UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE – UFCG
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA AGROALIMENTAR – CCTA
UNIDADE ACADÊMICA DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA AMBIENTAL - UACTA
CURSO DE ENGENHARIA AMBIENTAL

ISADORA KAYLLANE TAVARES DE ALMEIDA

ESTUDO DA INFLUÊNCIA DE PARÂMETROS OPERACIONAIS NA ADSORÇÃO DE COBRE EM COLUNA DE LEITO FIXO UTILIZANDO CASCA DE ARROZ

POMBAL
2025

ISADORA KAYLLANE TAVARES DE ALMEIDA

ESTUDO DA INFLUÊNCIA DE PARÂMETROS OPERACIONAIS NA ADSORÇÃO DE COBRE EM COLUNA DE LEITO FIXO UTILIZANDO CASCA DE ARROZ

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Centro de Ciências e Tecnologia Agroalimentar da Universidade Federal de Campina Grande, como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Ambiental.

Orientadora: Profa. Dra. Thâmara Martins Ismael de Sousa

Coorientadora: Profa. Dra. Naiara Ângelo Gomes

POMBAL

2025

A447e Almeida, Isadora Kayllane Tavares de.
Estudo da influência de parâmetros operacionais na adsorção de cobre em coluna de leito fixo utilizando casca de arroz / Isadora Kayllane Tavares de Almeida – Pombal, 2025.
55 f. : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Ambiental) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Ciências e Tecnologia Agroalimentar, 2025.
"Orientação: Profa. Dra. Thâmara Martins Ismael de Sousa, Profa. Dra. Naiara Ângelo Gomes".
Referências.

1. Tratamento de efluentes. 2. Biossorção. 3. Metais pesados. 4. Coluna em leito fixo. I. Sousa, Thâmara Martins Ismael de. II. Gomes, Naiara Ângelo. III. Titulo.

CDU 628.3(043)

Ficha catalográfica elaborada pela bibliotecária Auxiliadora Costa (CRB 15/716)

ISADORA KAYLLANE TAVARES DE ALMEIDA

ESTUDO DA INFLUÊNCIA DE PARÂMETROS OPERACIONAIS NA ADSORÇÃO DE COBRE EM COLUNA DE LEITO FIXO UTILIZANDO CASCA DE ARROZ

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Centro de Ciências e Tecnologia Agroalimentar da Universidade Federal de Campina Grande, como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Ambiental.

Trabalho de conclusão de curso apresentado e aprovado em 19 de setembro de 2025

Banca examinadora

_____

Profa. Dra. Thâmara Martins Ismael de Sousa
(Orientadora- UFCG-CCTA/ *Campus* Pombal-PB)

_____

Profa. Dra. Naiara Angelo Gomes
(Coorientadora- UFCG-CCTA/ Campus Pombal-PB)

_____

Profa. Dra. Savana Barbosa Villar Gonçalves
(Examinadora Interna- UFCG-CCTA/ Campus Pombal-PB)

_____

Profa. Dra. Adriana Oliveira Araújo
(Examinadora externa- IFPB/ Campus Princesa Isabel-PB)

A Deus,
por me guiar, iluminar e conceder sabedoria
ao longo dessa trajetória.

À minha intercessora, Nossa Senhora Aparecida,
por sempre rogar por mim diante de seu Filho
e me amparar nos momentos de dificuldade.

AGRADECIMENTOS

A Deus por me proporcionar força e sabedoria para prosseguir nesta caminhada, especialmente nos momentos de tribulações.

À minha família em especial meus avós maternos dona Maria das Neves e ao senhor Joaquim Tavares que são minhas fontes inesgotáveis de amor e sempre tiveram presentes, oferecendo o suporte necessário.

Aos meus pais Marly Isabel e Manoel André, e aos meus irmãos Arthur Daniel e Isabela Tavares, e à minha tia Carla Tavares, por sempre me apoiar e incentivar na minha vida acadêmica, estando sempre dispostos a me ajudar.

As minhas amigas Mirtes Maria e Elicleide Antas pela amizade e companheirismo ao longo dessa jornada.

A todos os mestres, por partilhar seus conhecimentos e contribuir diretamente na concretização deste sonho, em especial: Adriana Oliveira Araújo, Leonardo Rodrigues dos Santos, José Cleidimário Araújo Leite, Savana Barbosa Villar Gonçalves.

À professora e orientadora Dra. Thâmara Martins Ismael de Sousa, pela paciência, amizade e lealdade na elaboração deste trabalho.

À professora e coorientadora Dra. Naiara Ângelo Gomes, pela paciência, amizade e lealdade na elaboração deste trabalho.

Aos meus colegas de turma, em especial Ana Beatriz, Débora Cristina, Maria Helena, por todo companheirismo, momentos de distração, foi essencial dividir a jornada com vocês.

À Universidade Federal de Campina Grande especialmente ao Centro de Ciências e Tecnologia Agroalimentar- *Campus* Pombal.

Por fim, a todos que direta ou indiretamente contribuíram para a realização desse grande sonho.

RESUMO

Diante do avanço da industrialização, os problemas sociais e ambientais têm se intensificado cada vez mais, incluindo a contaminação da água por metais pesados que se configura como uma grande preocupação ambiental. Nesta conjuntura, a busca por soluções e a necessidade de reduzir os níveis de contaminação por Cobre (Cu^{2+}) têm ganhado destaque, impulsionando o desenvolvimento de tecnologias de tratamento de efluentes que apresentem eficiência e sustentabilidade. O objetivo geral do presente estudo foi determinar as condições ótimas de operação de uma coluna de leito fixo, em escala de bancada, empregando as cascas de arroz como material adsorvente na remoção de Cu^{2+}. A metodologia empregada consistiu na lavagem, secagem, trituração e peneiramento das cascas de arroz, bem como na preparação das soluções sintéticas contendo Cu^{2+} nas concentrações de 8, 32 e 128 mg/L. A coluna de leito fixo foi montada com um tubo de diâmetro interno de 30 mm e 30 cm de comprimento, empregando as alturas de 5, 7,5 e 10cm de leito adsorvente em cada ensaio, com vazão de 13 mL/min. As amostras foram coletadas a cada 10min, durante o tempo total de operação de 360 minutos, e analisadas por espectrofotometria de absorção atômica. As condições operacionais com maior altura de leito (10cm) e menor concentração inicial da solução (8mg/L) proporcionaram maior eficiência de remoção, com remoções de até 100% e ponto de ruptura de até 150 minutos. Na condição de concentração de 8mg/L com altura de leito adsorvente de 10cm a coluna não saturou, evidenciando ainda mais a eficiência do sistema de tratamento. Por outro lado, na concentração de 128 mg/L ocorreu uma saturação precoce, com ruptura brusca. De modo geral, os resultados desta pesquisa reforçam o potencial das cascas de arroz como adsorvente promissor, pois teve dois ensaios com 100% de remoção do cobre, em concentrações mais baixas, além de outros com 97% e 90%. Portanto, a coluna de leito fixo tem possibilidade de operar com alta eficiência por até 360 minutos em baixas concentrações. Esses resultados evidenciaram a aplicabilidade do resíduo agrícola como adsorvente de baixo custo e baixo impacto ambiental para o desenvolvimento de sistemas de tratamento de efluentes nas indústrias.

Palavras-chave: Biossorção; Metais pesados; Efluentes; Coluna em leito fixo.

ABSTRACT

With advancing industrialization, social and environmental problems have intensified, including water contamination by heavy metals, which is a major environmental concern. In this context, the search for solutions and the need to reduce copper (Cu^{2+}) contamination levels have gained prominence, driving the development of efficient and sustainable wastewater treatment technologies. The overall objective of this study was to determine the optimal operating conditions for a bench-scale fixed-bed column using rice husks as an adsorbent material for Cu^{2+} removal. The methodology employed consisted of washing, drying, crushing, and sieving the rice husks, as well as preparing synthetic solutions containing Cu^{2+} at concentrations of 8, 32, and 128 mg/L. The fixed-bed column was assembled with a 30 mm inner diameter tube, 30 cm long, and adsorbent bed heights of 5, 7.5, and 10 cm were used in each test, with a flow rate of 13 mL/min. Samples were collected every 10 min during the total operating time of 360 min and analyzed by atomic absorption spectrophotometry. Operating conditions with a higher bed height (10 cm) and lower initial solution concentration (8 mg/L) provided higher removal efficiency, with removals of up to 100% and a breakthrough point of up to 150 min. At a concentration of 8 mg/L and an adsorbent bed height of 10 cm, the column did not saturate, further demonstrating the efficiency of the treatment system. However, at a concentration of 128 mg/L, early saturation occurred, with sudden breakthrough. Overall, the results of this research reinforce the potential of rice husks as a promising adsorbent, as two trials showed 100% copper removal at lower concentrations, as well as others with 97% and 90%. Therefore, the fixed-bed column can operate with high efficiency for up to 360 minutes at low concentrations. These results demonstrate the applicability of agricultural waste as a low-cost, low-environmental-impact adsorbent for the development of industrial wastewater treatment systems.

Keywords: Biosorption; Heavy metals; Wastewater; Fixed-bed column.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Representação da zona de transferência de massa (ZTM).....22
Figura 2- Mapa de localização de Pombal.....26
Figura 3-Fluxograma com as principais etapas metodológicas desta pesquisa…….....27
Figura 4-Casca de arroz preparada…….....28
Figura 5-Pesagem de cloreto de cobre (II) di-hidratado…….....29
Figura 6-Solução de cloreto de cobre (II) di-hidratado preparado e diluído…….....29
Figura 7-Soluções preparada para ensaio…….....29
Figura 8-Ensaio com leito adsorvente de 5cm…….....31
Figura 9-Ensaio com leito adsorvente de 7,5cm…….....32
Figura 10-Ensaio com leito adsorvente de 10cm…….....32
Figura 11-Esquema do instrumento FAAS…….....33
Figura 12-Equipamento de absorção atômica…….....34
Figura 13-Eficiência de remoção de Cu^{2+} em diferentes concentrações (5cm) 36
Figura 14- Curvas de ruptura (5cm) 40
Figura 15-Eficiência de remoção de Cu^{2+} em diferentes concentrações (7,5cm) 41
Figura 16-Curvas de ruptura (7,5cm) 43
Figura 17-Eficiência de remoção de Cu^{2+} em diferentes concentrações(10cm) 45
Figura 18-Curvas de ruptura (10cm) 46

LISTA DE TABELAS

Tabela 1-Produção global anual de arrozais em tonelada……...23

Tabela 2-Resíduos agrícolas de emissões globais……...24

Tabela 3 – Condições experimentais dos ensaios de adsorção em coluna de leito fixo...30
Tabela 4-Síntese dos resultados dos ensaios……...35

Tabela 5- Comparativo dos três ensaios……..38

LISTAS DE ABREVIATURAS

Co-Concentração inicial

Cr-Cromo

Ct-Concentração final

Cu- Cobre

DNA-Ácido desoxirribonucleico

MF-Modifying factor

pH- potencial Hidrogeniônico

PR-Ponto de Ruptura

PE-Ponto de exaustão

ZTM-Zona de transferência de massa

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 14
2. OBJETIVOS 16
2.1 Geral 16
2.2 Específicos 16
3 REVISÃO DE LITERATURA 17
3.1 Contaminação de águas por metais pesados 17
3.2 Relevância do Cobre 17
3.3 Adsorção 19
3.4 Adsorção em Leito Fixo 20
3.5 Adsorventes 22
3.5.1 Casca de arroz 22
4. MATERIAIS E MÉTODOS 26
4.1 Coleta e preparação do material adsorvente 27
4.2 Preparação de soluções sintéticas 28
4.3 Ensaios de adsorção dinâmica em escala de laboratório 30
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO 34
5.1. Ensaios (5 cm; 8 mg/L) 35
5.4 Ensaios (7,5 cm) 40
5.5 Ensaios (10 cm; 8 mg/L) 43
6 CONCLUSÃO 47
REFERÊNCIAS 48

1 INTRODUÇÃO

Diante do avanço da industrialização, os problemas sociais e ambientais têm se intensificado cada vez mais, incluindo a contaminação da água por metais pesados, que constitui uma grande preocupação ambiental (Ali *et al.* 2022). De acordo com Mollo *et al.* (2022), as atividades antropogênicas, como atividades industriais, são as principais contribuintes para o lançamento de efluentes contendo metais pesados no meio ambiente, a exemplo do cobre (Cu^{2+}).

Cabe destacar que o cobre pode ser disperso no ambiente de forma natural ou antrópica, sendo principalmente os descartes das águas residuárias das indústrias de pesticidas, galvanoplastia, fabricação de eletrodomésticos, corantes, pinturas, além de atividades de mineração que dispersam o Cu^{2+} em maiores quantidades no meio ambiente (Hyder *et. al* 2022; Zafar *et al*. 2020). O Cu^{2+} apresenta características de toxicidade e riscos à saúde, mesmo em pequenas concentrações, quando ingerido por longo prazo, podendo causar danos como insuficiência renal, interferências no sistema nervoso e cardíaco, danos cerebrais, entre outros (Alengebawy *et al.* 2021). Além de impactos no meio ambiente, como desequilíbrio nos ecossistemas aquáticos e bioacumulação.

Diante do exposto, a legislação brasileira exige um valor máximo permitido para concentrações de cobre. A Portaria Ministério da Saúde nº 888, de 4 de maio de 2021, que trata sobre os padrões de potabilidade da água para fins de consumo humano, estabelece como concentração máxima permitida de cobre dissolvido (Cu^{2+}) em sistemas de abastecimento público de 2 mg/L (Brasil, 2021). E a Resolução Conama nº 430 de 13 de maio de 2011, que dispõe sobre as condições e padrões de lançamento de efluentes, complementa e altera a Resolução n° 357, de 17 de março de 2005, do Conselho Nacional do Meio Ambiente - CONAMA, estabelece que o limite máximo para o lançamento de efluentes tratados em corpos receptores com Cu^{2+} é 1,0 mg/L (CONAMA, 2011).

