## LISTA DE FLUXOGRAMA

Fluxograma 1 – Mobilidade do cobre no corpo humano .....	19
--	----

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Comportamento da absorvância em função da concentração de íons cobre(II) no intervalo de 5 a 150 mg.L <sup>-1</sup> .....	30
Figura 2 – Gráfico do pH final em função do pH inicial para a determinação do PCZ .....	32
Figura 3 – Quantidade de Cu <sup>2+</sup> removida em função do tempo de contato com a BCL utilizando 2g de adsorvente em 100 mL de solução contendo cobre na concentração inicial de 50 mg.L <sup>-1</sup> .....	33
Figura 4 – Modelo cinético de pseudo-primeira ordem .....	35
Figura 5 – Modelo cinético de pseudo-segunda ordem.....	36

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Parâmetros avaliados na caracterização da BCL .....	31
Tabela 2 – Parâmetros das regressões lineares obtidas nos modelos cinéticos.....	36
Tabela 3 – Parâmetros dos modelos cinéticos da adsorção do $\text{Cu}^{2+}$ na BCL .....	37
Tabela 4 – Efeito do pH na remoção do Cobre(II) via sorção com BCL .....	38

## LISTA DE SIGLAS

ABIC	Associação Brasileira da Indústria de Café
As	Arsênio
BCL	Borra de Café Lavado
Bi	Bismuto
Cd	Cádmio
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
Cu	Cobre
Cu <sup>2+</sup>	Cobre (II)
CuFeS <sub>2</sub>	Calcopirita
Cu <sub>2</sub> S	Calcocita
Cu(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> .3H <sub>2</sub> O	Nitrato de Cobre II Trihidratado
C <sub>10</sub> H <sub>14</sub> N <sub>2</sub> Na <sub>2</sub> O <sub>8</sub> .2H <sub>2</sub> O	EDTA Sal Dissódico Dihidratado
HCl	Ácido Clorídrico
Hg	Mercúrio
K <sub>1</sub>	Constante de velocidade da equação de Lagergren
K <sub>2</sub>	Constante de velocidade da equação de Ho e McKay
NaCl	Cloreto de Sódio
NaOH	Hidróxido de Sódio
Ni	Níquel
Pb	Chumbo
PCZ	Ponto de Carga Zero ou Ponto Isoelétrico

pH	Potencial Hidrogeniônico
$q_{cal}$	Capacidade máxima de adsorção calculada
$q_e$	Quantidade de íons $Cu^{2+}$ adsorvido no equilíbrio
$q_{exp}$	Capacidade máxima de adsorção encontrado via ensaio
$q_t$	Quantidade de íons $Cu^{2+}$ adsorvido no tempo t
$R^2$	Coefficiente de ajuste
SAQ-QTS	Quitossana modificada com Sal de Amônio Quaternário
Sb	Antimônio
Sn	Estanho
t	Tempo de contato
Zn	Zinco

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	14
<b>2</b>	<b>OBJETIVOS</b>	16
2.1	OBJETIVO GERAL	16
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	16
<b>3</b>	<b>REFERENCIAL TEÓRICO</b>	17
3.1	POLUIÇÃO DAS ÁGUAS	17
3.2	METAIS TÓXICOS	18
3.3	COBRE (Cu)	19
3.4	TRATAMENTO DE EFLUENTES CONTENDO METAIS TÓXICOS	20
3.5	BORRA DE CAFÉ	21
<b>4</b>	<b>METODOLOGIA</b>	23
4.1	PREPARO E PADRONIZAÇÃO DE SOLUÇÕES	23
4.1.1	Preparo de solução para determinação do Ponto de Carga Zero (PCZ)	23
4.1.2	Preparo de soluções para elaboração da curva de calibração de íons Cu <sup>2+</sup>	23
4.1.3	Preparo de solução para os experimentos de adsorção de íons Cu <sup>2+</sup>	23
4.1.4	Preparo de solução de EDTA	24
4.2	PREPARO DO MATERIAL ADSORVENTE	24
4.3	CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL ADSORVENTE	25
4.3.1	Determinação do pH do material adsorvente	25
4.3.2	Determinação do Ponto de Carga Zero (PCZ)	25
4.3.3	Determinação do teor de Matéria Orgânica	26
4.3.4	Determinação do teor de Cinzas	26

4.4	ESTUDO CINÉTICO E DETERMINAÇÃO DO TEMPO DE EQUILÍBRIO .....	27
4.4.1	<b>Modelos cinéticos linearizados</b> .....	27
4.5	pH ÓTIMO DE SORÇÃO .....	28
4.6	QUANTIFICAÇÃO POR ESPECTROFOTOMETRIA DE ABSORÇÃO .....	29
5	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	30
5.1	OBTENÇÃO DA CURVA DE CALIBRAÇÃO DO COBRE .....	30
5.2	CARACTERÍSTICAS DO MATERIAL ADSORVENTE .....	31
5.3	CINÉTICA DE ADSORÇÃO .....	33
5.4.1	<b>Modelos Cinéticos</b> .....	34
5.4	pH ÓTIMO DE SORÇÃO .....	37
6	<b>CONCLUSÃO</b> .....	39
	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	40



## 1 INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, a ação antrópica vem provocando grandes modificações no meio ambiente, através de impactos positivos ou negativos. O aumento do consumo e exploração de matérias-primas, como fósseis e minerais, aliados ao crescimento da população, têm causado um agravamento nos problemas acerca das condições ambientais, sobretudo, os resíduos contendo metais tóxicos (MOREIRA, 2001).

Os resíduos de metais tóxicos têm como principais fontes de geração: os efluentes industriais obtidos ao fim do ciclo de produção ou enriquecimento de algum material, as atividades que envolvam a mineração e a introdução de agrotóxicos nas lavouras (AGUIAR-PALERMO et al., 2002).

Estes elementos se tornaram um dos principais alvos de investigação na atualidade, pois, quando lançados sem algum tratamento prévio podem causar desequilíbrios por serem altamente móveis no meio ambiente e bioacumulativos na cadeia alimentar (KUMAR et al., 2006).

Devido ao desencadeamento de reações químicas não metabolizáveis, a aparição destes íons metálicos em quantidades excessivas nos corpos hídricos, representam uma ameaça potencial à fauna, à flora e à saúde pública, uma vez que são conhecidos por sua natureza carcinogênica e tóxica (GUPTA et al., 2004).

Entre os métodos aplicados no tratamento de águas residuárias para a remoção de metais tóxicos, os métodos convencionais de tratamento físico-químico (coagulação, floculação, sedimentação e filtração) são empregados com maior frequência, no entanto, apresentam custo elevado, dificultando a sua implantação (RAO et al., 2002).

Entretanto, a adsorção tem se mostrado um método eficiente e versátil, apesar de ser um fenômeno que ocorre de forma natural, a técnica tem sido aperfeiçoada por indústrias que buscam atender os padrões de lançamentos de efluentes industriais (SOUSA et al., 2007).

Além disso, destaca-se o uso do carvão ativado como principal adsorvente empregado na remoção de íons metálicos, contudo, a obtenção deste material

possui um alto custo envolvido (GUPTA et al., 2003). Com isto, faz-se necessário à procura de novos materiais bioadsorventes, sejam eles: de baixo custo, de fácil manuseio, reaproveitados de outros processos ou resíduos com potencial para pesquisas de base, visando a diminuição dos impactos ambientais (HORSFALL et al., 2006).

Com o aumento da produção de café, a expansão do plantio de lavouras e o crescente consumo da bebida no Brasil e no mundo, quantidades apreciáveis de resíduos agroindustriais são geradas todos os dias, dentre eles, a borra de café.

Em virtude do avanço das discussões acerca dos problemas ambientais, a destinação inadequada deste resíduo tem sido amplamente discutida pela academia, bem como o desenvolvimento de pesquisas que visam encontrar meios para o seu aproveitamento, resgatando e agregando valor a este material (VEGRO; CARVALHO, 2006). Alguns exemplos disso consistem no aproveitamento da borra de café na produção de adubo organomineral, ração animal e utilização como combustível (DURÁN et al., 2017).

Entre as características desejáveis no processo de adsorção, ressalta-se a alta homogeneidade na composição da borra de café, bem como o baixo teor de cinzas e o elevado teor de carbono, fatores essenciais no processo de remoção de íons metálicos de efluentes industriais (CASTRO, 2009).

Portanto, este trabalho estudou a viabilidade de utilização da borra de café lavada (BCL) como biossorvente para a adsorção de íons Cobre(II) em solução aquosa. Esta pesquisa trouxe resultados inovadores, pois são escassos na literatura estudos que empregam a BCL na remoção de metais tóxicos.

## 2 OBJETIVOS

### 2.1 OBJETIVO GERAL

Avaliar o desempenho da borra de café lavado (BCL) na adsorção de íons cobre(II) em solução aquosa a fim de propô-la como adsorvente no tratamento de águas residuárias industriais ou qualquer efluente que possa conter o metal.

