

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

LUÍS FERNANDO CUSIOLI

**PRODUÇÃO DE UM NOVO MATERIAL ADSORVENTE A PARTIR DE RESÍDUOS
AGROINDUSTRIAIS E COMPARAÇÃO COM ADSORVENTE COMERCIAL PARA
REMOÇÃO DE CONTAMINANTES EMERGENTES**

PONTA GROSSA

2024

LUÍS FERNANDO CUSIOLI

**PRODUÇÃO DE UM NOVO MATERIAL ADSORVENTE A PARTIR DE RESÍDUOS
AGROINDUSTRIAIS E COMPARAÇÃO COM ADSORVENTE COMERCIAL PARA
REMOÇÃO DE CONTAMINANTES EMERGENTES**

**Production of a new adsorbent material from agroindustrial waste and
comparison with a commercial adsorbent for removal of emerging
contaminants**

Tese apresentada como requisito para obtenção do
título de Doutor em Engenharia de Produção, pelo
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de
Produção, da Universidade Tecnológica Federal do
Paraná (UTFPR).

Orientadora: Profa. Dra. Giane Gonçalves Lenzi

PONTA GROSSA

2024



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Esta licença permite remixe, adaptação e criação a partir do trabalho, para fins não comerciais, desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es) e que licenciem as novas criações sob termos idênticos. Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.



Ministério da Educação
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Campus Ponta Grossa



LUIS FERNANDO CUSIOLI

**PRODUÇÃO DE UM NOVO MATERIAL ADSORVENTE A PARTIR DE RESÍDUOS AGROINDUSTRIAIS E
COMPARAÇÃO COM ADSORVENTE COMERCIAL PARA REMOÇÃO DE CONTAMINANTES EMERGENTES**

Trabalho de pesquisa de doutorado apresentado como requisito para obtenção do título de Doutor Em Engenharia De Produção da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR). Área de concentração: Gestão Industrial.

Data de aprovação: 30 de Outubro de 2024

Dra. Giane Goncalves Lenzi, Doutorado - Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Dr. Angelo Marcelo Tusset, Doutorado - Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Dr. Fernando Manzotti De Souza, Doutorado - Feitep - Faculdade de Engenharias e Arquitetura

Dra. Leda Maria Saragiotto Colpini, Doutorado - Universidade Federal do Paraná (Ufpr)

Dra. Rosangela Bergamasco, Doutorado - Universidade Estadual de Maringá (Uem)

Documento gerado pelo Sistema Acadêmico da UTFPR a partir dos dados da Ata de Defesa em 30/10/2024.

Dedico este trabalho à Deus, a Nossa Senhora
Aparecida, de Guadalupe e de Fátima, Santa Isabel
de Portugal e minha família.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer em primeiro lugar a Deus, e a Nossa Senhora Aparecida, de Guadalupe e de Fátima e Santa Isabel de Portugal pois sempre estão presentes em minha vida me guiando e acalmando meu coração nos momentos mais difíceis. Aos meus pais, José Durval e Regina que sempre me apoiaram dando forças para continuar, mesmo com a distância que existe entre as nossas cidades, me apoiaram financeiramente, emocionalmente, confortando com palavras de perseverança e coragem.

Gostaria de agradecer a minha amada avó Walkiria (*in memoriam*) que sempre esteve em orações e acreditando que sou capaz e a todos meus familiares. Ao grande amor da minha vida a Diana, pois sempre foi minha companheira em todos os momentos e no qual todas as palavras que possa mencionar aqui, não seriam suficientes para agradecê-la, eu te amo Diana e ao fruto do nosso amor que está por vir a esse mundo, Mariana o papai te ama. E ao Frederico que entrou na minha vida para alegrar com seus latidos mais sinceros. Aos meus amigos de Pitangueiras que mesmo de longe sempre estamos em conexão, vocês fazem parte da minha vida e aos meus amigos que a cidade de Maringá me proporcionou. Muito obrigado a todos.