Estudos como o de Liu *et al*. (2023) apontam concentração de cobre em efluente real no setor de galvanoplastia em uma faixa de 50-200mg/L. Na indústria têxtil, conforme Anagnostopoulos *et al*. (2024) analisaram amostras reais de efluente de mineração com 7,7 mg/L após o tratamento reduziu para 4,8mg/L. Enquanto, na indústria de curtumes, na pesquisa de Oladimeji *et al.* (2024) os níveis de cobre apresentaram-se na faixa de 2-10 mg/L.

Nesta conjuntura, a busca por soluções e a necessidade de reduzir os níveis de contaminação por Cu^{2+} têm ganhado destaque, impulsionando o desenvolvimento de

tecnologias de tratamento de efluentes que apresentem eficiência e sustentabilidade. Dentre essas tecnologias, a adsorção utilizando as cascas de arroz como material adsorvente apresenta-se como uma tecnologia eficiente, promissora, de baixo custo, baixo impacto ambiental e grande disponibilidade, além de proporcionar uma destinação ambientalmente correta para os resíduos agrícolas (Gautam, K. *et al.* 2023; Liu *et al*. 2023; Zafar *et al.* 2020).

De acordo com Li *et al*. (2023), a adsorção utilizando resíduos agrícolas é um processo relativamente novo que se mostrou muito promissor na remoção de contaminantes de efluentes, especialmente empregando o carvão ativado, porém os custos são elevados. Os materiais adsorventes derivados de resíduos agrícolas, por sua vez, podem ser utilizados para a remoção de íons de metais pesados em águas residuais, com custos muito baixos. As cascas de arroz possuem um elevado potencial de adsorção, por suas características físico-químicas, como alta porosidade e presença de grupos funcionais, tornando-as adequadas para a descontaminação de águas residuais (Kuo *et al.* 2023; Qiu *et al.* 2022).

Esta pesquisa buscou contribuir com a avaliação da adsorção de Cu^{2+} em uma coluna de leito fixo, empregando as cascas de arroz como adsorvente, a partir do estudo dos efeitos da variação das condições operacionais da coluna de adsorção, incluindo as concentrações das soluções e as alturas de leito adsorvente, buscando determinar as condições ótimas de operação da coluna e entendendo melhor o comportamento do processo de adsorção, visando subsidiar a sua aplicação em sistemas reais. Apesar do potencial da casca de arroz, poucos trabalhos exploram sua aplicação em colunas de leito fixo. Ademais, esta pesquisa contribui com a destinação correta de resíduos agrícolas e com o alcance dos Objetivos do Desenvolvimento Sustentável (ODS) de números 6 (Água Potável e Saneamento), 11 (Cidades e Comunidades Sustentáveis) e o 3 (Saúde e bem-estar) (ONU, 2015).

2. OBJETIVOS

2.1 Geral

- Avaliar a influência das condições operacionais (altura do leito e concentração da solução) na eficiência da adsorção de Cu^{2+} em coluna de leito fixo com casca de arroz, em escala de bancada.

2.2 Específicos

- Analisar a remoção de Cu^{2+} em diferentes concentrações das soluções e comparar com a literatura e legislação;
- Investigar a remoção de Cu^{2+} em diferentes alturas de leito adsorvente, buscando compreender o efeito da altura do leito na eficiência e tempo de ruptura;
- Identificar os pontos de ruptura e exaustão das colunas de adsorção.

3 REVISÃO DE LITERATURA

3.1 Contaminação de águas por metais pesados

Uma pequena parcela de água doce é distribuída no planeta Terra, para além disso, conforme Affzaal *et al.* (2022), as fontes de águas doces estão sendo contaminados, especialmente pelo lançamento de águas residuais contendo metais pesados, que são descartadas inadequadamente. Ademais, Saidon *et al.* (2024) destacam que a contaminação por metais pesados não é apenas causada por ações antrópicas, mas também de forma natural como as erupções vulcânicas e intemperismos que liberam esses contaminantes em solos e águas doces.

Kapoor *et al.* (2021) também enfatizaram que a decomposição de rochas contendo metais são fontes naturais, que também irão contribuir significativamente para a poluição desses ecossistemas aquáticos, porém em níveis significativamente menores, quando comparados às ações antrópicas. Diante desse viés, as águas residuais são as principais fontes de contaminação e necessitam de tratamento antes dos lançamentos nos corpos hídricos. Diversos métodos de remoção de metais têm sido difundidos na literatura como troca iônica, osmose reversa, filtração por membrana, precipitação química, fitorremediação, adsorção, entre outros (Singh *et al.* 2024; Sharm*a et al.* 2023).

De acordo com Sharma *et al*. (2023), a poluição por metais pesados é uma grande preocupação em nível mundial, apesar de uma ocorrência menor, a intensidade é expansiva e ampla quando comparado com outros tipos de poluição aquáticas. Dentre os metais pesados mais perigosos citados pelos autores que comprometem tanto ecossistema quanto a saúde humana, destacam-se: Níquel, Zinco, Chumbo, Cromo, Cobre, Mercúrio, Arsênio, Cádmio etc.

3.2 Relevância do Cobre

O cobre é um elemento químico cujo símbolo (Cu), possui número atômico 29, primeiro metal do grupo 11 da tabela periódica e massa atômica de 63,55. É um elemento comumente encontrado em minerais, como Calcopirita (CuFeS2) o Sulfeto de Cobre e Ferro, apresentando brilho metálico e intenso, a Calcocita, por exemplo, apresenta coloração cinza a preta e a Malaquita Carbonato de Cobre possui uma coloração esverdeada. Cabe destacar que a Calcocita (Cu2S) possui 79,8% de cobre, e a calcopirita ($CuFeS_2$), apesar de apresentar um teor menor (34,5%), é considerada o principal minério devido à sua abundância (Liu *et al*. 2021; Song *et al.* 2023).

No organismo humano, o cobre é essencial em pequenas concentrações, no entanto, sua presença em excesso é nociva, causando estresse oxidativo, danos ao Ácido Desoxirribonucleico (DNA) e prejuízo ao sistema imunológico (ALI, Zeeshan *et al*.2023). Além do cobre, outros metais como chumbo, mercúrio e zinco também são considerados nocivos e, por vezes, relacionam-se com o aparecimento de alguns tipos de câncer de pulmão, bexiga, fígado e rim (Panda *et al.* 2023; Miranda, 2010).

A principal forma de dispersão do cobre em corpos hídricos é atribuída às atividades industriais, como na fabricação de pesticidas, galvanoplastia, fabricação de eletrodomésticos, corantes, pinturas, além de atividades de mineração, que dispersam o Cu^{2+} exageradamente no meio ambiente. Essas atividades provocam também o desequilíbrio de ecossistemas nos corpos hídricos e bioacumulação (Hyder *et al.* 2020).

Além disso, outros estudos evidenciaram que os níveis de toxicidade do cobre têm aumentado no organismo humano devido ao acúmulo de cobre nos peixes, a exemplo da pesquisa de Cao *et al.* (2023), a qual demonstrou que a bioacumulação em moluscos estuarinos, aumentaram até quatro vezes mais o fator de modificação (*Modifying Factor MF*) passando de (MF = 1,3–2,2) para (MF = 2,3–3,9), isso remete que as partículas contendo cobre em suspensão precisam ser reduzidas, para assegurar a qualidade da água. No estudo de Li *et al.* (2023), os autores apresentam um elevado acúmulo de cobre de até 25,5 mg/kg nos tecidos dos peixes da bacia do rio Amarelo (China), desencadeando malefícios à saúde humana por meio do consumo desses peixes.

Diante de tais efeitos, a legislação brasileira exige um valor máximo permitido para concentrações de cobre. A Portaria Ministério da Saúde nº 888, de 4 de maio de 2021, que trata sobre os padrões de potabilidade da água para fins de consumo humano, estabelece como concentração máxima permitida de cobre dissolvido (Cu^{2+}) em sistemas de abastecimento público de 2 mg/L (Brasil, 2021). Enquanto a Resolução Conama nº 430 de 13 de maio de 2011, que dispõe sobre as condições e padrões de lançamento de efluentes, complementa e altera a Resolução n° 357, de 17 de março de 2005, do Conselho Nacional do Meio Ambiente - CONAMA, estabelece que o limite máximo para o lançamento de efluentes tratados em corpos receptores com Cu^{2+} é 1,0 mg/L (CONAMA, 2011). Tais exigências da legislação brasileira justificam-se para limitar a concentração de cobre em água e efluentes devido aos riscos tóxicos para a saúde humana e os impactos ambientais.

Diversos estudos têm investigado a remoção de cobre em águas residuárias por meio de técnicas de tratamento, como a adsorção. Tais autores estudaram a remoção de

Cu^{2+} por adsorção, especialmente utilizando resíduos agrícolas como material adsorvente. Por exemplo, Hossain *et al.* (2022) demonstraram a eficiência na remoção de diversos metais pesados, inclusive Cu^{2+} por meio da adsorção em coluna de leito fixo, os autores constataram uma eficiência superior a 90%. Em outro estudo, Silva *et al.* (2019) pontuaram que quanto maior a quantidade de adsorvente, maior a eficiência da adsorção, atingindo uma eficiência superior a 70% na remoção de cobre.

3.3 Adsorção

A contaminação química em corpos hídricos por metais tóxicos, como o cobre, contribuiu para o desenvolvimento de tecnologias, com o objetivo de remover esses poluentes, diante dessa perspectiva, a adsorção tem se mostrado um dos métodos mais eficientes. Esse processo concentra-se na transferência de massa, para um material sólido. É um processo que inclui interações físicas e/ou químicas. Na adsorção física, envolvem-se as interações fracas como as forças de Van de Waals, enquanto a adsorção química apresenta ligações químicas mais fortes. O material no qual as substâncias ou poluentes são aderidos à superfície chama-se adsorvato e a superfície sólida em que o adsorvato se adere chama-se adsorvente (Nascimento *et al.* 2020; Raji *et al.* 2023; Zeng *et al.* 2024).

O processo de adsorção dependente de diversos fatores, como propriedades do adsorvente e do adsorvato, características operacionais, além de área superficial, porosidade, temperatura, pH, entre outros (Wang *et al.* 2022). Na adsorção física também classificado de fisissorção, as interações, além de fracas, são reversíveis. Ligações de hidrogênio também podem ser observadas e ocorrem a baixas temperaturas (Murphy *et al.* 2023).

Por outro lado, a adsorção química ou quimissorção, envolve ligações químicas mais fortes, uma vez que há troca ou partilha de elétrons entre adsorvato e adsorvente. Esse tipo de adsorção ocorre em temperaturas mais elevadas e são, frequentemente, irreversíveis (Prado *et al.* 2021).

Neste processo, o fluido, geralmente denominado adsorvato, se adere à superfície de uma substância sólida, chamada de adsorvente, ou seja, caracterizando transferência de massa líquida para a fase sólida. Especificamente, a adsorção de metais em águas residuárias consiste na aderência desses contaminantes ao adsorvente, portanto, o contato entre os efluentes e adsorventes ocorrem reações tanto físicas quanto químicas.

Duas formas bastante difundidas na literatura para o estudo de adsorção correspondem aos estudos em batelada (batch) e os ensaios em leito fixo (fixed-bed). Os ensaios em bateladas são principalmente para determinar estudos em pequena escala, são

caracterizados por sistemas fechados, permitindo determinar a capacidade de adsorção, concentração do adsorvato e temperatura (Nascimento *et al.*2020). Enquanto isso, os ensaios em coluna de leito fixo envolvem uma passagem contínua do adsorvato sendo transferido para uma coluna contendo o material adsorvente, esse tipo de ensaio é essencial para simular um sistema mais próximo da aplicação em escala real e maior da indústria. Possibilitando avaliar a eficiência ao longo do tempo e a capacidade de ruptura. Ambos os métodos são fundamentais para avaliar o desempenho dos adsorventes, em diversas condições, entretanto, os testes em leito fixo destacam-se pela possibilidade de aplicação em escala industrial (Marrane *et al. 2023*; Ruthen 1984).

3.4 Adsorção em Leito Fixo

Em geral, o uso de colunas de leito fixo em processos de adsorção tem se consolidado como alternativa eficiente, destacando-se devido ao baixo custo, aplicabilidade comparado a testes em laboratório, para aplicação em larga escala. Diversos estudos na literatura demonstram a eficiência desse sistema para o tratamento de águas residuais em grande volume. Portanto, colunas de leito fixo são usualmente utilizadas para adsorção (Nascimento *et al.* 2020). Na prática, o sistema de leito fixo é constituído por uma coluna, na qual o adsorvente é inserido e a solução contendo os contaminantes e ou poluentes (adsorvatos) é bombeada, passando pela coluna de leito fixo. O fluxo do líquido pode ser tanto ascendente quanto descendente (Topare *et al.*2021).