### 2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Preparar o material adsorvente removendo os compostos solúveis;
- Caracterizar a Borra de Café Lavado (BCL) analisando os seguintes parâmetros: ponto de carga zero (PCZ), potencial hidrogeniônico (pH), teor de matéria orgânica e teor de cinzas;
- Fazer o estudo cinético do processo de adsorção dos íons  $\text{Cu}^{2+}$ ; e
- Avaliar a influência do pH na sorção do cobre (II).

### 3 REFERENCIAL TEÓRICO

#### 3.1 POLUIÇÃO DAS ÁGUAS

Essencial para a manutenção da vida na biosfera e parte integrante de forma direta ou indireta dos processos metabólicos, a água é um dos compostos de maior importância, cobrindo aproximadamente 70% da crosta terrestre (DE SOUZA et al., 2014).

Apesar da abundância, cerca de 97% da água disponível no planeta está nos oceanos e apenas 3% correspondem a água doce, destes, 2% estão nas geleiras e, por conseguinte, menos de 1%, encontra-se disponível para consumo (SILVA; PEREIRA, 2019).

A qualidade da água tem se deteriorado cada vez mais rápido por conta da poluição, diminuindo a sua disponibilidade para o consumo humano (DE FREITAS et al., 2001). Uma das principais fontes de contaminação é o lançamento de efluentes *in natura* que tem afetado o equilíbrio dos ecossistemas, impossibilitando a autodepuração dos corpos receptores (SILVA, 2010).

Dentre os poluentes, os metais são os responsáveis por reduzirem a capacidade de autodepuração dos flúmens devido à ação tóxica que exercem sobre os microorganismos. Esses microorganismos são responsáveis pela manutenção das águas através da decomposição dos materiais orgânicos que nelas são lançadas, evitando o processo de eutrofização (OGP, 2005; GABARDO, 2007).

A principal fonte de contaminação dos recursos hídricos no Brasil é o lançamento de esgoto doméstico *in natura* nos corpos d'água. Segundo o 25º Diagnóstico dos Serviços de Água e Esgotos, realizado em 2019, a média do índice de atendimento total com rede de abastecimento de água no país é de 83,7% e a média do índice de atendimento total com redes de esgoto é igual a 54,1%. Logo, parte do esgoto bruto ainda é lançado diretamente na natureza pela inexistência de rede coletora (BRASIL, 2019).

Considerando as condições atuais de saneamento do Brasil, a necessidade de encontrar novas tecnologias que possam aumentar a qualidade da água é um fator importante para melhorar o bem-estar, a proteção do meio ambiente, a qualidade de vida e a saúde da população.

### 3.2 METAIS TÓXICOS

Os metais tóxicos, como: arsênio (As), cádmio (Cd), cobre (Cu), estanho (Sn), antimônio (Sb), chumbo (Pb), bismuto (Bi), mercúrio (Hg), níquel (Ni) e zinco (Zn), são um grupo heterogêneo de elementos químicos conhecidos por causarem impactos negativos aos ecossistemas e serem altamente tóxicos para os organismos, principalmente os seres humanos. Sendo este termo, aplicado aos metais com densidade atômica superior a  $6 \text{ g.cm}^{-3}$  (ALLOWAY; AYRES, 1997). Ocorrem naturalmente no solo e são amplamente utilizados nas indústrias (SAJIDU et al., 2005). Entre as principais fontes de geração desses efluentes, destacam-se: as baterias descartadas incorretamente, as indústrias metalúrgicas e químicas, os curtumes e os processos de galvanoplastia e mineração (KALAVATHY; MIRANDA, 2010).

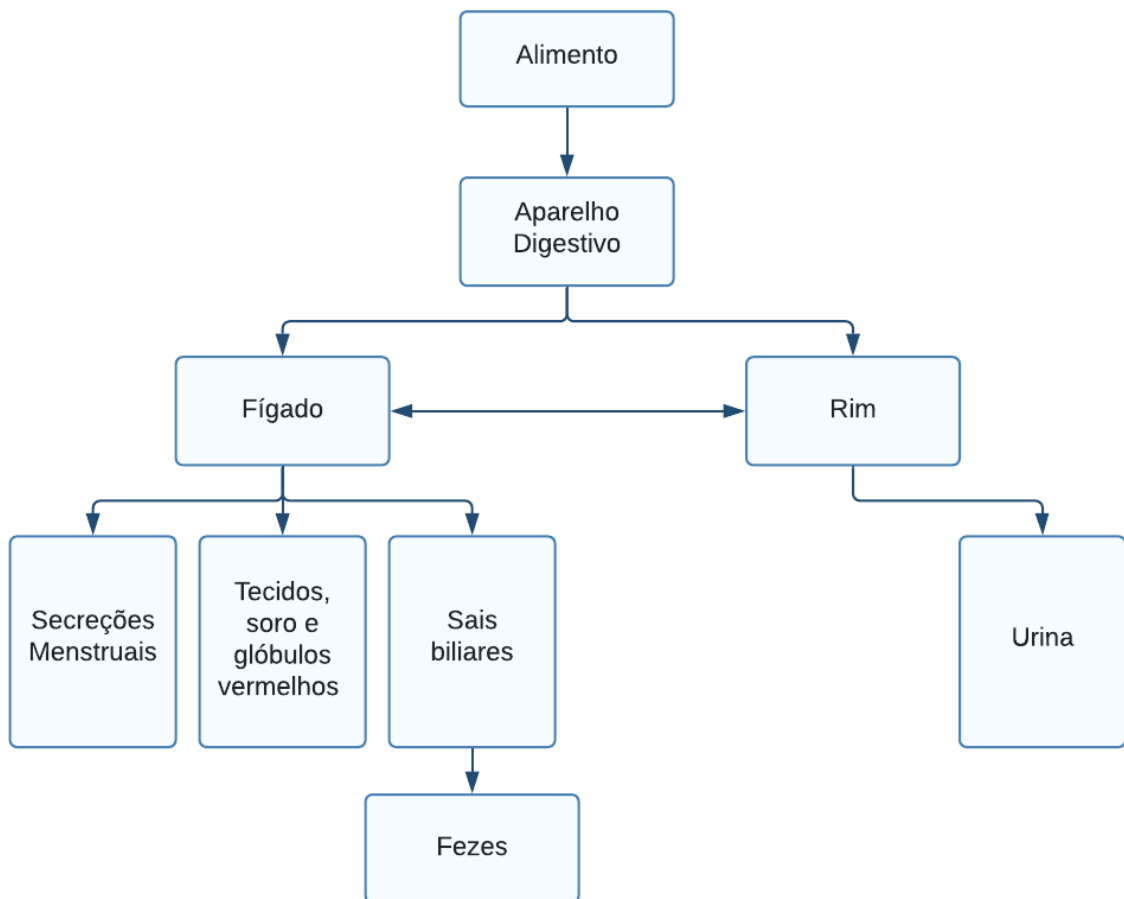
Enquanto os compostos orgânicos podem ser degradados, os metais são persistentes no meio ambiente (NADEEM et al., 2009). Por conta de sua natureza não biodegradável e o extenso período de meia-vida para a maioria dos metais, proporciona a capacidade de armazenamento, assimilação e bioacumulação nos organismos. Dessa forma, pode entrar em contato com o ser humano por meio da cadeia alimentar (ARIEF et al., 2008).

Esses metais são tóxicos para a fauna e a flora mesmo se estiverem em baixas concentrações, devido à assimilação e concentração que ocorre no meio ambiente (LESMANA et al., 2009). Para minimizar o efeito dos metais sobre o meio ambiente, muitas pesquisas têm sido desenvolvidas em busca de novas tecnologias para removê-los do meio em que estão inseridos.

### 3.3 COBRE (Cu)

Entre os metais presentes no corpo humano, destaca-se o cobre que está distribuído em diferentes concentrações por todo o organismo de acordo com o seu papel funcional. No entanto, a sua presença em excesso é nociva para as atividades de algumas enzimas (DE AZEVEDO et al., 2003). A mobilidade do cobre no organismo pode ser observada no fluxograma abaixo.

Fluxograma 1 – Mobilidade do cobre no corpo humano



Fonte: Sargentelli et al., 1996.

Junto com arsênio (As), cádmio (Cd), chumbo (Pb), mercúrio (Hg), níquel (Ni) e zinco (Zn), o cobre (Cu) é considerado um dos metais mais nocivos aos

ecossistemas e a sua toxicidade pode promover doenças relacionadas à pele, comprometer o sistema respiratório e estar relacionada com a incidência de diferentes tipos de câncer (KALAVATHY; MIRANDA, 2010).

Comumente agregado ao carbono, ferro e oxigênio, este elemento pode ser encontrado por toda a Terra. Atualmente, são conhecidos cerca de 150 minerais de cobre, entre eles, destaca-se pelo seu valor comercial a Calcocita ( $\text{Cu}_2\text{S}$ ), constituída de 79,8% de cobre e a Calcopirita ( $\text{CuFeS}_2$ ), constituída por 34,5% desse mesmo elemento (MOURA, 2001). A abundância desses minerais acaba chamando a atenção de empreendimentos de mineração, os quais proporcionam a descarga de quantidades significantes de cobre dissolvido e outros metais no meio ambiente.

Conforme a Portaria GM/MS nº 888, de 04 de maio de 2021, o valor máximo permitido de cobre dissolvido presente em água para consumo humano é de  $2,0 \text{ mg.L}^{-1}$  (BRASIL, 2021). Segundo a Resolução CONAMA nº 430, de 13 de maio de 2011, o valor máximo permitido de lançamento de efluente que contenha cobre dissolvido é de  $1,0 \text{ mg.L}^{-1}$  (CONAMA, 2011).

### 3.4 TRATAMENTO DE EFLUENTES CONTENDO METAIS TÓXICOS

As metodologias aplicadas no tratamento para remoção de metais pesados se baseiam em: adsorção, membranas filtrantes, precipitação química e eletroquímica, redução/oxidação, troca iônica seguidos de outros tratamentos, como: evaporação, extração por solvente e osmose reversa. Muitos destes tratamentos são caros e alguns são ineficientes, especialmente quando estes elementos estão presentes em pequenas concentrações (SHARMA et al., 2006; GHEBREMICHAEL; GEBRENEDHIN, 2010). Cada uma dessas metodologias possui vantagens e desvantagens em sua aplicação, entretanto, o processo de adsorção tem se mostrado um dos mais bem-sucedidos na remoção destes compostos, consequência do baixo custo de mercado dos biossorventes (BORBA, 2004).

Entende-se como adsorção o processo de adesão das moléculas de um dado fluido (o adsorbato – material adsorvido) a uma superfície sólida conhecida (o material

adsorvente). O bioissorvente mais conhecido e utilizado é o carvão ativado, contudo, este material possui um preço comercial elevado, aumentando o custo do processo. Desta forma, a academia tem proposto o uso de outros produtos naturais ou subprodutos da agricultura que sejam de fácil acesso, abundantes e que possuam capacidade adsorvente, buscando minimizar os custos envolvidos no processo de bioissorção (GUPTA; BABU, 2009; SHARMA et al., 2006).

A bioissorção apresenta como característica o uso de subprodutos da agricultura e indústrias (biomassa) que estejam disponíveis localmente, tais como plantas, resíduos de agricultura, serragem, etc. A busca se baseia em encontrar produtos que sejam facilmente encontrados na natureza, com baixo custo e que não precisem de pré-tratamento exaustivo antes da utilização (FRANCO, 2015). Apesar de eficiente, o processo de adsorção possui muitas variáveis experimentais que interferem no processo, como por exemplo: agitação, concentração inicial do metal e do bioissorvente, força iônica, pH e temperatura (DO NASCIMENTO et al., 2014).

Através de interações físico-química entre os íons metálicos e os grupos funcionais contidos na biomassa, ocorre o processo de bioissorção. Sendo este, um método adequado e relativamente rápido para a remoção de metais pesados, além de ser seletivo, pode ser revertido e dispensa a adição de outros reagentes (GOMES, 2012).

Segundo FREITAS (2018), por conta de sua constituição, a borra de café possui um potencial como bioissorvente de baixo custo e se enquadra nos critérios para adsorção, sendo rica em carbono, abundante e pode ser transformada em carvão ativado. Em sua pesquisa, empregou este material para a adsorção dos íons de Cromo(VI) (FREITAS, 2018).

### 3.5 BORRA DE CAFÉ

O Brasil é considerado o maior exportador e produtor de café do mundo, também é o segundo maior consumidor da bebida, atrás somente dos Estados Unidos que lidera



o *ranking*. O estado do Espírito Santo é o segundo maior produtor de café do país (ABIC, 2019). Este fato nos remete a quantidade apreciável de borra de café gerada após o consumo da bebida.

Tendo em vista a crescente preocupação com os problemas ambientais decorrentes da destinação errônea deste material, pesquisas vem sendo executadas com o intuito de encontrar formas para o seu aproveitamento, resgatando e agregando valor a este material (VEGRO; CARVALHO, 2006).

Entre os resíduos obtidos pela produção de café, a borra é o material mais abundante, sendo gerada em cafeterias, indústrias de produção de café instantâneo e residências domésticas. Para cada kg de café instantâneo produzido, forma-se 2 kg de borra de café úmida (FREITAS, 2018).

Na literatura, encontrou-se alguns estudos que empregaram a borra de café como adsorvente: a adsorção de azul de metileno e n-butano (MA; OUYANG, 2013), a remoção de chumbo (UTOMO; HUNTER, 2010) e a remoção de poluentes na água (NAMANE et al., 2005; REFFAS et al., 2010; CASTRO et al., 2011; JUNG et al., 2016).

Neste contexto, houve a possibilidade do uso da borra de café lavado (BCL) na adsorção de cobre(II) em solução aquosa como adsorvente no tratamento de águas residuárias industriais ou qualquer efluente que possa conter o metal de estudo, sendo a borra de café, um material de baixo custo, viabilizando economicamente, agregando valores sociais e ambientais ao resíduo.

## **4 METODOLOGIA**

### **4.1 PREPARO E PADRONIZAÇÃO DE SOLUÇÕES**

#### **4.1.1 Preparo de solução para determinação do Ponto de Carga Zero (PCZ)**

Para a determinação do Ponto de Carga Zero (PCZ), preparou-se uma solução contendo NaCl (Cloreto de Sódio), reagente da Neon Comercial LTDA, na concentração de  $0,1 \text{ mol.L}^{-1}$ . Os valores de pH foram ajustados conforme as medições do pHmêtro Technopoint, modelo mPA210, com soluções de HCl ou NaOH, ambas previamente preparadas na concentração de  $0,1 \text{ mol.L}^{-1}$ .

#### **4.1.2 Preparo de soluções para elaboração da curva de calibração de íons $\text{Cu}^{2+}$**

Para a elaboração da curva do Cobre(II), preparou-se 10 soluções contendo  $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$  (Nitrato de Cobre II Trihidratado), reagente da Neon Comercial LTDA, nas concentrações de 0, 5, 20, 40, 50, 60, 80, 100, 120 e  $150 \text{ mg.L}^{-1}$  de íons  $\text{Cu}^{2+}$ .

#### **4.1.3 Preparo de solução para os experimentos de adsorção de íons $\text{Cu}^{2+}$**

Para a execução dos experimentos de adsorção, preparou-se uma solução contendo  $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$  (Nitrato de Cobre II Trihidratado), reagente da Neon Comercial LTDA, na concentração de  $50 \text{ mg.L}^{-1}$  de íons  $\text{Cu}^{2+}$ .

#### 4.1.4 Preparo de solução de EDTA

Para a leitura das amostras no espectrofotômetro Agilent Technologies, modelo Cary 60 UV-Vis, preparou-se uma solução contendo  $C_{10}H_{14}N_2Na_2O_8 \cdot 2H_2O$  (EDTA Sal Dissódico Dihidratado), reagente da Neon Comercial LTDA, na concentração de  $0,02 \text{ mol.L}^{-1}$ .

#### 4.2 PREPARO DO MATERIAL ADSORVENTE

A matéria-prima utilizada neste trabalho como material adsorvente foi a borra de café, proveniente de padarias, mercearias, escritórios e residências do município de Ibatiba. Devido a diferentes procedências, qualidade do café, presença ou não de açúcares, todo material adquirido foi reunido e misturado, após esta etapa, retirou-se uma amostra de 500 gramas para o preparo do material utilizado na pesquisa. A metodologia utilizada no processo de lavagem da borra de café foi adaptada de SILVA (2010).

Utilizou-se uma manta aquecedora com agitação magnética Marconi, modelo MA 085/CT, para a lavagem da borra de café com água destilada aquecida a  $100^\circ\text{C}$  e agitação a 500 rpm por 30 minutos.

Em seguida, realizou-se à filtração do material sob pressão reduzida com uma bomba de vácuo PRISMATEC, modelo SL-63/P-132, conectado a um sistema contendo um kitassato e um funil de Büchner, utilizando papel filtro quantitativo com maioria dos poros de  $28 \mu\text{m}$ . O processo de lavagem da borra de café foi repetido até que a água saísse límpida com o intuito de remover os compostos solúveis.

Por fim, aferiu-se o pH da borra de café com o pHmêtro Technopoint, modelo mPA210, após a finalização do processo, o material foi seco em estufa FANEM, modelo 515/2 – A, sendo a partir daí denominada como borra de café lavado (BCL) (SILVA, 2010).