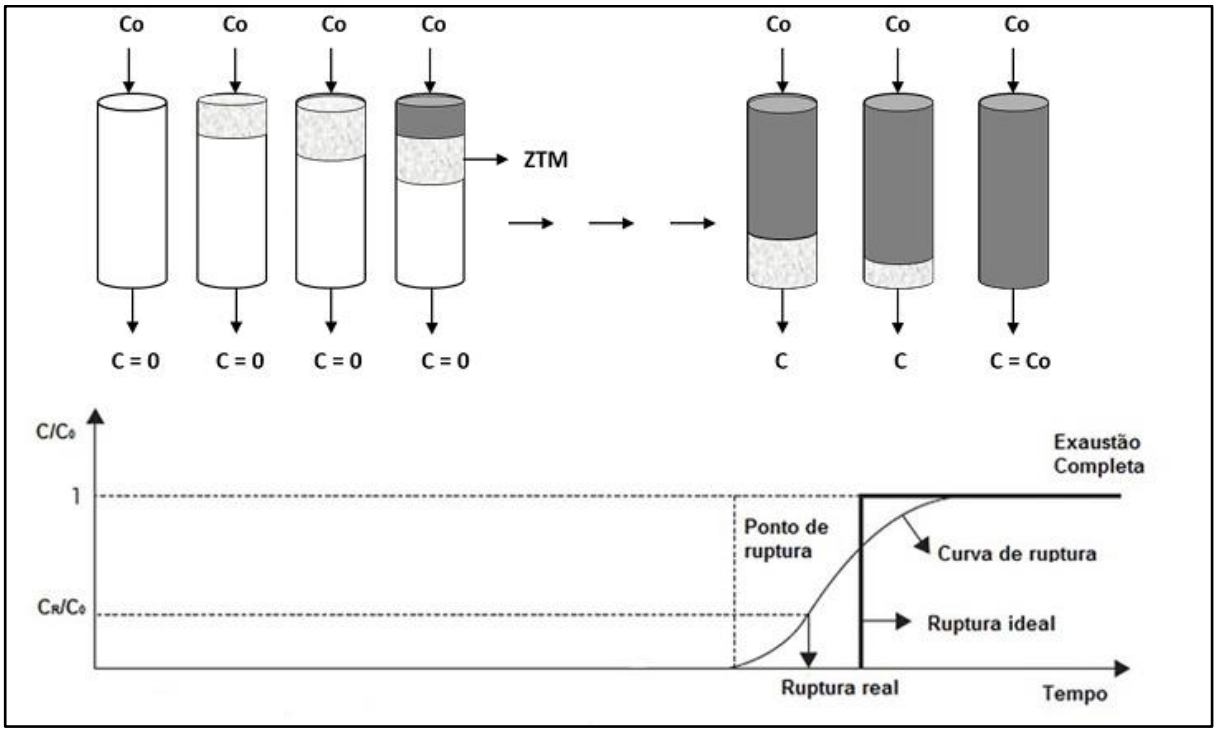
Além disso, no estudo de Kumari *et al.* (2021) os autores enfatizam que uma operação em coluna de leito fixo permite tratar grande quantidade de águas residuais com uma quantidade definida de adsorvente. Devido à cinética de adsorção, o processo ocorre de forma rápida no início, resultando em uma quantidade mínima ou até mesmo nula de adsorvato no efluente final. Em contrapartida, após um período observa-se que a solução de adsorvato vai aumentando no final da coluna. Para analisar melhor essa operação e os resultados das concentrações dos efluentes realiza-se o gráfico conhecido como curva de ruptura, que é a concentração em função do tempo, geralmente variando de concentração inicial igual a zero, até a concentração no início indo de zero indo à uma concentração igual ao que entrou na coluna. Nesta situação ocorre a saturação do adsorvente (Memlak, 2021; Renu, 2021).

Estudos recentes indicam que não há limites definidos entre camadas saturadas e camadas livres do adsorvato. Com isso, o equilíbrio ocorre numa zona mais ou menos larga do leito adsorvente, a qual é reconhecida como zona de transferência de massa

(ZTM). Assim, a ZTM é formada na parte superior do leito adsorvente. Neste ponto, a concentração de adsorvato (Ct) é zero e, portanto, a relação entre a concentração efluente e a concentração inicial (Ct/ Co) é zero (Rajandran *et al.* 2025; Mitra, 2020; Patel, 2019).

Na Figura 1 são ilustradas as diferentes fases da saturação na coluna de leito fixo, bem como a curva de ruptura. Podemos analisar que, no início do processo a coluna se destaca pela eficiência na remoção do adsorvato na saída do leito, sendo representado por concentração inicial (Co). Ao longo do tempo, gradativamente essa eficiência vai decaindo, e se observa a ZTM, que consiste na zona intermediária da camada livre para a saturada (BLAGOJEVIC, 2019). Além disso, o ponto de ruptura no gráfico indica o momento que se detecta concentração de adsorvato. E ao fim, quando C=Co, ocorre a completa exaustão no leito, indicando a completa perda de capacidade de adsorver os adsorvatos. Essa curva é essencial para avaliar o desempenho de sistemas de adsorção, pois fornece informações referente a capacidade da adsorção, assim como eficiência (Rajandran *et al.* 2025).

Figura 1- Representação da zona de transferência de massa (ZTM)



Fonte: Adaptado de Yakout et al. (2019).

3.5 Adsorventes

Com a consolidação da adsorção como uma tecnologia de tratamento promissora para o tratamento de águas residuais, diversos estudos vêm sendo realizados com objetivo de avaliar a eficiência de diferentes materiais adsorventes que possuam características de baixo custo, alta eficiência e sustentabilidade (Gargiulo *et al.* 2024).

Segundo Yue *et al.* (2021) os materiais adsorventes são substâncias sólidas e possuem propriedades como alta porosidade. Os adsorventes mais difundidos são: o carvão ativado, a zeólita (material cristalino inorgânico), alumina ativada, sílica gel e argilas. Dentre os materiais, o carvão ativado é um adsorvente amplamente utilizado, no entanto, o seu alto custo é um fator limitante para sua aplicação em larga escala (Raji *et al.* 2023).

Topare *et al.* (2020) destacam a importância de criar adsorventes de baixo custo para melhorar a qualidade da água e efluentes. Nesse contexto, os resíduos agrícolas têm se mostrado promissores por sua alta eficiência na remoção de metais pesados, e por proporcionarem uma destinação adequada a materiais que, por vezes, são descartados de maneira inadequada no meio ambiente (Harshala *et al.* 2022). A remoção de metais pesados com adsorventes de resíduos agrícolas tem sido amplamente empregada, como cascas de arroz, cascas de nozes, restos de chá e resíduos vegetais. Dessa maneira, são selecionados devido a sua eficiência, viabilidade econômica e a reutilização de um recurso disponível (Habib *et al.* 2023).

3.5.1 Casca de arroz

A casca do arroz é uma biomassa lignocelulósica, um tipo de biomassa vegetal com alta heterogeneidade e, por consequente, com grande complexidade química, o que a torna matéria-prima para vários produtos, como energia, alimentos, produtos químicos e materiais (Embrapa, 2020).

A casca de arroz é um material com alto teor de lignocelulose, normalmente, composta por cerca de 10 a 25% de lignina, 20 a 30% de hemicelulose e 40 a 50% de celulose (Malik e*t al. 2*024). Ainda conforme o autor, para cada 100 kg de grãos de arroz são produzidos 20 kg de resíduos de casca de arroz, entretanto, diversas pesquisas acerca desse resíduo vêm sendo difundidas e o resíduo passou a ser visto como recurso importantíssimo, em vez de resíduo. Tendo em vista, que esse recurso abundante vem sendo utilizado para geração de biogás, para melhorar as propriedades do concreto e até mesmo para o tratamento de água com adsorção.

Gupta *et al.* (2025) destaca que na Índia cerca de 750 milhões de toneladas métricas de resíduos agrícolas são produzidos, por vezes, o descarte desse material constitui-se um desafio, levando a impactos ambientais consideráveis. Por isso, é imprescindível a utilização desse material para outros fins, com o objetivo de minimizar esses impactos e aplicações de baixo custo. A Organização das Nações Unidas para Agricultura e Alimentação (FAO) mostra os dados que demostram o crescimento da produção global, conforme a Tabela 1. A produção de arroz na África e na Ásia aumentou significativamente entre 2010 e 2022 (Morimoto *et al.* 2023).

Tabela 1- Produção global anual de arrozais em toneladas

Quantidade de produção x[10^6 ton]	**Ano**	**Ano**
Região	**2010**	**2020**
Mundo	694,5	756,7
África	26.0	37,9
Américas	36,5	38,1
Ásia	627,5	676,6
Europa	4.3	4.1
Oceânia	0,2	0,1

Fonte: Adaptado FAO (2020)

A intensa produção agrícola em escala global resulta numa enorme produção de biomassa residual, provenientes de seu cultivo ou dos processos de beneficiamento. Essa produção implica em sérios impactos ambientais, principalmente relacionados à emissão de gases de efeito estufa. A Tabela 2 apresenta os resíduos e as emissões gasosas globais provenientes de certas culturas agrícolas, destacando os resíduos gerados pela aplicação de nutrientes (FAO, 2021; Korres *et al*. 2023; Embrapa, 2020).

Tabela 2- Resíduos agrícolas e emissões globais

Classe	Cultura	Unidade	Valor
Resíduos de nutrientes	Arrozal	Kg	9.155.085.230,1
Emissões (N_2O)	Arrozal	Gg	176,2
Emissões (CO_2eq)	Arrozal	Gg	54.631

Fonte: Adaptado FAO (2020)

No caso do arroz, com o aumento da produtividade, ocorre também o aumento de resíduos advindos do beneficiamento do produto. Problema este que se intensifica devido ao local para descarte do resíduo, pois a casca de arroz não se decompõe com facilidade em curto prazo (MAYER *et al.* 2007; Lewin *et al.* 2022). O uso do conceito de economia circular para resíduos de biomassa pode envolver a criação de novas cadeias de valor a partir do aproveitamento de resíduos. Devido às suas propriedades químicas e físicas, como o alto teor de sílica amorfa e grupos hidroxilas, as cascas de arroz podem ser empregadas como biossorvente em processos adsortivos (Embrapa, 2020; Lv *et al.* 2023).

Diversos estudos vêm sendo conduzidos com o objetivo de avaliar a eficiência da casca de arroz como material adsorvente na remoção de metais pesados, como o cobre. Por exemplo, Gamboa *et al.* (2022) teve como objetivo avaliar o emprego da casca de arroz parboilizado como um adsorvente para a remoção de cromo hexavalente em soluções aquosas sintéticas. Os resultados indicaram que tanto a casca de arroz sem pré-tratamento ácido, quanto a submetida a pré-tratamento ácido apresentaram bom desempenho. Dos dois adsorventes estudados, o que demonstrou maior potencialidade de remoção foi a casca de arroz submetida ao pré-tratamento ácido (CAH+), alcançando 100% de remoção em soluções contendo 5 mg/L de Cr (VI) 5 mg/L de Cr (V), em 1 h de interação, com 5 g/L de adsorvente e em pH 1,0 .

De forma semelhante, Naik *et al.* (2023) analisaram a eficiência da casca de arroz e da casca de laranja na adsorção de Cobre e o Níquel. O estudo demonstrou que a eficiência de remoção aumentou proporcionalmente à dose de adsorvente. Com isso, os resultados demonstram-se excelentes, tendo em vista, que a combinação dos dois adsorventes obteve remoção de 99,1% de Cobre e 99,36% de níquel evidenciando o

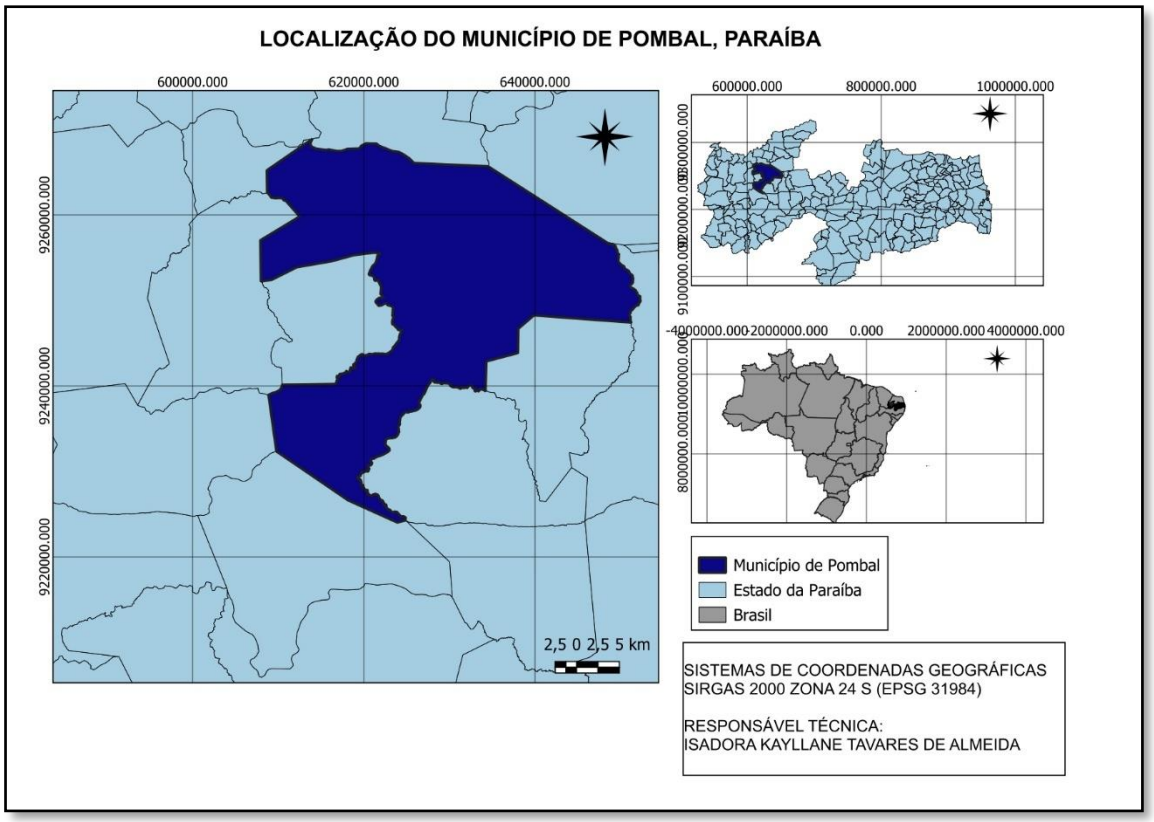
potencial desses resíduos agrícolas como alternativas sustentáveis para o tratamento de efluentes.