### 4.3 CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL ADSORVENTE

#### 4.3.1 Determinação do pH do material adsorvente

A medição do pH foi realizada com adaptações da metodologia utilizada por DONAGEMA et al. (2011) por meio de eletrodo combinado imerso em suspensão BCL-solução na proporção de 1 para 2,5. Da biomassa da Borra de Café Lavado (BCL), foram coletadas 4 gramas que, foram colocadas em béqueres de 100 mL enumerados. Em seguida, adicionou-se 10 mL de água destilada, seguindo de agitação com bastão de vidro individual e repouso por uma hora. Após esse tempo, mergulhou-se o eletrodo na suspensão homogeneizada e aferida a leitura do pH com o multiparâmetro Hanna, modelo HI98194 (DONAGEMA et al., 2011).

#### 4.3.2 Determinação do Ponto de Carga Zero (PCZ)

O procedimento de análise do PCZ consistiu em misturar 0,02 gramas de borra de café em 20 mL de solução aquosa de NaCl  $0,1 \text{ mol.L}^{-1}$ , sob 11 diferentes condições de pH inicial (2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12), ajustados conforme as medições do pHmêtro Technopoint, modelo mPA210, com soluções de HCl ou NaOH, ambas a  $0,1 \text{ mol.L}^{-1}$ . Após 24 horas em repouso, mediu-se o pH das soluções. A partir desses dados, gerou-se um gráfico relacionando o pH final com o pH inicial das soluções, onde a variação do pH foi igual a 0 é chamado de ponto de carga zero (REGALBUTO; ROBLES, 2004).

### **4.3.3 Determinação do teor de matéria orgânica**

Conforme PEREIRA et al. (2009), para determinação do teor de matéria orgânica, realizou-se a combustão seca em mufla nas temperaturas de 350°C e 450°C. As cápsulas de porcelana utilizadas neste ensaio foram inicialmente aquecidas em fornos muflas NEY, modelo 3-550 PD, nas temperaturas de  $350 \pm 2$  °C e  $450 \pm 2$  °C por 3 horas, em seguida, foram esfriadas em dessecador de sílica gel para pesagem. Após a pesagem dos cadinhos, pesou-se 10 gramas de borra de café na balança analítica Shimadzu, modelo AUY220. Transcorrido o tempo de combustão na temperatura requerida as cápsulas novamente foram pesadas (PEREIRA et al., 2009).

### **4.3.4 Determinação do teor de Cinzas**

Conforme ZAMBIAZI (2010), para determinação do teor de cinzas, realizou-se a combustão seca em mufla na temperatura de 550°C. As cápsulas de porcelana utilizadas neste ensaio foram inicialmente aquecidas em fornos muflas NEY, modelo 3-550 PD, na temperatura de  $550 \pm 2$  °C por 1 hora, em seguida, foram esfriadas em dessecador de sílica gel para pesagem. Após a pesagem dos cadinhos, pesou-se 10 gramas de borra de café na balança analítica Shimadzu, modelo AUY220. Transcorrido o tempo de combustão na temperatura requerida as cápsulas novamente foram pesadas (ZAMBIAZI, 2010).

#### 4.4 ESTUDO CINÉTICO E DETERMINAÇÃO DO TEMPO DE EQUILÍBRIO

Para o estudo cinético e a determinação do tempo de equilíbrio, utilizou-se metodologia adaptada de SILVA (2014). O ensaio foi realizado adicionando 2g de adsorvente em 100 mL de solução contendo cobre na concentração inicial de 50 mg.L<sup>-1</sup>, utilizou-se frascos erlenmeyer de 125 ml para cada tempo de contato e as amostras foram preparadas em triplicata.

Os ensaios cinéticos foram realizados no período de 0 a 170 minutos com coleta de alíquotas de 10 mL nos intervalos pré-determinados de 0, 10, 20, 40, 60, 70, 80, 90, 100, 110, 120, 130, 140, 150, 160 e 170 minutos. As amostras foram agitadas na incubadora Shaker, modelo LUCA-222, a 25°C e 100 rpm.

Após a coleta, as alíquotas foram filtradas. As amostras foram quantificadas na faixa de 735 nanômetros nm utilizando um espectrofotômetro Agilent Technologies, modelo Cary 60 UV-Vis, com uma curva de calibração preparada previamente (SILVA, 2014).

##### 4.4.1 Modelos cinéticos linearizados

Com o intuito de encontrar um tempo de equilíbrio para a adsorção máxima obtida através de cálculos, alguns modelos matemáticos vêm sendo utilizados para esclarecer a cinética de adsorção. O modelo de pseudo-primeira ordem foi proposto por Lagergren e é expressa pela equação de linearização (DEBRASSI, 2011):

$$\ln (q_e - q_t) = \ln (q_e) - k_1 t \quad (\text{Equação 01})$$

Já o modelo de pseudo-segunda ordem foi proposto por Ho e McKay, assim como anterior, a linearização é obtida através de uma equação, sendo ela (DEBRASSI, 2011):

$$(t / Q_t) = (1 / k_2 \cdot Q_e^2) + (1 / Q_e)t \quad (\text{Equação 02})$$

Em que,

$q_e$  corresponde a quantidade de íons  $\text{Cu}^{2+}$  adsorvido ( $\text{mg.g}^{-1}$ ) no equilíbrio;

$q_t$  corresponde a quantidade de íons  $\text{Cu}^{2+}$  adsorvido no tempo  $t$ ,  $\text{mg.g}^{-1}$ ;

$t$  corresponde ao tempo, em min;

$k_1$  corresponde a constante de velocidade da equação 01, em  $\text{min}^{-1}$ ; e

$k_2$  corresponde a constante de velocidade da equação 02, em  $\text{g.mg}^{-1}.\text{min}^{-1}$ .

#### 4.5 DETERMINAÇÃO DO pH ÓTIMO DE SORÇÃO

Para a determinação do pH ótimo de sorção, preparou-se amostras para realização de ensaios em pH 2, 6, 8 e 10. Em 4 frascos Erlenmeyer foram adicionados 100 mL da solução de  $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$  na concentração de  $50 \text{ mg.L}^{-1}$  e utilizados 2 gramas de borra de café lavado (BCL).

O pH foi ajustado conforme pré-estabelecido para cada ensaio. Os frascos foram agitados por 110 minutos na incubadora Shaker, modelo LUCA-222, a  $25^\circ\text{C}$  e 100 rpm. Após a coleta, as alíquotas foram filtradas. As amostras foram quantificadas na faixa de 735 nm utilizando um espectrofotômetro Agilent Technologies, modelo Cary 60 UV-Vis, com uma curva de calibração preparada previamente (Zanella, 2012).

#### 4.6 QUANTIFICAÇÃO POR ESPECTROFOTOMETRIA DE ABSORÇÃO

A construção da curva de calibração foi realizada com adaptações da metodologia utilizada por LOPES (2015). Preparou-se soluções de EDTA-cobre nas concentrações pré-estabelecidas na proporção 1:1. De cada solução, foi coletada 1,5 ml que, foi colocada em cubeta de quartzo. Em seguida, adicionou-se 1,5 ml da solução de  $C_{10}H_{14}N_2Na_2O_8 \cdot 2H_2O$  na concentração de  $0,02 \text{ mol.L}^{-1}$ . Após agitação instantânea, colocou-se a cubeta de quartzo no espectrofotômetro Agilent Technologies, modelo Cary 60 UV-Vis e, fez-se a leitura na faixa de 735 nm.

Para a quantificação por espectrofotometria de absorção foi realizada através do preparo de soluções de EDTA-cobre remanescente após a retirada das alíquotas do ensaio de adsorção na proporção 1:1. De cada solução final do ensaio de adsorção, foi coletada 1,5 ml que, foi colocada em cubeta de quartzo. Em seguida, adicionou-se 1,5 ml da solução de  $C_{10}H_{14}N_2Na_2O_8 \cdot 2H_2O$  na concentração de  $0,02 \text{ mol.L}^{-1}$ . Após agitação instantânea, colocou-se a cubeta de quartzo no espectrofotômetro Agilent Technologies, modelo Cary 60 UV-Vis e, fez-se a leitura na faixa de 735 nm (LOPES, 2015).

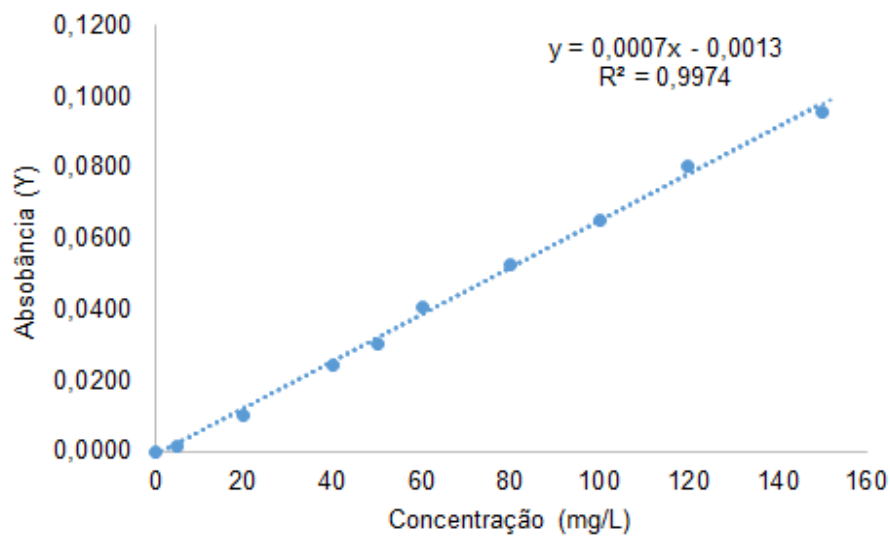


## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.1 OBTENÇÃO DA CURVA DE CALIBRAÇÃO DO COBRE

A análise da concentração de íons cobre(II) das soluções foi feita por espectrofotometria de absorção no UV-VIS, na faixa de 735 nm, por meio do método de curva de calibração, conforme mostrada na Figura 1.

Figura 1 – Comportamento da absorbância em função da concentração de íons cobre(II) no intervalo de 5 a 150 mg.L<sup>-1</sup>.



Fonte: O Autor.

Com a utilização do EDTA, forma-se complexos muito estáveis de metais, entre ele o cobre (LOPES, 2015). Isso pode ser observado pelo coeficiente de determinação encontrado que foi de 0,9974, apresentando um comportamento linear da absorbância em função da concentração de íons cobre(II) no intervalo de 5 a 150 mg.L<sup>-1</sup>.

## 5.2 CARACTERÍSTICAS DO MATERIAL ADSORVENTE

Na caracterização do material adsorvente, obteve-se os resultados de pH, Teor de Matéria Orgânica a 350°C, Teor de Matéria Orgânica a 450°C e o Teor de Cinzas, estes resultados estão expressos na Tabela 1.

Tabela 1 – Parâmetros avaliados na caracterização da BCL

Amostra	pH	% Teor de Matéria Orgânica (350°C)	% Teor de Matéria Orgânica (450°C)	% Teor de Cinzas
1	4,70	90,84	98,35	0,10
2	4,67	92,32	98,69	0,46
3	4,71	88,06	98,87	0,76
<b>Média</b>	<b>4,70</b>	<b>90,84</b>	<b>98,69</b>	<b>0,46</b>

Fonte: O Autor.

Para o parâmetro pH, encontrou-se o valor médio de 4,70 que corresponde à acidez potencial. Nesta análise, mede-se o pH da solução aquosa em contato com o adsorvente, portanto, o material adsorvente preparado após a lavagem, ainda libera substâncias solúveis ácidas em solução. Sendo assim, quaisquer soluções que entrem em contato com a BCL se tornarão ácidas. Isso remete ao que é descrito por SANTOS et al. (2018), que relata a natureza ácida da borra de café (SANTOS et al., 2018).

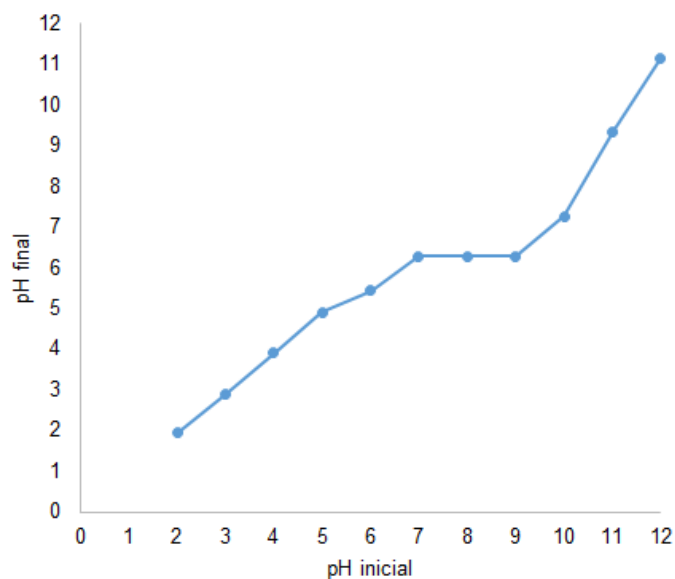
Observa-se na temperatura de 350°C um elevado teor de matéria orgânica com média superior a 90% da composição da amostra de Borra de Café utilizada no ensaio e a 450°C uma tendência de estabilidade com média acima de 98%. Estes resultados corroboram com as características de um bom adsorvente, sendo que, a troca de cátions que ocorrem em sítios de adsorção pode ser favorecida pela matéria orgânica, entretanto, a sua pré-disposição de combinação com metais vem

de grupos funcionais ou ligantes que constituem complexos com esses compostos de difícil degradação (DA FONSECA, 2013).

Para o teor de cinzas, obteve-se como média 0,46%, sendo esta percentagem correspondente aos produtos gerados ao fim do processo de calcinação das amostras. Teixeira (2018), obteve como resultado do teor de cinzas 1,81% seguindo metodologia similar (TEIXEIRA, 2018).

A determinação do comportamento ácido-básico da superfície da borra de café foi realizada pela determinação do Ponto de Carga Zero (PCZ), conforme expresso na Figura 2.

Figura 2 – Gráfico de pH final em função do pH inicial para a determinação do PCZ



Fonte: O Autor.

A figura acima expressa a relação do pH final obtido após 24 horas com o pH inicial para a determinação do PCZ. Nesta análise, observa-se 3 pontos que apresentaram uma variação de pH igual a 0, sendo este valor obtido, o ponto de carga zero.

O resultado da medição final do PCZ da borra de café encontrado após 24 horas foi de 6,27. Observa-se que o valor do PCZ determinado para a borra de café foi

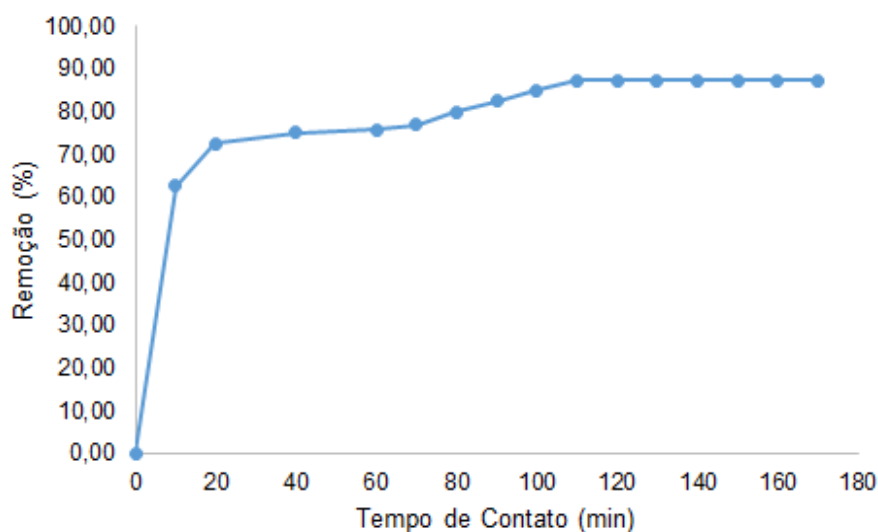
superior ao valor encontrado por ROLDI (2018), que obteve uma média de 5,86 para a Borra de Café *in natura* (ROLDI, 2018).

Conforme EMBRAPA (2017), a carga na superfície do material é determinada pela diferença entre o pH do material adsorvente e o PCZ, sendo que: se o pH da BCL for superior ao PCZ, o material adsorvente terá a sua superfície carregada negativamente, apresentando capacidade de troca catiônica (CTC) e se o pH da BCL for inferior ao PCZ, o material adsorvente terá a sua superfície carregada positivamente, apresentando capacidade de troca aniônica (CTA) (EMBRAPA, 2017).

### 5.3 CINÉTICA DE ADSORÇÃO

Na Figura 3 pode ser observado a quantidade removida (%) em função do tempo de contato (min) do adsorvente com o adsorvato.

Figura 3 – Quantidade de  $\text{Cu}^{2+}$  removida em função do tempo de contato com a BCL utilizando 2g de adsorvente em 100 mL de solução contendo cobre na concentração inicial de  $50 \text{ mg.L}^{-1}$



Fonte: O Autor.

Observa-se na Figura 3 que a BCL atingiu o tempo de equilíbrio em contato com os íons de  $\text{Cu}^{2+}$  a partir de 110 minutos, obtendo uma eficiência de remoção de 87,19%. No estudo, foi utilizada uma solução de  $50 \text{ mg.L}^{-1}$  de Cobre(II).