Em outro estudo, Lira (2023), teve como objetivo avaliar a eficácia da sílica derivada da casca de arroz, previamente tratada com ácido, na remoção de dois micropoluentes em solução aquosa, o ácido 2,4 diclorofenoxiacético e o 2-Nitrofenol. A capacidade máxima de adsorção medida foi de 3,01 mg/g para o 2-nitrofenol e 6,69 mg/g para o 2,4-D. Com base nos resultados obtidos, concluiu-se que é viável remover esses micropoluentes de meios aquosos utilizando sílica derivada da casca de arroz após tratamento com ácido sulfúrico como adsorvente. Apesar de resultados promissores, poucos trabalhos avaliaram o desempenho da casca de arroz em coluna de leito fixo na remoção de cobre.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

Esta pesquisa foi conduzida no município de Pombal, no estado da Paraíba, inserido no semiárido nordestino. Possui uma população estimada em cerca 32.000 habitantes distribuídas em uma área territorial de 889,5 km². Caracteriza-se por elevadas temperaturas, com média de 27º e precipitações irregulares. Além disso, a hidrografia do local possui o Rio Piancó-Piranhas-Açu. Especificamente a pesquisa foi no Laboratório de Águas da Universidade Federal de Campina Grande, *Campus* Pombal está localizado próximo a BR-427, entrada da cidade, aproximadamente 3km do centro urbano do município (IBGE, 2022).

Figura 2- Localização do município de Pombal-PB

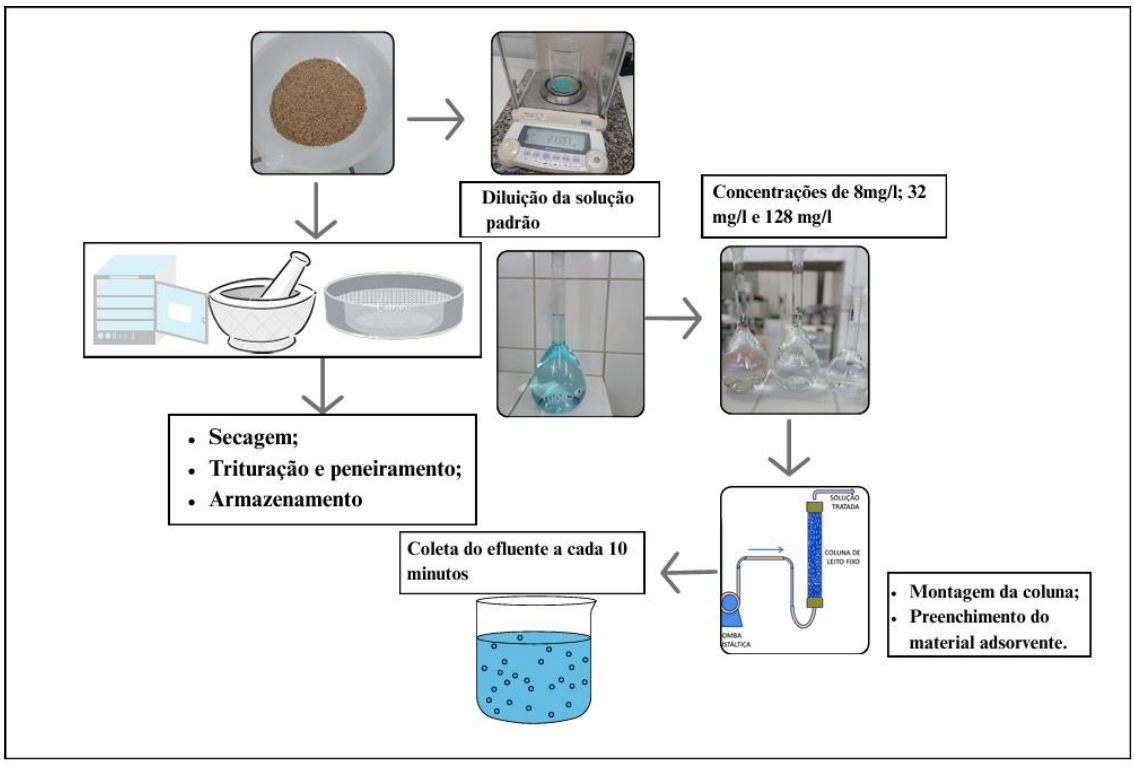


Fonte: Autora (2025)

As etapas metodológicas empregadas para realização deste trabalho fundamentam-se em 04 etapas principais, descritas no fluxograma (Figura 3), que consistiram na preparação do material adsorvente, através da lavagem, trituração e peneiramento, posteriormente secagem e armazenamento. Em seguida, foi realizada a diluição da solução padrão de cobre para as diferentes concentrações de 8 mg/L; 32 mg/L e 128 mg/L, a serem empregadas na coluna de leito fixo, assim procedendo-se os nove

ensaios que foram realizados, contemplando as variações das concentrações das soluções e as alturas de leito adsorvente em cada ensaio. E por fim, a coleta do efluente final de 10 em 10 minutos durante 360 minutos.

Figura 3- Fluxograma com as principais etapas metodológicas da pesquisa



Fonte: Autora (2025)

4.1 Coleta e preparação do material adsorvente

O adsorvente empregado consistiu nas cascas de arroz (*Oryza Sativa L.*), coletadas em uma fábrica, localizada na cidade de Patos, Paraíba. Posteriormente, o material foi encaminhado ao Laboratório de Análise de Água, da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), *Campus* Pombal-PB, para realizar todo o processo de preparação do material.

A princípio, as cascas de arroz, na forma *in natura*, foram lavadas com auxílio de uma peneira para suporte e água destilada em abundância, até remover todas as impurezas visíveis. Consecutivamente, foram separadas em bandejas e secas em estufa por 24 h numa temperatura de 100ºC (Yanaka *et al,* 2021; Sarkale; Jadhav, 2021). O material seco foi triturado em um moinho de facas do tipo Willye (modelo STAR FT – 50) e peneirado em peneiras ABNT n° 35 e 20, visando obter partículas de cascas de arroz com diâmetros médios entre 0,5 e 0,84 mm (Hummadi; Luo; He, 2022; Fernández-Andrade *et al.* 2022), no Laboratório de Solos, UFCG, *Campus* Pombal-PB. Após a preparação, as cascas de

arroz foram armazenadas em recipientes plásticos herméticos e posteriormente empregadas nos ensaios de adsorção dinâmica na coluna de leito fixo em escala de laboratório. Na Figura 3 podemos observar as cascas de arroz devidamente prontas, para utilização nos ensaios.

Figura 4- Cascas de arroz preparada

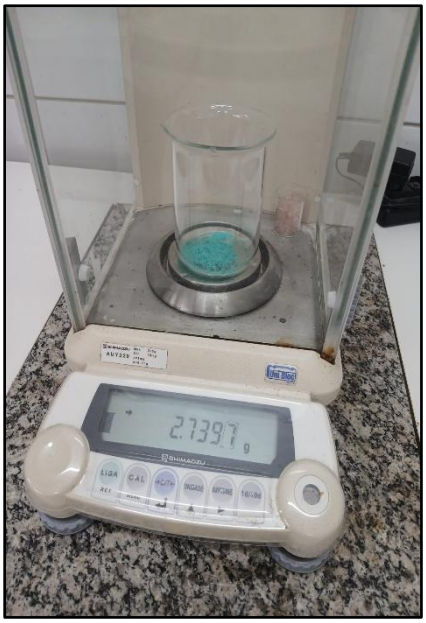
Fonte: Autora (2025)

4.2 Preparação de soluções sintéticas

Para a elaboração da solução padrão contendo o íon metálico cobre (Cu^{2+}), foi utilizado o reagente químico cloreto de cobre (II) di-hidratado (ICO) P.A (CuCl22H2O), marca Êxodo Científica. Em caráter inicial, foi preparada uma solução padrão contendo 1 g de Cu^{2+} em balão volumétrico de 1 L, a partir da dissolução de 2,74 g do reagente químico em água deionizada. Na Figura 5 é a realização da pesagem do cloreto de cobre (II) di-hidratado, posteriormente a Figura 6 é a solução diluída e totalmente preparada. Dessa solução, foram pipetados volumes pré-determinados por meio de cálculos estequiométricos, que foram transferidos e diluídos em água deionizada, em balões volumétricos de 2 L e de 1 L, visando a obtenção de soluções com concentrações de 8 mg/L, 32 mg/L e 128 mg/L de Cu^{2+} como observado na Figura 7, a serem empregadas nos ensaios de adsorção dinâmica (coluna de leito fixo em escala de bancada) realizados no Laboratório de Análise de Água, UFCG, *Campus* Pombal-PB.

Ademais, foram realizadas medições dos valores de pH em todas as soluções preparadas, e realizada correção em caso de pH superior a 6.

Figura 5 - Pesagem de cloreto de cobre (II) di-hidratado



Fonte: Autora (2025)

Figura 6 e 7 - Solução de cloreto de cobre (II) di-hidratado preparada e diluída

Fonte: Autora (2025)

4.3 Ensaios de adsorção dinâmica em escala de laboratório

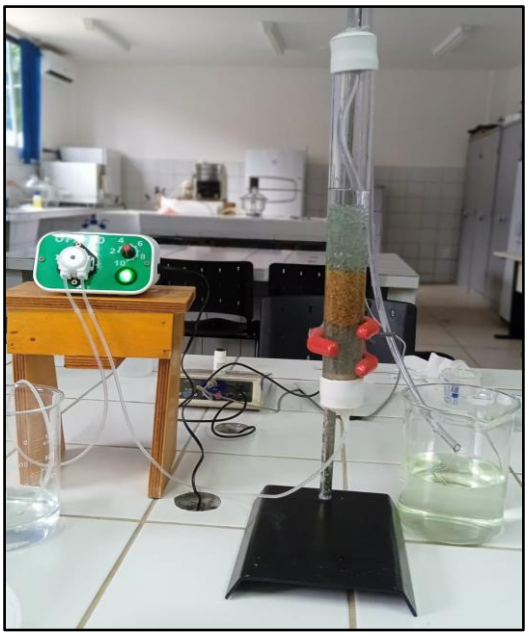
Procederam-se nove ensaios em uma coluna de adsorção em leito fixo em escala de bancada, montada com tubo de vidro borossilicato de diâmetro interno de 30 mm, diâmetro externo de 34 mm e 30 cm de comprimento (Sousa *et al.* 2024; Iheanacho *et al.* 2021; Nwabanne *et al.* 2022). Nessa coluna, foi adicionado o leito adsorvente com alturas de 5 cm e 7,5 cm e 10 cm (Nwabanne *et al.*2022; Yahya *et al.* 2020), além de uma camada de 5 cm de esferas de vidro (Saha *et al.*, 2021) anterior e posterior ao leito adsorvente para evitar flutuações e minimizar a perda de material adsorvente.

Tabela 3 – Condições experimentais dos ensaios de adsorção em coluna de leito fixo

Ensaio	Concentração inicial da solução (mg/L)	Altura do leito adsorvente (cm)	Massa aproximada de adsorvente (g)	Vazão (mL/min)	Tempo total (min)	Nº de repetições
1	8	5	9 g	13	360	3
2	8	7,5	14 g	13	360	3
3	8	10	18g	13	360	3
4	32	5	9g	13	360	3
5	32	7,5	14 g	13	360	3
6	32	10	18g	13	360	3
7	128	5	9g	13	360	3
8	128	7,5	14 g	13	360	3
9	128	10	18g	13	360	3

A operação da coluna foi conduzida em fluxo ascendente e com vazão de 13 mL/min (Nwabanne *et al.* 2022; Iheanacho *et al.* 2021). Utilizou-se uma bomba peristáltica dosadora (Marca modelo OFA 20) para ajuste e regularização da vazão. A coluna foi fixada com auxílio de um suporte metálico no Laboratório de Análise de Água, UFCG, *Campus* Pombal-PB. Nas Figuras 8, 9 e 10 observa-se toda a estrutura do experimento preparada para iniciar os ensaios, com alturas 5cm; 7,5cm e 10cm.