ALVES (2007), verificou a remoção do Cobre(II), utilizando carvão ativado comercial produzido a partir da casca do coco, constatando uma remoção média de 60% na concentração de  $25 \text{ mg.L}^{-1}$  de  $\text{Cu}^{2+}$ , aplicando  $5 \text{ g.L}^{-1}$  de adsorvente com pH 6 (ALVES, 2007).

Já LUCENA et al. (2015), utilizou Quitosana modificada com o sal de Amônio Quaternário (SAQ-QTS) como adsorvente, a percentagem de  $\text{Cu}^{2+}$  adsorvido em 120 minutos foi de 95,16% e o percentual máximo ao final de 7 horas de experimento foi de 97,15%. As soluções de Cobre(II) utilizadas em sua pesquisa possuíam concentração de  $600 \text{ mg.L}^{-1}$  (LUCENA et al., 2015).

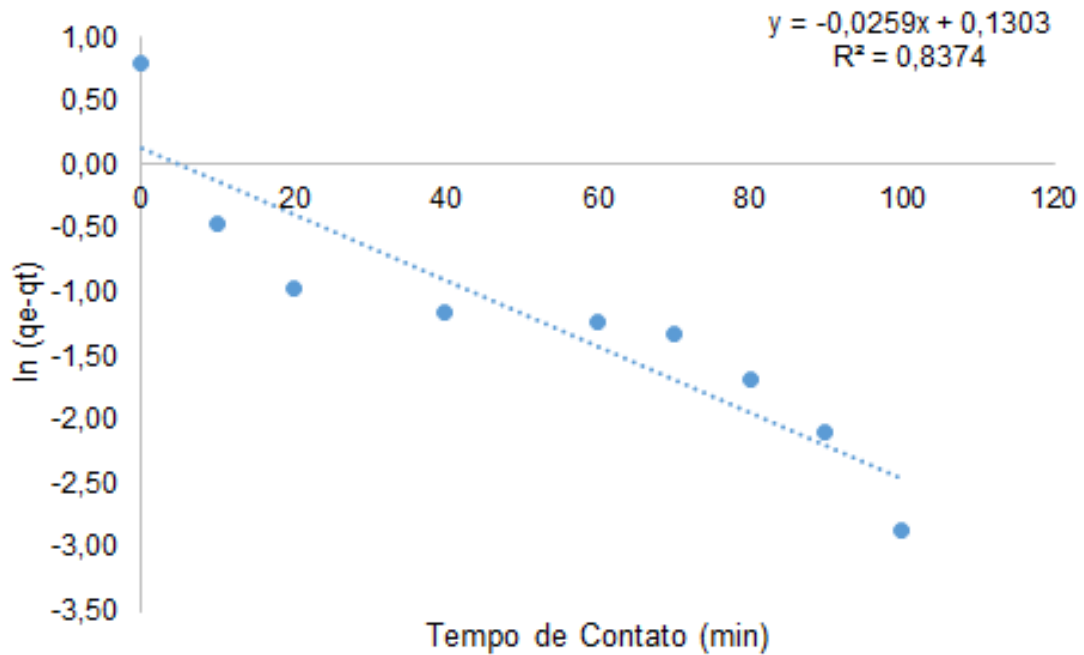
SALVADOR (2009), empregou como material adsorvente o pó de casca de coco verde na adsorção de cobre(II) na concentração de  $20 \text{ mg.L}^{-1}$ , tendo como resultado da eficiência do processo de remoção 96,1% (SALVADOR, 2009).

### 5.3.1 Modelos cinéticos

Com base no resultado obtido no estudo cinético da adsorção de Cobre(II) com a BCL, obteve-se os ajustes dos dados de tempo de contato utilizando os modelos cinéticos de pseudo-primeira ordem, conforme Lagergren (Equação 01) e de pseudo-segunda ordem proposto por Ho e McKay (Equação 02).

BEZERRA (2017) destaca que os dois modelos cinéticos descrevem que a diferença da migração do analito entre as fases adsorvente/solução e o equilíbrio é a força motriz da adsorção, em qualquer tempo de contato (BEZERRA, 2017).

Figura 4 – Modelo cinético de pseudo-primeira ordem



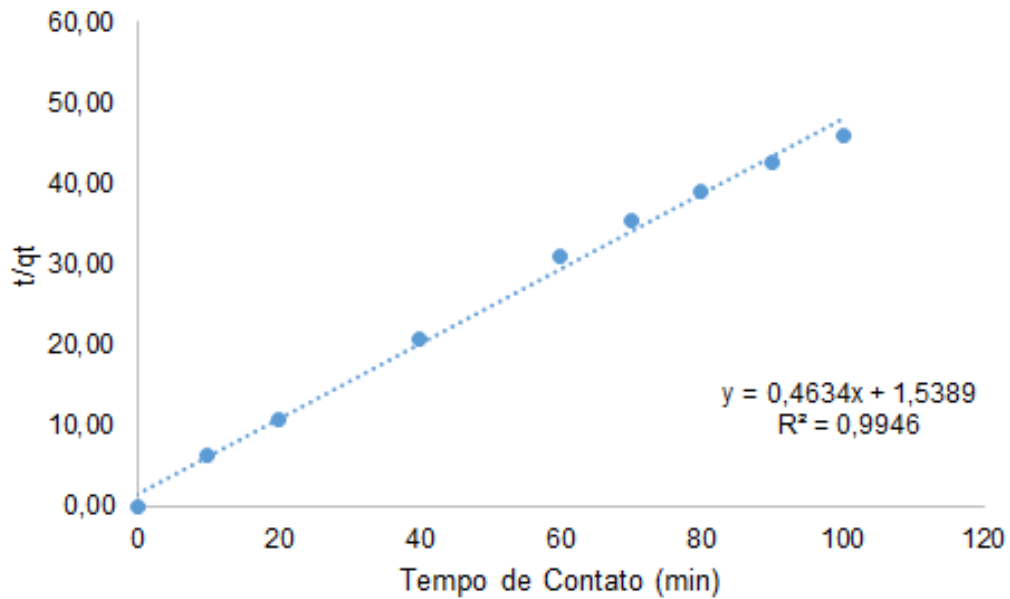
Fonte: O Autor.

De acordo com os dados dispostos no gráfico 4, observa-se que o modelo cinético de pseudo-primeira ordem (Equação 01) não se ajustou de forma adequada à faixa do tempo de contato devido ao valor do coeficiente de determinação obtido ( $R^2 = 0,8374$ ).

Segundo YANG (2003), o modelo de pseudo-primeira ordem é regida pela relação da taxa de adsorção global com a força motriz, sendo estes elementos diretamente proporcionais (YANG, 2003).

Por outro lado, o modelo de pseudo-segunda ordem que apresenta um melhor ajuste (Figura 5) a relação ocorre entre a taxa de adsorção e o quadrado da força motriz, sendo estes elementos diretamente proporcionais.

Figura 5 – Modelo cinético de pseudo-segunda ordem



Fonte: O Autor.

Na figura 5, nota-se um melhor ajuste quando comparado aos dados do gráfico anterior, o modelo de Ho e McKay apresentou um coeficiente de ajuste de 0,9946 e uma capacidade máxima de adsorção de  $q_{cal}$  igual a  $2,5769 \text{ mg.g}^{-1}$  (Tabela 3), próximo do que foi encontrado pelas análises experimentais ( $q_{exp}$ ).

Tabela 2 – Parâmetros das regressões lineares obtidas nos modelos cinéticos

Modelo Cinético	Equação da reta	Coefficiente de correlação
Pseudo-primeira ordem	$y = -0,0259x + 0,1303$	$R^2 = 0,8374$
Pseudo-segunda ordem	$y = 0,4634x + 1,5389$	$R^2 = 0,9946$

Fonte: O Autor.

A partir dos valores obtidos na Tabela 2, calculou-se os parâmetros cinéticos da equação de Lagergren e de Ho e McKay. Os parâmetros determinados foram  $k_1$ ,  $k_2$ , a capacidade máxima de adsorção calculada ( $q_{cal}$ ), a capacidade máxima de

adsorção experimental ( $q_{exp}$ ) e o coeficiente de correlação ( $R^2$ ), dados dispostos na Tabela 3.

Tabela 3 – Parâmetros dos modelos cinéticos da adsorção do  $Cu^{2+}$  na BCL

Componente	Pseudo-primeira Ordem				Pseudo-segunda Ordem			
	$q_{exp}$	$K_1$	$q_{cal}$	$R^2$	$q_{exp}$	$K_2$	$q_{cal}$	$R^2$
<b>Cu (II)</b>	2,24	-0,0259	0,0723	0,8374	2,24	0,4634	2,5769	0,9946

Fonte: O Autor.

Com base nos dados da Tabela 3, observa-se que o modelo cinético que melhor se ajustou foi o de pseudo-segunda ordem (Ho e McKay). O modelo de pseudo-segunda ordem sugere a ocorrência de uma forte interação entre o adsorvato e o adsorvente como destacado no trabalho de BOAS et al. (2012), utilização do mesocarpo e o endocarpo da macadâmia na adsorção de íons  $Cu^{2+}$  (BOAS et al., 2012).