Figura 8- Ensaio de adsorção com leito adsorvente de 5 cm



Fonte: Autora (2025)

Figura 9- Ensaio de adsorção com leito adsorvente de 7,5 cm

Fonte: Autora (2025)

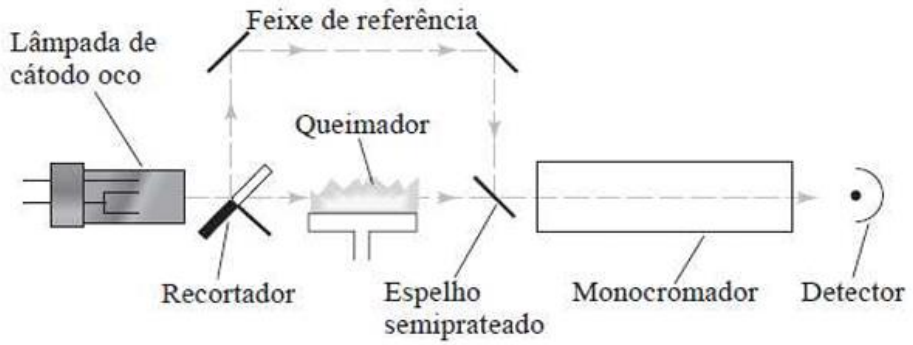
Figura 10- Ensaio de adsorção com leito adsorvente de 10 cm

Fonte: Autora (2025)

Nos ensaios utilizaram-se as soluções sintéticas nas concentrações de 8 mg/L, 32 mg/L e 128 mg/L. A escolha desses valores justifica-se por utilizar a representatividade em níveis médio, intermediário e alto, para avaliar o comportamento da eficiência da coluna de leito fixo, nesses cenários distintos de contaminação. A concentração baixa de 8 mg/L acima do limite de potabilidade, pode ser vista como cenário de contaminação moderado, enquanto os ensaios de 32 mg/L e 128 mg/L representam situações mais críticas, semelhantes aos cenários de descargas de efluentes industriais, como mineração e galvanoplastia, trabalhos semelhantes de adsorção também utilizaram concentrações semelhantes (Sousa *et al.* 2024; Khan *et al.* 2020). Os ensaios ocorreram em triplicata para cada solução e altura de leito empregada. O tempo total de cada ensaio foi de 360 min e amostras foram coletadas a cada 10 min (Hummadi; Luo; He, 2022). O pH de cada amostra coletada foi aferido, e, em seguida, as amostras foram preservadas com ácido nítrico (HNO_3) para obter pH < 2, e analisadas por espectrometria de absorção atômica (Equipamento: Espectrômetro de Absorção Atômica por Chama – FAAS, marca Agilent, modelo 200, série AA), como observado na Figura 12, na Central Analítica da Universidade Federal do Cariri-UFCA. Entre as técnicas utilizadas para determinação de metais em amostras, a espectrometria de absorção atômica em chama (FAAS) destaca-se

pela simplicidade, custo relativamente baixo e alta eficiência na determinação (Sousa, 2012). A Figura 10 representa o esquema do instrumento FAAS.

Figura 11-Esquema do instrumento FAAS



Fonte: Sousa (2012)

Os pontos de ruptura (PR) e exaustão (PE) das colunas de adsorção foram obtidos a partir das curvas de ruptura. Nesta pesquisa, o ponto de ruptura foi definido quando as concentrações residuais de Cu^{2+} atingiram 10% da concentração da solução e o ponto de exaustão quando as concentrações residuais atingiram 90% da concentração de Cu^{2+} afluente à coluna (Banza; Rutto, 2022; Bencheqroun *et al.* 2023). Essas curvas de ruptura foram realizadas através de cálculos realizados com dados obtidos nos ensaios, foi possível desenvolver gráficos no Microsoft Excel.

Figura 12- Equipamento de absorção atômica

Fonte: Autora (2025)

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A síntese dos resultados obtidos com os experimentos em diferentes condições de altura de leito e concentração de soluções contendo Cu^{2+}, em termos de eficiência, estão dispostos na Tabela 3.

Tabela 4 – Síntese dos resultados dos ensaios de adsorção

Ensaio	Altura de leito (cm)	Concentração da solução (mg/L)	PR (min)	PE (min)	Máxima eficiência (%)
1	**5,0**	**8,0**	**30**	**330**	**97**
2	5,0	32,0	–	60	73
3	5,0	128,0	–	15	10
4	7,5	8,0	15	–	89
5	7,5	32,0	–	60	76
6	7,5	128,0	–	30	32
7	**10,0**	**8,0**	**110**	**–**	**100**
8	**10,0**	**32,0**	**95**	**–**	**100**
9	10,0	128,0	–	30	83

Nota: – se referem aos pontos não identificados durante o ensaio.

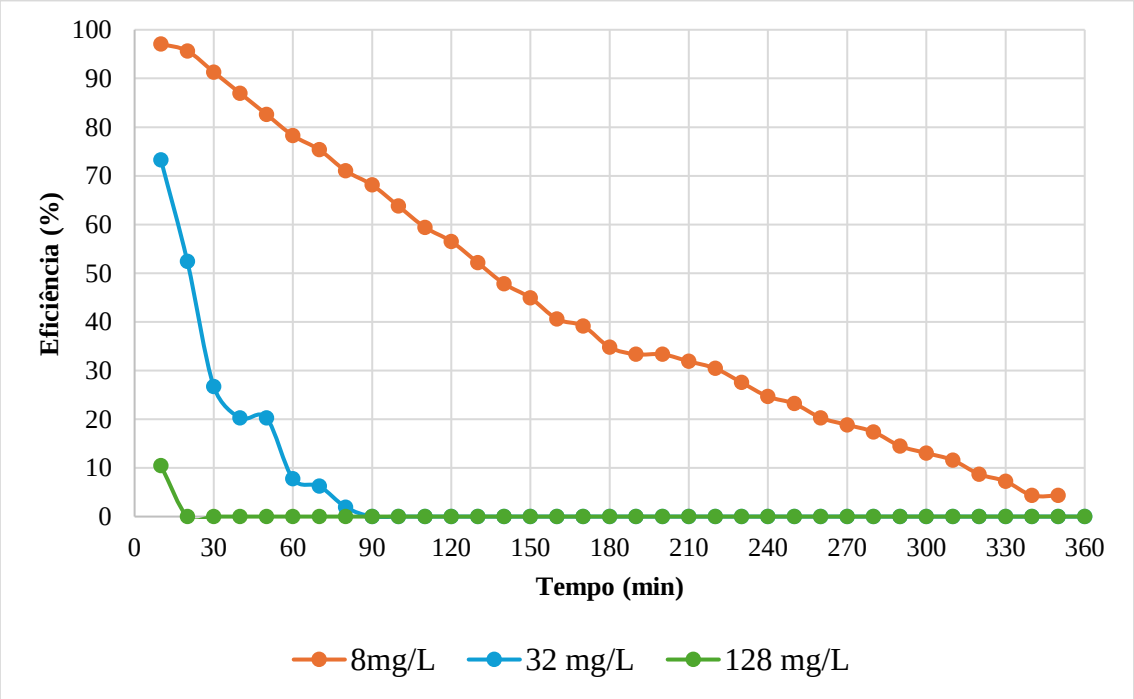
Fonte: Autora (2025)

De modo geral, a condição de altura de leito de 10 cm apresentou as maiores eficiências, com esta altura de leito adsorvente também não foi identificado o ponto de exaustão que corresponde a 90% da concentração inicial, nas concentrações de 8 mg/L e 32 mg/L. Ademais, quando empregada soluções de baixa concentração inicial (8 mg/L), mesmo adotando pequenas alturas de leito adsorvente, como a de 5cm, foram observadas altas eficiências, com destaque de 97%, e 89% no leito adsorvente de 7,5cm. Conforme Marrane *et al.* (2023) descrevem, as maiores alturas de leito adsorvente resultam em maior disponibilidade de sítios ativos para adsorção. Em contrapartida, as menores eficiências foram observadas em altas concentrações de Cu^{2+} (128 mg/L) com eficiência de 10%; 32% e 83% nas alturas de 5cm, 7,5 cm e 10 cm de leito adsorvente, respectivamente.

5.1. Ensaios (5 cm; 8 mg/L)

Na Figura 13 é apresentada a eficiência de remoção de Cu^{2+} em uma coluna de adsorção em leito fixo com leito adsorvente de cascas de arroz de 5 cm de altura e nas concentrações de 8 mg/L, 32 mg/L e 128 mg/L.

Figura 13- Eficiência de remoção de Cu^{2+} em diferentes concentrações em leito adsorvente de 5cm



Fonte: Autora (2025)

Para a condição operacional de 8mg/L, ao longo dos 360 minutos de operação, a eficiência variou de 97% a 4%, mostrando um declínio praticamente linear ao longo do tempo**.** Ao utilizar a concentração de 32 mg/L foi observado a máxima eficiência de remoção de Cu^{2+} de 73%, registrada aos 10 minutos de operação. Após esse período, a eficiência apresentou uma queda acentuada, atingindo valores nulos, ou seja, o PE aos 90 minutos, mantendo-se assim até o final do experimento.

Na concentração inicial de 128 mg/L observa-se que a máxima eficiência registrada foi de apenas 10% aos 10 minutos de operação, sendo está a menor eficiência entre todos os ensaios realizados nesta pesquisa. Este resultado pode ser atribuído à elevada concentração da solução, conforme Limsuwan *et al.* (2024), que realizaram uma pesquisa semelhante com concentrações iniciais de 100 mg/L e 150 mg/L, os autores enfatizam que menores concentrações e maiores leitos adsorventes levaram uma maior eficiência de remoção de metais.

Logo em seguida, ocorreu um acentuado declínio na eficiência, levando ao PE do sistema aos 20 minutos, condição que se manteve até o final dos 360 minutos de operação, uma condição relatada em Nascimento *et al*. (2020), os baixos tempos de contato com concentrações altas de adsorvato tendem a favorecer a ocupação rápida dos sítios ativos no material adsorvente.

Os resultados encontrados corroboram com os estudos de Wang *et al.* (2020), os autores observaram que com o aumento da concentração inicial, a taxa de saturação dos sítios ativos acontece em pouco tempo de operação, reduzindo a eficiência da coluna. Em outro estudo semelhante, Kumari *et al.* (2021) estudaram a remoção de metais também em coluna de leito fixo, analisaram que concentrações elevadas levaram a um aumento de carga no adsorvente, resultando em rupturas mais rápidas.

Na Tabela 4 pode-se fazer o comparativo dos três ensaios realizados observa-se, portanto, que o aumento da concentração inicial reduz significativamente a máxima eficiência e o tempo de operação útil da coluna de adsorção, como observado ao empregar o leito adsorvente de 5 cm com concentração inicial de 128 mg/L (Olatunji *et al.* 2024; Rinantin *et al.* 2020).

Tabela 5 - Comparativo entre os ensaios com leito adsorvente de 5cm

Ensaio	Altura da coluna	Concentração (mg/L)	Máxima eficiência (%)	Tempo de saturação
1	5 cm	8	97	330
2	5 cm	32	73	90
3	5 cm	128	10	20

Fonte: Autora (2025)

Com isso, podemos analisar que dentre os ensaios destaca-se o ensaio de concentração 8mg/L, demonstrando alta eficiência no início e longo tempo de operação antes da completa exaustão que ocorreu ao final do tempo de operação total. O ensaio de 32 mg/L também se destacou com uma eficiência alta, entretanto, o PE ocorreu em poucos minutos. Já o ensaio caracterizado por uma elevada concentração de Cu^{2+} (128mg/L) teve um desempenho inferior em relação aos outros, sendo que, neste caso, a adsorção foi praticamente nula após os primeiros 30 minutos.

A comparação com estudos semelhantes da literatura reforça a viabilidade de utilizar casca de arroz como material adsorvente, sendo a casca de arroz sem tratamento, ou quimicamente tratado. No estudo de Bar *et al.* (2021) utilizou-se a casca de arroz como material adsorvente com alturas de 4 e 10 cm e vazão de 10 e 40 mL/min, neste estudo observou-se que o melhor desempenho foi sobre as condições de uma concentração inicial de 30 mg/L, altura de leito 4 cm e vazão de 10 mL/min. Ou seja, apesar de um leito adsorvente curto, foi possível obter uma alta capacidade, tendo em vista que a vazão foi baixa, realizando o comparativo com esse estudo podemos observar que os desempenhos melhores foram com concentrações mais baixas de Cu^{2+}, altura de leito de 5cm, entretanto, a vazão fixa foi maior de 13 mL/min, podemos inferir que em condições de vazão menor, os resultados poderiam ser mais satisfatórios. Ademais, o estudo evidenciou que a casca de arroz, mesmo sem modificação química demonstra ótima capacidade de adsorção.

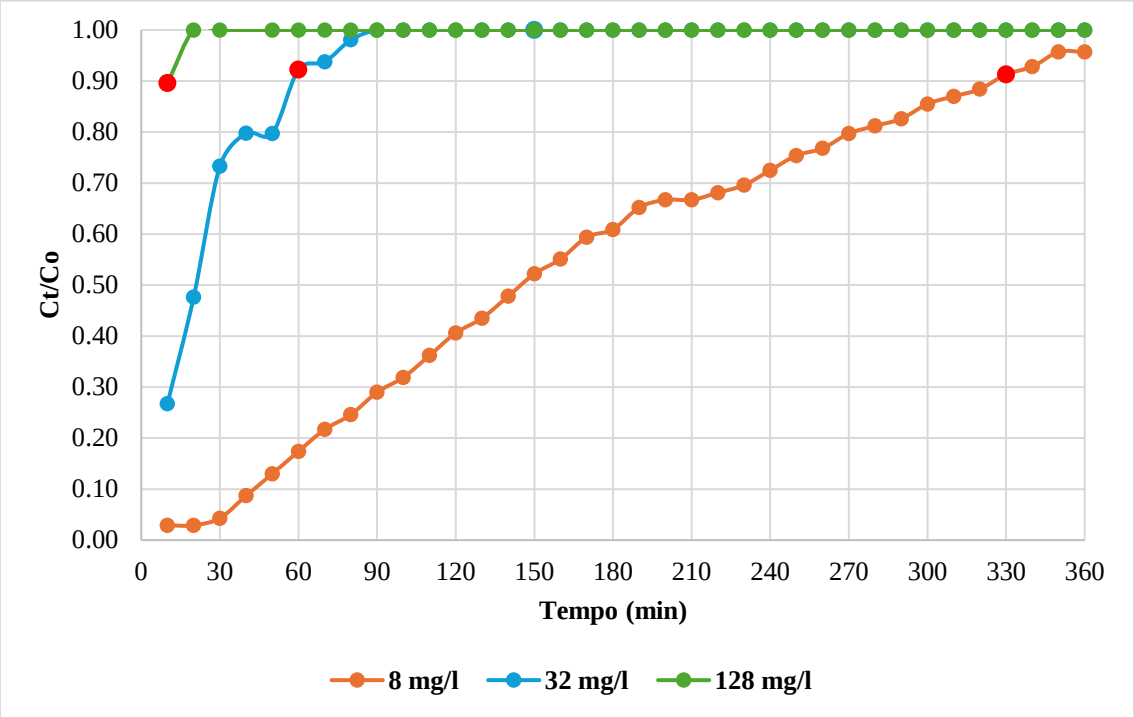
Conforme a pesquisa de Naik *et al.* (2023) os autores também utilizaram casca de arroz como material adsorvente e avaliaram que se obteve uma maior remoção com uma maior quantidade de adsorvente, além disso, o tempo de contato para a saturação total

com a combinação de casca de arroz e casca de laranja foi de 2 horas, evidenciando ainda mais a eficiência de resíduos agrícolas para a remoção de metais pesados como o Cobre. Neste estudo, com a combinação desses dois materiais demonstrou-se que 99,1% de remoção de cobre e 99,36% de remoção de níquel.