Para esse modelo a capacidade de adsorção no equilíbrio experimental ( $q_{exp} = 2,24$ ) e a capacidade de adsorção no equilíbrio calculada ( $q_{cal} = 2,5769$ ) apresentaram proximidade em seus valores.

#### 5.4 pH ÓTIMO DE SORÇÃO

A Tabela 4 apresenta o efeito do pH na sorção do cobre(II) pela borra de café lavado (BCL), sendo que, cada um dos pontos corresponde à média dos ensaios realizados em triplicata.



Tabela 4 – Efeito do pH na remoção de Cobre(II) via sorção com BCL

<b>pH</b>	<b>Concentração Residual de Cu<sup>2+</sup> (mg.L<sup>-1</sup>)</b>	<b>Remoção (%)</b>
2,0	39,43	23,13
4,7	6,57	87,19
6,0	5,86	88,58
8,0	4,71	90,81
10,0	9,14	82,17

Fonte: O Autor.

O efeito do pH na remoção do cobre(II) foi avaliado em 5 valores de pH, entre eles, o pH da BCL encontrado na caracterização do material adsorvente. Os ensaios foram realizados com o tempo fixado em 110 minutos, o equilíbrio identificado no experimento de cinética de adsorção.

Conforme a Tabela 4, observa-se que o experimento desenvolvido com o pH 8 apresentou maior eficiência na adsorção de íons Cu<sup>2+</sup> pela BCL, com 90,81% de remoção. Com isto, a concentração final de cobre nesta solução foi 4,71 mg.L<sup>-1</sup>.

## 6 CONCLUSÃO

Conclui-se que, utilizando o método proposto por SILVA (2010) para preparar o material adsorvente removendo os compostos solúveis, obteve-se com sucesso o biossorvente que foi utilizado no processo de adsorção de Cobre(II).

A partir da caracterização da borra de café lavado e dos dados obtidos, infere-se que a BCL possui: pH ácido, PCZ ligeiramente ácido, elevado teor de matéria orgânica e baixo teor de cinzas, apresentando alta biodegradabilidade, sendo estes, resultados satisfatórios para um bom adsorvente. Além disso, a BCL é um material de baixo custo e disponível em grande quantidade pelo elevado consumo de bebidas à base de café no país.

O biossorvente apresentou potencial para sua exploração, observa-se uma remoção de aproximadamente 87% atingindo o tempo de equilíbrio aos 110 minutos. O ajuste realizado através da utilização de modelos cinéticos para linearização que apresentou melhor resultado foi o proposto por Ho e McKay, sendo este, o modelo de pseudo-segunda ordem.

A análise do pH ótimo de sorção obtido experimentalmente apontou que o pH 8 apresentou maior eficiência na adsorção de íons de  $\text{Cu}^{2+}$  aos 110 minutos com uma taxa de remoção de 90,81%.

Apesar do potencial para exploração no processo de adsorção dos íons  $\text{Cu}^{2+}$ , o material adsorvente demanda estudos posteriores para atender os padrões de lançamento de efluentes industriais previsto na resolução CONAMA nº 430/2011. Sugere-se para estudos futuros, a exploração das isotermas de adsorção que não foram abordadas neste trabalho.

## REFERÊNCIAS

ABIC. **ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DE CAFÉ**. O café brasileiro na atualidade. Disponível em: <<http://abic.com.br/o-cafe/historia/o-cafe-brasileiro-na-atualidade/>> Acesso em: 11 de nov. 2021.

AGUIAR-PALERMO, M. R. M.; NOVAES, A. C. Remoção de metais pesados de efluentes industriais por aluminossilicatos. **Química Nova**, vol. 25, p. 1145, 2002.

ALLOWAY, B. J; AYRES, D. C. **Chemical Principles of Environmental Pollution**. 2th ed. United Kindon: Blackie Academic e Professional, 1997.

ALVES, A. C. M. **Avaliação do tratamento de efluentes líquidos contendo cobre e chumbo por adsorção em carvão ativado**. Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Alagoas, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento, 2007.

ARIEF, V. O. et al. Recent Progress on Biosorption of Heavy Metals from Liquids Using Low Cost Biosorbents: Characterization, Biosorption Parameters and Mechanism Studies. **Soil, Air, Water**, vol. 36, n. 12, p. 937-962, 2008.

BEZERRA, J. K. A. **Remoção de benzeno e tolueno em solução aquosa por adsorção utilizando carvão ativado produzido a partir do lodo doméstico**. Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, 2017.

BOAS, N. V.; CASARIN, J.; CAETANO, J.; JUNIOR, A. C. G.; TARLEY, C. R. T.; DRAGUNSKI, D. C. Biossorção de cobre utilizando-se o mesocarpo e o endocarpo da macadâmia natural e quimicamente tratados. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.16, n.12, p.1359–1366, 2012.

BORBA, C. E. **Modelagem da Remoção de Metais Pesados em Coluna de Adsorção de Leito Fixo FEQ**. 2004. Dissertação (Faculdade de Engenharia Química) - Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2004.

BRASIL. **Ministério da Saúde**. Portaria GM/MS N° 888, de 04 de maio de 2021.

BRASIL. **Ministério do Desenvolvimento Regional**. Secretaria Nacional de Saneamento – SNS. Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento: 25º Diagnóstico dos Serviços de Água e Esgotos – 2019. Brasília: SNS/MDR, 2020. 183 p.: il.

CASTRO, C. S. **Preparação de carvão ativado a partir de borra de café: uso como adsorvente e como suporte catalítico para a remoção de poluentes orgânicos em meio aquoso**. 2009. Dissertação (Mestrado em Agroquímica) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2009.

CASTRO, C. S. et al. Phenol adsorption by activated carbon produced from spent coffee grounds. **Water Science and Technology**, vol. 64, n. 10, p. 2059-2065, 2011.

CONAMA. [Conselho Nacional do Meio Ambiente]. Resolução no 430, de 13 de maio de 2011. **Dispõe sobre as condições e padrões de lançamento de efluentes**. Disponível em: <https://www.legisweb.com.br/legislacao/?id=114770>. Acesso em 20 de dez. de 2021.

DA FONSECA, A. C. C. **Produção de carvão ativado utilizando como precursor borra de café e sua aplicação na adsorção de fenol**. Dissertação (graduação) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Departamento Acadêmico de Química e Biologia, Curso Superior de Tecnologia em Processos Ambientais, 2013.

DE AZEVEDO, S. M.; CARDOSO, M. D.; PEREIRA, N. E.; RIBEIRO, C. F. S.; SILVA, V. F.; AGUIAR, F. C. Levantamento da contaminação por cobre nas aguardentes de cana-de-açúcar produzidas em Minas Gerais. **Ciênc. agrotec.**, Lavras. V.27, n.3, p.618-624, maio/jun., 2003.

DEBRASSI, A.; LARGURA, M. C. T.; RODRIGUES, C. A. Adsorção do corante vermelho congo por derivados da o-carboximetilquitosana hidrofobicamente modificados. **Quim. Nova**, Vol. 34, No. 5, 764-770, 2011.

DE FREITAS, M. B.; BRILHANTE, O. M.; DE ALMEIDA, L. M. Importância da análise de água para a saúde pública em duas regiões do Estado do Rio de Janeiro: enfoque para coliformes fecais, nitrato e alumínio. **Cad. Saúde Pública**, Rio de Janeiro, 17(3):651-660, mai-jun, 2001.

DE SOUZA, J. R.; DE MORAES, M. E. B.; SONODA, S. L.; SANTOS, C. R. G. A Importância da Qualidade da Água e os seus Múltiplos Usos: Caso Rio Almada, Sul da Bahia, Brasil. **REDE - Revista Eletrônica do Prodepa**, v.8, n.1, p. 26-45, abr. 2014, Fortaleza, Brasil, ISSN: 1982-5528.

DONAGEMA, G. K. et al. Manual de métodos de análise de solo. **Embrapa Solos- Documentos (INFOTECA-E)**, 2011.

DO NASCIMENTO et al. Adsorção: aspectos teóricos e aplicações ambientais. Fortaleza: **Imprensa Universitária**, 2014. 256 p.: il.; 21 cm. (Estudos da Pós-Graduação), ISBN: 978-85-7485-186-0.

DURÁN, C. A., TSUKUI, A., SANTOS, F., MARTINEZ, S. T., BIZZO, H. R., REZENDE, C. M. Café: Aspectos Gerais e seu Aproveitamento para além da Bebida. **Revista Virtual de Química**, vol. 9, p. 107-134, 2017.

EMBRAPA. Manual de métodos de análise de solo. 3. ed. **rev. e ampl.** – Brasília, DF: Embrapa, 2017.