Resultados análogos ao presente estudo foram obtidos por Hawal *et al.* (2021), que investigaram a remoção de Chumbo (Pb^{2+}) utilizando casca de arroz em colunas de leito fixo. Apesar de íons distintos, os dois metais possuem cargas positivas e afinidade para reagir com os grupos funcionais da casca de arroz. Assim como observado nos ensaios com Cu^{2+}, o estudo relatou que a remoção de Pb^{2+} foi favorecida por menores concentrações iniciais e por colunas de maior altura. Obteve-se uma maior remoção de chumbo em concentrações iniciais menores e uma altura de leito de 50 cm, a maior remoção nessas condições operacionais foi de 81%. Enquanto, no presente estudo foram alcançadas eficiências superiores a 95% em alturas de leito de apenas 5 cm e concentração inicial de cobre de 8mg/L. Os autores pontuaram que a casca de arroz pode ser utilizada para remover chumbo, destacando-se pela grande disponibilidade, viabilidade, baixo custo e propriedade de adsorção perfeita.

Na Figura 14 são apresentadas as curvas de ruptura obtida nos ensaios realizados na coluna de leito fixo, cuja altura fixa foi de 5 cm, com concentrações iniciais de Cu^{2+} variadas, com soluções de 8 mg/L, 32 mg/L e 128 mg/L. O gráfico representa a razão *Ct/Co* em função do tempo, evidenciando o comportamento do sistema ao longo do tempo, especialmente quando a coluna começa perder sua capacidade. As definições do ponto de ruptura e do ponto de exaustão são os tempos de operação que as concentrações finais se igualam aos valores de 10% da concentração inicial e 90%.

Figura 14- Curva Ruptura (5cm)



Fonte: Autora (2025)

No ensaio, com uma solução de 8 mg/L, observa-se uma curva de ruptura com aumento gradual da razão *Ct/Co* ao longo do tempo. Nos primeiros 30 minutos, os valores de *Ct/Co* estiveram próximos de zero, representando uma alta eficiência de remoção de íons de Cu^{2+}. Na condição de 8 mg/L e 5cm o ponto de ruptura (PR) ocorreu em 35 minutos de operação, por outro lado, o ponto de exaustão (PE) ocorreu em 330 minutos de operação da coluna. No ensaio com condições de 32 mg/L e 5cm não foi possível identificar o PR, pois provavelmente foi antes da primeira coleta, ou seja, entre 0-10 minutos, enquanto o PE foi identificado em 60 minutos. Nas condições de 128 mg/L e 5cm também não foi possível identificar o PR, entretanto, o PE foi em 25 minutos, indicando uma ruptura precoce e rápida.

Esses resultados indicam que no início da operação o leito apresenta-se com maior eficiência, pois possui uma maior parte de sítios ativos para reagir com os íons de cobre. Ademais, torna-se notório que a concentração influencia diretamente na eficiência e no tempo de exaustão da coluna. Nos estudos conduzidos por Al-mahbashi *et al.* (2022), os autores utilizaram carvão ativado com lodo de esgoto como material adsorvente, para uma concentração de 100 mg/L o tempo de ruptura para uma altura de leito de 6 cm foi de 15

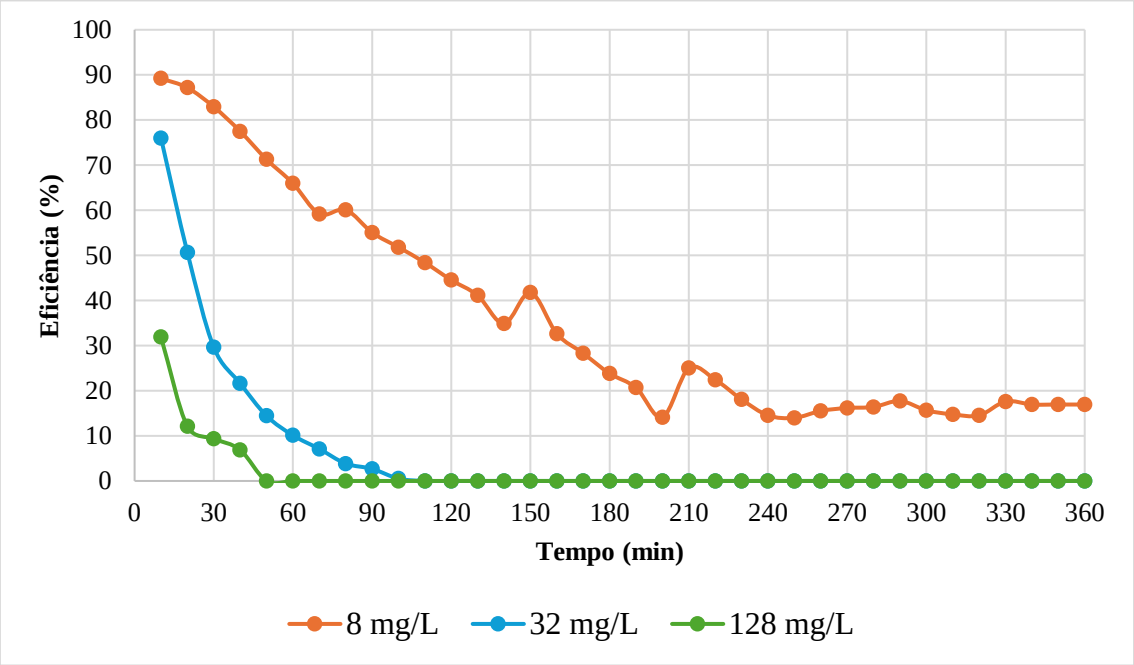
minutos, enquanto que em 9cm o PR foi de 60 minutos. Apesar de materiais distintos, essa pesquisa evidencia que os resultados com as cascas de arroz são condizentes com a literatura, ou seja, maior altura de leito e menores concentrações, leva a um maior tempo de ruptura.

As curvas observadas no gráfico são compatíveis com um sistema de adsorção em leito fixo bem projetado, mas com a capacidade limitada ao longo do tempo na concentração afluente. Pois, Banza *et al.* (2024) apresenta resultados semelhantes, os autores destacaram que vazões maiores diminuem a capacidade de adsorção, enquanto a eficiência de adsorção aumenta conforme a altura de leito

5.4 Ensaios (7,5 cm)

No ensaio conduzido com concentração inicial de 8 mg/L, a máxima eficiência obtida foi de 89%, enquanto a mínima foi de 17%. Durante os 360 minutos de operação, a eficiência apresentou um declínio gradual, com tendência à linearidade. Observam-se pequenos aumentos na eficiência nos instantes de 150 e 210 minutos, como podemos observar conforme a Figura 15.

Figura 15- Eficiência de remoção de Cu^{2+} em diferentes concentrações de leito adsorvente de 7,5cm



Fonte: Autora (2025)

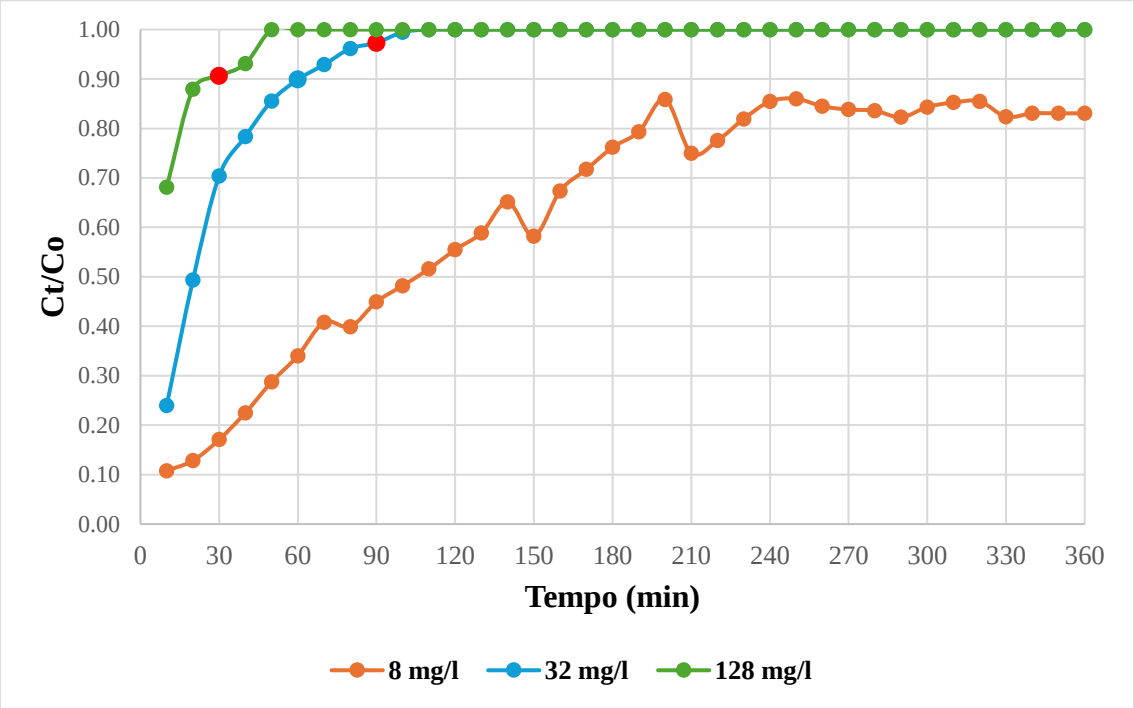
Semelhante ao observado no ensaio com altura de leito de 5cm, que teve a mesma concentração inicial, diferenciando-se apenas pela altura da coluna, a concentração de Cu^{2+} no efluente aumentou gradativamente ao longo do tempo, aproximando-se da concentração inicial. Em seguida, a condição operacional utilizada foi a solução com concentração inicial de 32 mg/L demonstra uma máxima eficiência registrada de 76% aos 10 minutos de operação, seguindo o declínio progressivo até atingir eficiência nula aos 110 minutos, mantendo-se nesse patamar até o final do experimento.

O ensaio com concentração de 128 mg/L registrou a maior eficiência de 32% e ocorreu em 10 minutos de operação. Logo em seguida, ocorreu um acentuado declínio na eficiência, levando ao PE do sistema aos 50 minutos, condição que se manteve até o final dos 360 minutos de operação. Observa-se, portanto, que a eficiência varia conforme o tempo em minutos, bem como a altura do leito fixo e quantidade da concentração de cobre. Outros estudos evidenciam esses fatores, como por exemplo Sarkar *et al.* (2021) neste estudo constatou-se que em baixas concentrações de Cobre, a capacidade de adsorção era maior, além disso, uma maior altura de leito observa-se maior remoção de metal. Ademais, Hossain *et al.* (2022) utilizaram casca de arroz modificadas termicamente para remoção de metais pesados, inclusive cobre, por processo de adsorção também em coluna de leito fixo. Os resultados apresentados demonstram uma eficiência superior a 90% e até 100% como observado nos últimos ensaios, sendo assim, um resultado satisfatório.

Além desses estudos, na pesquisa de Daffalla *et al.* (2021) que se utilizou a casca de arroz para produção do carvão ativado, com objetivo de melhorar a área superficial, os autores descreveram que mediante o aumento do leito adsorvente a capacidade de adsorção também aumentava, em contrapartida, a capacidade de adsorção diminui conforme aumentava a concentração. O que foi condizente com o que ocorreu com o resultado de 128 mg/L com apenas 32% de eficiência.

Na Figura 16 apresentam-se as curvas de rupturas referentes ao ensaio 4, 5 e 6, realizados sob condições de concentrações diferentes, entretanto, as condições operacionais de vazão e altura do leito manteve-se fixa, sendo 13mL/min e 7,5 cm respectivamente. A análise da razão *Ct/Co* permite observar o momento de ruptura da coluna, bem como a eficiência ao longo do tempo de operação da coluna.

Figura 16- Curva de ruptura (7,5 cm)



Fonte: Autora (2025)

A condição com leito adsorvente de 7,5cm destacou-se por apresentar melhor desempenho enquanto comparado ao leito de 5cm, prolongando seu tempo de ruptura que aconteceu aproximadamente em 200 minutos de operação, indicando que o PE da coluna foi retardado. Na curva, podemos analisar que em 150 minutos ocorreram flutuações, o que pode estar relacionado às variações na concentração do efluente coletado, ou algum erro operacional. Toda vida, manteve-se com uma excelente eficiência, tendo em vista, que se obteve uma eficiência até o final do experimento.

No ensaio com concentração de 32 mg/L, pode-se avaliar que ocorreu uma ruptura muito rápida, ocorreu por aproximadamente os 80 minutos de operação. Essa ruptura precoce, pode estar relacionada com as condições operacionais, ou seja, a concentração foi inicial de Cu^{2+} foi maior em relação ao ensaio de 8mg/L e a vazão foi alta, quando comparado a outros estudos da literatura, como o de Bar *et al.* (2021) que obteve melhores resultados, em vazões menores de 10mL/min.

O ensaio cuja concentração foi de 128 mg/L apresentou a menor eficiência em relação aos demais, com uma curva de ruptura extremamente precoce. O ponto de exaustão é observado em menos de 50 minutos de operação, atingindo o PE quase instantaneamente. Esse comportamento pode ser explicado possivelmente por que este ensaio foi o de maior concentração de Cu^{2+} e uma alta vazão, isso pode levar à mínima

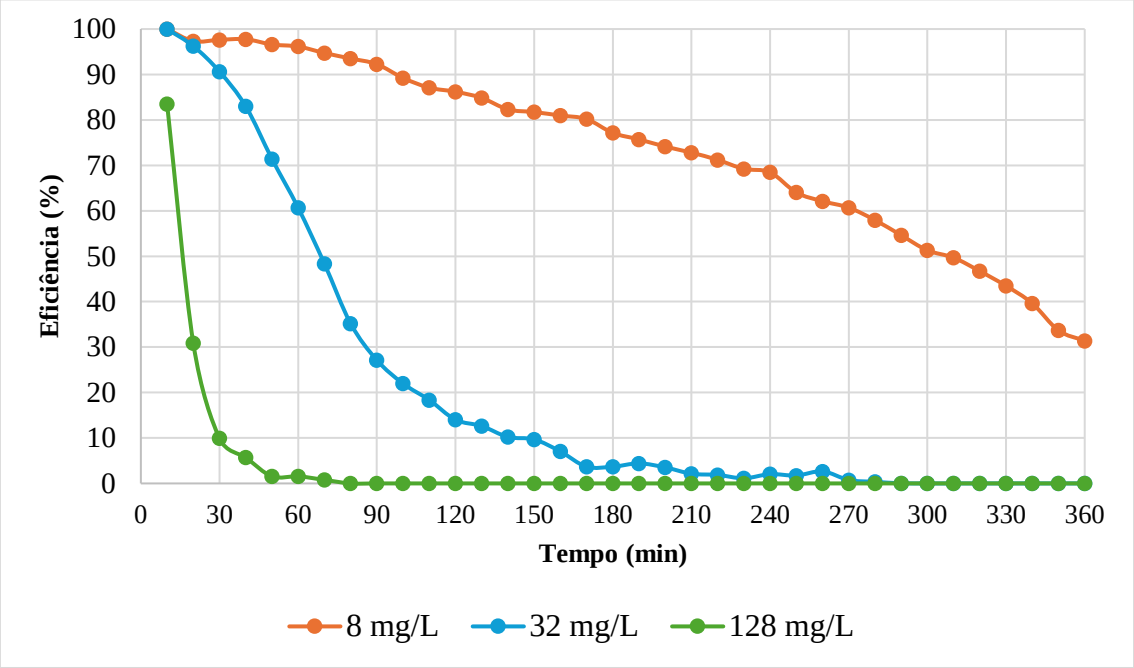
interação entre a solução contaminada e os sítios ativos do adsorvente. De forma semelhante, Banza *et al*. (2024) destacaram que em concentrações superiores a 100 mg/L com alturas de leito menores que 5cm a ruptura ocorreu rapidamente, entretanto, quando utilizou-se altura de leito maior (12,5 cm) aumentou mais o tempo de ruptura.

É válido pontuar que, a definição do ponto de ruptura (PR) e o ponto de exaustão (PE) foram definidos fundamentando-se em outros estudos de adsorção como por exemplo Sarkar *et al.* (2021) que investigaram a remoção de cobre e de cromo também utilizando o arroz, também utilizaram 10% para PR e 90% para PE. Neste sentido, os autores pontuaram que o ponto de ruptura foi mais demorado com colunas com maiores alturas de leito adsorvente, enquanto que o ponto de exaustão ocorreu rapidamente em concentrações elevadas de metal, assim como foi encontrado nos resultados desta pesquisa, sendo assim, os resultados estão condizentes com os da literatura. Além disso, Marrone *et al.* (2023) também encontraram na sua pesquisa uma ruptura tardia quando utilizavam uma maior altura de leito, o que também coincide com esses resultados.

5.5 Ensaio de (10 cm; 8 mg/L)

Na Figura 17 podemos observar que a eficiência foi de 100% nos primeiros 10 minutos para as concentrações de 8mg/L e 32 mg/L, isso evidencia a elevada capacidade de retenção de Cu^{2+} quando os sítios do adsorvente ainda estavam livres. Posteriormente, com o passar do tempo a eficiência teve um declínio gradual, apresentando uma eficiência menor ao final do ensaio entre 35% em 350 minutos e 30% ao final de 360 minutos, entretanto, é válido ressaltar a grande eficiência, pois não chegou ao ponto de exaustão, como podemos avaliar na Figura de *CT/Co*. Esse comportamento está coerente com o sistema de leito fixo, tendo em vista, que a eficiência reduz ao longo do desempenho do processo.

Figura 17-Eficiência de remoção de Cu^{2+} em diferentes concentrações de leito adsorvente de 10cm



Fonte: Autora (2025)

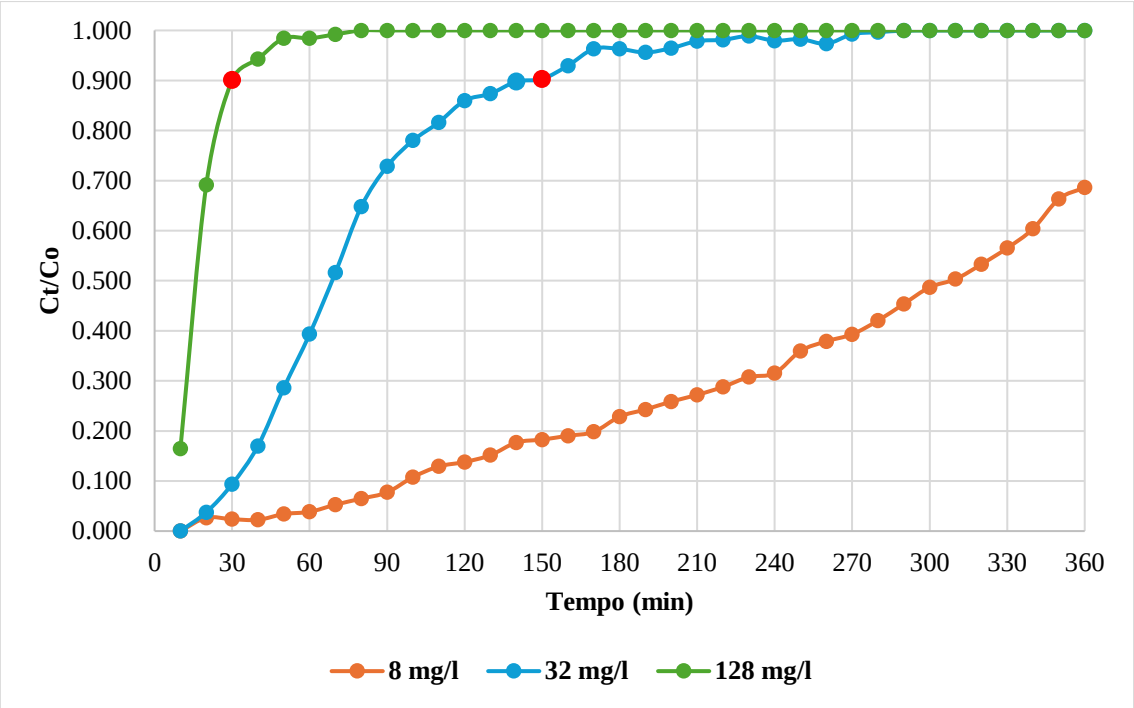
A curva de eficiência com relação a concentração de 8mg/L apresenta resultados satisfatórios, com remoção de 100% nos primeiros 10 minutos e bem próximos a 100% ao longo de 30 minutos. Em seguida, podemos observar uma queda acentuada de eficiência, em aproximadamente 150 minutos a eficiência caiu drasticamente para 10% conforme o gráfico. De acordo com a literatura, esses resultados estão associados a condições operacionais, especificamente a uma maior concentração de Cu^{2+}. Neste caso, foi observado que 80% de eficiência foi de aproximadamente 50 minutos.

O resultado observado neste ensaio de 128 mg/L foi de uma eficiência limitante, a remoção inicial foi aproximadamente 83% observando assim um declínio gradual, pois decaiu para 10% nos primeiros 45 minutos, evidenciando um PE quase imediato e após 60 minutos ocorreu a completa exaustão, pois perdeu a eficiência total.

Os resultados observados nas curvas de ruptura da Figura 18 reforçam a importância das condições operacionais como altura de leito, vazão e concentração do adsorvato. Colunas com uma altura maior de leito adsorvente permitem um melhor aproveitamento, logo, uma maior capacidade adsortiva do material, como observado nos ensaios 7, 8. Verifica-se que com a concentração inicial de 8 mg/L o PR foi em aproximadamente 100 minutos e o PE não ocorreu durante os 360 minutos. Na

concentração de 32 mg/L o PR foi em 30 minutos e o PE observado cerca de 130 minutos. Na condição de elevada concentração (128mg/L) não se identificou PR e o PE em 30 minutos apenas.

Figura 18- Curvas de ruptura (10cm)



Fonte: Autora (2025)

Esse comportamento está de acordo com outros estudos difundidos na literatura como o de Bar *et al.* (2021) e Kumari *et al. (*2021), os autores descrevem que a eficiência de remoção está diretamente relacionada com as condições operacionais, sendo que altura de leito se destaca como a principal para colunas de adsorção. Conforme Wang *et al.* (2020), baixas alturas de leito adsorvente e vazões elevadas, dificultam o tempo de contato, assim como reduzem os sítios ativos, acelerando a ruptura.

Na pesquisa de Zafar *et al.* (2020) utilizou-se como material adsorvente a casca de arroz quimicamente tratadas com NaOH, o material adsorvente foi empregado para remover íons de cobre em soluções aquosas. Assim como esta pesquisa foi conduzida, os autores realizaram uma avaliação referente a eficiência de acordo com o tempo de contato, altura de leito e concentração do cobre. Diante disso, verificou-se, que a modificação de das cascas de arroz melhorou a cinética de adsorção, resultando em uma excelente remoção de Cu (II), tendo em vista que em apenas 30 minutos com contato com material adsorvente obteve uma remoção de até 97% de Cu (II).

Com base nos experimentos conduzidos nesta pesquisa, verificou-se que o melhor desempenho em termos de eficiência foi obtido nos ensaios cujo altura de leito de 10 cm e a concentração de Cu^{2+} de 8 mg/L e 32 mg/l o qual apresentaram uma eficiência de 100% e manteve um bom potencial de remoção Cu^{2+} ao longo do ensaio nos 360 minutos de operação. Além disso, o ensaio 1 (5cm e 8mg/L) apresentou uma eficiência de 97% nos minutos iniciais de operação. Enquanto, o ensaio 4 (7,5 cm e 8 mg/L) também se destacou, registrando uma remoção de 89% nos minutos iniciais. Diante disso, esses resultados evidenciam que concentrações menores de Cu^{2+} apresentam uma maior eficiência.

6 CONCLUSÃO

Esta pesquisa teve como objetivo avaliar as condições ótimas de operação de uma coluna de leito fixo empregando as cascas de arroz como material adsorvente na remoção de cobre (Cu^{2+}). Os resultados evidenciaram que a altura de leito de 10 cm associada à concentração inicial de 8 mg/L apresentou o melhor desempenho, não atingindo a saturação ao longo do tempo de operação e confirmando a eficiência do processo de adsorção. Assim, demonstrou-se que as cascas de arroz podem ser utilizadas de forma eficaz no tratamento de águas residuárias com baixas concentrações de cobre, aliando eficiência técnica e sustentabilidade ambiental.

Entretanto, por se tratar de ensaios em escala de bancada, algumas limitações devem ser consideradas, como o tempo reduzido de operação e a ausência de testes com efluentes reais. Nesse sentido, estudos futuros podem contemplar a avaliação do desempenho da casca de arroz em diferentes vazões, a modificação química do adsorvente para aumentar sua capacidade de retenção, bem como sua aplicação em sistemas contínuos de maior escala e em efluentes industriais reais.

Portanto, a utilização da casca de arroz como material adsorvente representa não apenas uma alternativa viável e de baixo custo para a remoção de cobre, mas também uma estratégia alinhada aos princípios da economia circular, promovendo o reaproveitamento de resíduos agroindustriais e contribuindo para a conservação dos recursos hídricos e a proteção ambiental. Essa abordagem reforça o potencial da bissorção como tecnologia limpa e sustentável para o enfrentamento da poluição hídrica por metais pesados.

REFERÊNCIAS

AFZAAL, Muhammad et al. Heavy metals contamination in water, sediments and fish of freshwater ecosystems in Pakistan. Water Practice & Technology, v. 17, n. 5, p. 1253-1272, 2022.

ANAGNOSTOPOULOS, Iphigenia Franziska; HEUSS-AßBICHLER, Soraya. Recovery of Different Cu-Phases from Industrial Wastewater. Minerals, v. 15, n. 1, p. 23, 2024.

AL-MAHBASHI, Najib et al. Column study for adsorption of copper and cadmium using activated carbon derived from sewage sludge. Advances in Civil Engineering, v. 2022, n. 1, p. 3590462, 2022.

ALI, Ibrahim Wardako et al. Activated rice husk for copper removal from aqueous solution: A sustainable approach. In: Current Directions in Water Scarcity Research. Elsevier, 2022. p. 487-498.