FRANCO, M. **Remoção de metais pesados da água por filtração lenta em não tecidos com auxílio de coagulante extraído de sementes de Moringa Oleífera**.

2015. Tese (Departamento de Engenharia Agrícola) - Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2015.

FREITAS, A. M. **Uso da borra de café como adsorvente para resíduos de cromo (VI)**. 2018. Monografia (Curso de Engenharia Química) - Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2018.

GARBADO, I.T. **Caracterização química e toxicológica da água produzida descartada em plataformas de óleo e gás na costa brasileira e sua dispersão no mar**. 2007. Tese (Programa de Pós-Graduação em Química) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2007.

GHEBREMICHAEL, K.; GEBRENEDHIN, N.; AMY, G. Performance of Moringa oleifera as a biosorbent for chromium removal. **Water research & Technology**, vol. 62, n. 5, p. 1106-1111, 2010.

GOMES, M. E. **Desenvolvimento de isoterma de sorção de metal pesado baseada no cálculo fracionário**. 2012. Dissertação (Curso de Pós-Graduação em Engenharia Química) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2012.

GUPTA, V. K. et al. Removal of cádmium and nickel from wastewater using bagasse fly ash – a sugar industry waste. **Water Research**, vol. 37, p. 4038, 2003.

GUPTA, V. K.; ALI, I. Removal of lead and chromium from wastewater using bagace fly ash – a sugar industry waste. **Journal of Colloid Interface Science**, vol. 271, p. 321, 2004.

GUPTA, S., BABU, B. V. Utilization of waste product (tamarind seeds) for the removal of Cr(VI) from aqueous solution: Equilibrium, Kinetics, and regeneration studies. **Journal of Environmental Management**, vol. 90, n. 10, p. 3013- 3022, 2009.

HORSFALL, M. J.; ABIA, A. A.; SPIFF, A. I. Kinetic studies on the adsorption of Cd<sup>2+</sup>, Cu<sup>2+</sup> and Zn<sup>2+</sup> ions from aqueous solutions by cassava (Manihot sculentaCranz) tuber bark waste. **Bioresource Technology**, vol. 97, p. 283, 2006.

JUNG, K.-W. et al. Fabrication of granular activated carbons derived from spent coffee grounds by entrapment in calcium alginate beads for adsorption of acid orange 7 and methylene blue. **Bioresource Technology**, vol. 219, p. 185-195, 2016.

KALAVATHY, M. H.; MIRANDA, L. R. A solid phase extractant for the removal of copper, nickel, and zinc from aqueous solutions. **Chemical Engineering Journal**, vol. 158, n.2, p. 188-199, 2010.

KUMAR, U.; BANDYOPADHYAY, M. Sorption of cadmium from aqueous solution using pretreated rice husck. **Bioresource Technology**, vol. 97, p. 104, 2006.

LESMANA, S. O. et al. Studies on potential applications of biomass for the separation of heavy metals from water and wastewater. **Biochemical Engineering Journal**, vol. 44, n. 1, p. 19–41. 2009.

LOPES, A. M. O. **Liberção controlada de complexo de cobre (II) com EDTA de matrizes de quitosana e ágar**. Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Viçosa, Programa de Pós-Graduação em Agroquímica, 2015.

LUCENA, G. L.; SILVA, A. G.; HONÓRIO, L. M. C.; SANTOS, V. D. Avaliação da Capacidade de Adsorção da Quitosana Quaternizada na Remoção de Íons  $\text{Cu}^{2+}$  e  $\text{Cr}^{3+}$ . **Rev. Virtual Quim.**, 2015, 7 (6), 2166-2179.

MOREIRA, D. M. et al. Anéis de Kayser-Fleischer. **Arquivo Brasileiro de Oftalmologia**, vol. 64, p. 589-93, 2001.

MOURA, M. C. P. A. **Utilização de Microemulsões como Agentes Modificadores de Superfícies para Remoção de Íons Metálicos**. 2001. Tese (Doutorado em Pesquisa e Desenvolvimento de Tecnologias Regionais) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2001.

NADEEM, M. et al. Sorption of cadmium from aqueous solution by surfactant-modified carbon adsorbents. **Chemical Engineering Journal**, vol. 148, n. 2-3, p. 365-370, 2009.

NAMANE, A. et al. Determination of the adsorption capacity of activated carbon made from coffee grounds by chemical activation with  $\text{ZnCl}_2$  and  $\text{H}_3\text{PO}_4$ . **Journal of hazardous materials**, vol. 119, n. 1, p. 189-194, 2005.

OGP. [International Association of oil and gas producers]. Fate and effects of naturally occurring substances in produced water on marine environment. **Report 364**, 2005, 36p.

PEREIRA, J. S. et al. Determinação da matéria orgânica em solos com diferentes métodos de análise e uma proposta para reciclagem dos resíduos laboratoriais formados. **OLAM-Ciência & Tecnologia**, 2009.

RAO, M., PARWATE, A.V.; BHOLE, A.G. Removal of  $\text{Cr}^{6+}$  and  $\text{Ni}^{2+}$  from aqueous solution using bagasse and fly ash. **Waste Management**, vol. 22, p. 821-830, 2002.

REFFAS, A. et al. Carbons prepared from coffee grounds by  $\text{H}_3\text{PO}_4$  activation: Characterization and adsorption of methylene blue and Nylosan Red N-2RBL. **Journal of hazardous materials**, vol. 175, n. 1, p. 779-788, 2010.

REGALBUTO, J. R.; Robles, J.; The engineering of Pt/Carbon Catalyst Preparation, **University of Illinois**: Chicago, 2004.

ROLDI, L. L. **Avaliação da capacidade de adsorção da borra de café e da casca de café na remoção de 2,4-D em amostras de água**. Dissertação (mestrado) - Universidade Federal do Espírito Santo, Centro Tecnológico, Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Desenvolvimento Sustentável, 2018.

SALVADOR, G. **Estudo da adsorção de cobre (II) usando como adsorvente pó da casca de coco verde ativada com hidróxido de sódio**. Dissertação (Trabalho

de Conclusão de Curso) – Universidade Federal de Santa Catarina, Centro de Ciências Físicas e Matemáticas, 2009.

SANTOS, S. L. **Produção e purificação de frutossil transferase por *Aspergillus flavus* utilizando borra de café (*Coffea* sp.) através da fermentação em estado sólido**. Dissertação (mestrado) – Universidade Federal Rural de Pernambuco, Programa de Pós-Graduação em Biociência Animal, 2018.

SARGENTELLI, V.; MAURO, A. E.; MASSABNI, A. C. Aspectos do metabolismo do cobre no homem. **Química Nova**, São Paulo, v. 19, n. 3, p. 290- 293, 1996.

SHARMA, P. et al. Removal of cadmium from aqueous system by shelled Moringa oleifera Lam. seed powder. **Bioresource Technology**, vol. 97, n. 2, p. 299-305, 2006.

SILVA, J. F. A.; PEREIRA, R. G. Panorama global da distribuição e uso de água doce. **Revista Ibero Americana de Ciências Ambientais**, v.10, n.3, p.263-280, 2019. DOI: <http://doi.org/10.6008/CBPC2179-6858.2019.003.0023>.

SOUSA, F. W. et al. Uso da casca de coco verde como adsorvente na remoção de metais tóxicos. **Química Nova**, vol. 30, p. 1153, 2007.

SILVA, R. P. **Remoção de metais pesados em efluentes sintéticos utilizando vermiculita como adsorvente**. 2010. Tese (Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2010.

SILVA, N. C. R. **Utilização da casca de banana como biossorvente para a adsorção de chumbo (II) em solução aquosa**. 2014. Monografia (Curso Superior de Engenharia Ambiental) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campo Mourão, 2014.

TEIXEIRA, T. F. V. F. **Estudo da pirólise da borra de café com vista à produção de biochar e bioóleo**. Dissertação (mestrado) – Instituto Superior de Engenharia do Porto, Mestrado em Engenharia Química, Tecnologias de Proteção Ambiental, 2018.

UTOMO, H. D.; HUNTER, K. A. Particle concentration effect: adsorption of divalent metal ions on coffee grounds. **Bioresource technology**, vol. 101, n. 5, p. 1482-1486, 2010.

VEGRO, C. L. R.; CARVALHO, F. C. Disponibilidade e utilização de resíduos gerados no processamento agroindustrial do café. **Informativo Econômico**, vol. 24, p. 9-16, 2006.

YANG, R. T.; Adsorbents: Fundamentals and Applications. **John Wiley & Sons**: New Jersey, 2003.

ZANELLA, O. **Sorção de nitrato em carvão ativado com CaCl<sub>2</sub>: Estudo de ciclos de sorção/regeneração**. 2012. Dissertação (Programa de Pós-Graduação em

Engenharia Química) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2012.

ZAMBIAZI, R.C. Análise Físico-Química de Alimentos. **Pelotas: Editora Universitária/UFPEL**, 202p. 2010.