ALI, Zeeshan et al. Toxicological effects of copper on bioaccumulation and mRNA expression of antioxidant, immune, and apoptosis-related genes in Chinese striped-necked turtle (Mauremys sinensis). Frontiers in physiology, v. 14, p. 1296259, 2023.

ALENGEBAWY, Ahmed et al. Heavy metals and pesticides toxicity in agricultural soil and plants: Ecological risks and human health implications. *Toxics*, v. 9, n. 3, p. 42, 2021.

ALESSANDRETTI, I. et al. Biosorption of the scarlet red dye directly by cassava bagasse. *Research, Society and Development*, v. 10, n. 4, p. 16510413964, 2021.

BAR, Nirjhar; MITRA, Tania; DAS, Sudip Kumar. Biosorption of Cu (II) ions from industrial effluents by rice husk: Experiment, statistical, and ANN modeling. Journal of Environmental Engineering and Landscape Management, v. 29, n. 4, p. 441–448-441–448, 2021.

BANZA, Musamba et al. Batch and continuous fixed bed adsorption of copper (II) from acid mine drainage (AMD) using green and recyclable adsorbent from cellulose microcrystals (CMCs). Journal of Environmental Science and Health, Part A, v. 59, n. 9, p. 488-498, 2024.

CAO, Xue et al. Higher risks of copper toxicity in turbid waters: Quantifying the bioavailability of particle-bound metals to set site-specific water quality criteria. Environmental Science & Technology, v. 57, n. 2, p. 1060-1070, 2023.

BELTRAN, L. B. et al. Processo de biossorção de corante utilizando casca de tangerina (*Citrus reticulata*). *Brazilian Journal of Development*, v. 6, n. 6, p. 41760-41771, 2020.

BLAGOJEV, Nevena et al. A new approach for modelling and optimization of Cu (II) biosorption from aqueous solutions using sugar beet shreds in a fixed-bed column. Journal of hazardous materials, v. 363, p. 366-375, 2019.

BRASIL. Ministério da Saúde. *Portaria GM/MS N° 888, de 04 de maio de 2021***CONAMA.** [Conselho Nacional do Meio Ambiente]. *Resolução n° 430, de 13 de maio de 2011*. Dispõe sobre as condições e padrões de lançamento de efluentes.

DA SILVA, Ricardo Miguel Gonçalves; COSTA, Andréia Alves. Prospecção Tecnológica sobre o Uso de Casca de Arroz e seus Derivados para Adsorção Seletiva de Compostos Contendo Enxofre no Diesel. Cadernos de Prospecção, v. 17, n. 1, p. 241-257, 2024.

DAFFALLA, Samah B. et al. Fixed-bed adsorption of phenol onto microporous activated carbon set from rice husk using chemical activation. Applied Science**s**, v. 12, n. 9, p. 4354, 2022.

DE SOUSA, Thâmara Martins Ismael et al. Cu (II) adsorption in rice husk for water treatment: Batch and fixed column experiments. Desalination and Water Treatment, v. 320, p. 100762, 2024.

DO PRADO, Anderson; ENZWEILER, Heveline; PAULINO, Alexandre Tadeu. Processos de adsorção de poluentes emergentes em materiais poliméricos: uma revisão.

GARGIULO, Valentina; DI NATALE, Francesco; ALFE, Michela. From agricultural wastes to advanced materials for environmental applications: Rice husk-derived adsorbents for heavy metals removal from wastewater. Journal of Environmental Chemical Engineering, v. 12, n. 5, p. 113497, 2024

GAUTAM, K. et al. Comparative study of simple and modified rice husk biochar for cadmium removal: adsorption performance and possible mechanisms. *Journal of Water Supply: Research and Technology – Aqua*, v. 72, n. 7, p. 1269–1287, 2023.

GAMBOA, V. S.; GASPARIN, Fabiano Perin; RIES, Lúcia Allebrandt da Silva. Aplicação da casca de arroz como bioadsorvente para remoção de Cr(VI) em soluções aquosas diluídas. In: *6º Simpósio sobre Sistemas Sustentáveis*, 2021, Porto Alegre. *Anais do 6º Simpósio sobre Sistemas Sustentáveis.* Toledo: GFM. v. 1. p. 82-85.

GUPTA, Anu; KATARIA, Priyanka; SHARMA, Vinita. Composição física, química e análise morfológica de compósitos epóxi reforçados com casca de arroz. Oxford Open Materials Science , v. 5, n. 1, p. itaf012, 2025

HAWAL, Laith Hamdan; AL-SULTTANI, Ali Omran; KARIEM, Nagam Obaid. Adsorption of lead ions from aqueous solutions onto rice husks, continuous system. Journal of Ecological Engineering, v. 22, n. 10, p. 269-274, 2021.

HABIB, Mohamed Ahmed; MOHAMED, Inas Elkhedr. Agriculture By-Products Wastes as Low-Cost Bio-Sorbents for Heavy Metals Removal from Industrial Waste Stream, Short Review. 2023.

HARSHALA, K.; WAGH, N. D. Use of Agricultural Waste-Based Biosorbents for the Removal of Heavy Metals from Aqueous Solution: A Review. Nature Environment & Pollution Technology, v. 21, n. 3, 2022.

HOSSAIN, N. Thermal-chemical modified rice husk-based porous adsorbents for Cu (II), Pb (II), Zn (II), Mn (II) and Fe (III) adsorption. *Journal of Water Process Engineering*, v. 46, p. 102620, abr. 2022. Elsevier BV.

HYDER, Ali et al. Identification of heavy metal ions from aqueous environment through gold, silver and copper nanoparticles: an excellent colorimetric approach. *Environmental Research*, v. 205, p. 112475, 2022.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). *Cidades e Estados: Pombal (PB)*. Rio de Janeiro: IBGE, 2022.

KAPOOR, Dhriti; SINGH, Mahendra P. Heavy metal contamination in water and its possible sources. In: Heavy metals in the environment. Elsevier, 2021. p. 179-189.

KHAN, T.; et al. Modeling of Cu(II) Adsorption from an Aqueous Solution Using an Artificial Neural Network (ANN). *Molecules*, v. 25, n. 14, p. 3263, 17 jul. 2020.

KUO, C.-Y. et al. Characterization of rice husk biochar produced by microwave pyrolysis and its application for environmental remediation. *Environmental Technology & Innovation*, v. 30, 2023.

KUMARI, U.; MISHRA, A.; SIDDIQI, H.; MEIKAP, B. C. Effective defluoridation of industrial wastewater by using acid modified alumina in fixed-bed adsorption column: experimental and breakthrough curves analysis. *Journal of Cleaner Production*, v. 279, p. 123645, 2021.

KORRES, Nicholas E.; SINGH, Anoop; PRASAD, Shiv. Agricultural residues management: life cycle assessment implications for sustainable agricultural practices and reduction of greenhouse gases emissions. Advances in Agronomy, v. 180, p. 197-226, 2023.

LI, Dianbao et al. Bioaccumulation and health risks of multiple trace metals in fish species from the heavily sediment-laden Yellow River. Marine Pollution Bulletin, v. 188, p. 114664, 2023.

LI, Zheyong et al. Review on rice husk biochar as an adsorbent for soil and water remediation. Plants, v. 12, n. 7, p. 1524, 2023.

LIRA, Patricia Da Rosa. Caracterização e avaliação da sílica lixiviada da casca de arroz como material adsorvente para remoção de micropoluentes de águas residuais. 79 p.

LIMSUWAN, Yanisa et al. Cu (II) removal from aqueous solution in trickle tray adsorber using non-woven fabric modified via radiation-assisted functionalization. Scientific Reports, v. 14, n. 1, p. 27076, 2024.

MALIK, Sheeba; OMRE, Pramod Kumar; SIVADAS, Shreejaya. Compositional Analysis of the Lignocellulosic Biomass from Agricultural Waste (Rice Husk). Archives of Current Research International, v. 24, n. 6, p. 78-84, 2024.

MARRANE, Salah Eddine et al. Fixed-bed adsorption of Pb (ii) and Cu (ii) from multi-metal aqueous systems onto cellulose-g-hydroxyapatite granules: optimization using response surface methodology. RSC advances, v. 13, n. 45, p. 31935-31947, 2023.

MATHEUS, Augusto Feix Lewin et al. Queima de casca de arroz para geração de energia: estudo de caso para uma região do estado do Mato Grosso - Brasil. *XXIII SEMEAD Seminários em Administração.* DOI: 10.37885/220308169. Publicado em 01/05/2022. Páginas 2217-2233. Capítulo 170.

MEMLAK, DEISY MARIA. Aplicação de coluna de leito fixo na adsorção e dessorção mono e multicomponente de metais tóxicos presentes em água utilizando adsorvente alternativo. 2021. Tese de Doutorado. Dissertação de mestrado.

MURPHY, Orla P. et al. A review on the adsorption isotherms and design calculations for the optimization of adsorbent mass and contact time. ACS omega, v. 8, n. 20, p. 17407-17430, 2023.

MOLLO, V. M.; NOMNGONGO, P. N.; RAMONTJA, J. Avaliação da qualidade da água superficial usando vários índices para metais pesados em Sasolburg, África do Sul. *Water*, v. 14, n. 15, p. 2375, 2022.

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.

NAIK, R. Lakshmana; KUMAR, M. Rupas; NARSAIAH, T. Bala. Removal of heavy metals (Cu & Ni) from wastewater using rice husk and orange peel as adsorbents. Materials Today: Proceedings, v. 72, p. 92-98, 2023.

NASCIMENTO, Ronaldo Ferreira do et al. Adsorção: aspectos teóricos e aplicações ambientais. *E-book.* 2. ed. Fortaleza: Imprensa Universitária, 2020. (Estudos da pós-graduação).

OLATUNJI, Morufu A.; SALAM, Kamoru A.; EVUTI, Abdullahi M. Simultaneous Adsorption of Aqueous Pb2+, Cu2+, Zn2+, and Cd2+ Using Surfactant-Modified and

Unmodified Activated Carbon in a Fixed Bed Column. Journal of Encapsulation and Adsorption Sciences, v. 12, n. 1, p. 1-24, 2024.

OLADIMEJI, T. E. et al. Review on the impact of heavy metals from industrial wastewater effluent and removal technologies. Heliyon, v. 10, n. 23, 2024.

PATEL, H. Fixed-bed column adsorption study: a comprehensive review. *Applied Water Science*, v. 9, n. 3, p. 45, 2019.

QIU, M. et al. Biochar for the removal of contaminants from soil and water: a review. *Carbon Research*, [S.l.], v. 1, n. 1, p. 1–20, 2022.

RINANTI, Astri et al. Assessing the Performance of Heavy Cu 2+ Metal Sorption by Immobilized Biosorbent in Fixed-bed Column Reactor Based on Breakthrough Curves. Systematic Reviews in Pharmacy, v. 11, n. 3, 2020.

RENU et al. Continuous fixed-bed adsorption of heavy metals using biodegradable adsorbent: modeling and experimental study. Journal of Environmental Engineering, v. 146, n. 2, p. 04019110, 2020.

Ruthven, D. M. (1984) – *Principles of Adsorption and Adsorption Processes*

SAIDON, Nadhirah B. et al. Trophic transfer and biomagnification potential of environmental contaminants (heavy metals) in aquatic ecosystems. Environmental pollution, v. 340, p. 122815, 2024.

SARKAR, S.; BAR, N.; DAS, S. K. Cr (VI) and Cu (II) removal from aqueous solution in fixed bed column using rice bran; experimental, statistical and GA modelling. *Journal of the Indian Chemical Society*, v. 98, n. 11, p. 100216, 2021.

SHARMA, Anjali et al. Heavy metal contamination in water: consequences on human health and environment. In: Metals in water. Elsevier, 2023. p. 39-52.

SOUSA, André Moreira de. *Desenvolvimento e validação de um método analítico para determinação de cobre em cachaça usando FAAS e aplicação no estudo de remoção de cobre em amostras da bebida utilizando bagaço de cana-de-açúcar*. 2012.

Silva et al. (2019) – Aplicação de nanotubos de titanato modificados como adsorventes para remoção de cobre(II) em solução

SINGH, Veer et al. Toxic heavy metal ions contamination in water and their sustainable reduction by eco-friendly methods: isotherms, thermodynamics and kinetics study. Scientific Reports, v. 14, n. 1, p. 7595, 2024.

TAN, T. V.; NGUYEN, H. T. T. Activated Carbon based Rice Husk for Highly Efficient Adsorption of Methylene Blue: Kinetic and Isotherm. In: *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. IOP Publishing, p. 012078, 2021.

TOPARE, Niraj S.; WADGAONKAR, Vinayak S. A review on application of low-cost adsorbents for heavy metals removal from wastewater. *Materials Today: Proceedings*, 1 set. 2022. DOI: 10.1016/j.matpr.2022.08.450.

VAZ JUNIOR, Silvio. Aproveitamento de resíduos agroindustriais: uma abordagem sustentável. Brasília, DF: *Embrapa Agroenergia*, 2020.

Wang, Y.; Li, H.; Lin, S. (2022) – *Advances in the Study of Heavy Metal Adsorption from Water and Soil by Modified Biochar* (MDPI – *Water*)

ZAFAR, Shagufta et al. Removal of copper ions from aqueous solution using NaOH-treated rice husk. *Emergent Materials*, v. 3, n. 6, p. 857-870, 12 out. 2020. Springer Science and Business Media LLC.

Zeng, Y.; Lin, Y.; Ma, M.; Chen, H. (2024) – *A Review on the Removal of Heavy Metals from Water by Phosphorus-Enriched Biochar* (Minerals)