Agradecer também a todos que foram importantes na minha caminhada de vida e que já se encontram ao lado de Deus. Obrigado pela intercessão que sempre me deram e me ajudam a confiar no meu caminho para frente.

Agradecimento a minha orientadora, professora. Dra. Giane Gonçalves Lenzi, pela confiança em meu trabalho, pelas orientações necessárias e pela professora Dra. Rosângela Bergamasco carinho com minha pessoa, aos amigos que o Laboratório de Gestão, Controle e Preservação ambiental (LGCPA). Enfim obrigado e gratidão a todos. Certamente estes parágrafos não irão atender a todas as pessoas que fizeram parte dessa importante fase de minha vida. Portanto, desde já peço desculpas àquelas que não estão presentes entre essas palavras, mas elas podem estar certas de que fazem parte do meu pensamento e de minha gratidão.

RESUMO

Foi desenvolvido um adsorvente a partir de resíduos agroindustriais derivados das cascas das sementes de *Moringa oleifera* Lam em que foi utilizado o processo biochar, por ser um processo sustentável, de baixo custo e fácil operação. O objetivo principal deste presente estudo foi comparar um carvão ativado comercial com um biossorvente desenvolvido proveniente de resíduo agroindustrial utilizando o método de biochar. Para efeito de comparação, foi utilizado um adsorvente comercial, carvão ativado de coco babaçu. Ambos os materiais foram caracterizados utilizando microscopia eletrônica de varredura, espectroscopia no infravermelho com transformada de Fourier, potencial zeta e o fisissorção de N₂, onde foram apresentadas suas morfologias, composições químicas e análises texturais que comprovam a capacidade de adsorção de cada material; foi avaliado um estudo de custos, desde quando ocorreu a produção dos materiais, para ambos os estudos, o estudo de equilíbrio dos materiais foi analisado utilizando os seguintes contaminantes, metformina, diuron, azul de metileno e chumbo. Visando estudar a utilização de resíduos agroindustriais como novo material adsorvente e uma remoção média para todos os contaminantes em torno de 97 - 99%. Assim, o novo adsorvente desenvolvido possui muitas interações com os contaminantes estudados e permite sua utilização em larga escala, já que seu custo de produção foi baixo.

Palavras-chave: material sustentável; poluentes; custo de produção; qualidade do produto.

ABSTRACT

An adsorbent was developed from agro-industrial waste derived from the shells of *Moringa oleifera* Lam seeds, using the biochar process, as it is a sustainable, low-cost and easy-to-operate process. The main objective of this study was to compare a commercial activated carbon with a biosorbent developed from agro-industrial waste using the biochar method. For comparison purposes, a commercial adsorbent, babassu coconut activated carbon, was used. Both materials were characterized using scanning electron microscopy, Fourier transform infrared spectroscopy, zeta potential and N₂ physisorption, where their morphologies, chemical compositions and textural analyses that prove the adsorption capacity of each material were presented; a cost study was evaluated, since the production of the materials occurred; for both studies, the equilibrium study of the materials was analyzed using the following contaminants, metformin, diuron, methylene blue and lead. Aiming to study the use of agro-industrial waste as a new adsorbent material and an average removal for all contaminants around 97 - 99%. Thus, the new adsorbent developed has many interactions with the contaminants studied and allows its use on a large scale, since its production cost was low.

Keywords: sustainable material; pollutants; production cost; product quality

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Matérias primas para serem processadas na agroindústria	15
Figura 2 - Estrutura molecular da metformina	21
Figura 3 - Estrutura molecular do diuron	22
Figura 4 - Estrutura molecular do azul de metileno.....	23
Figura 5 - Estrutura do chumbo	24
Figura 6 - <i>Moringa oleifera</i> Lam. (A) Árvore, (B) Flores, (C) Vagens, (D) Casca da semente, (E) Semente	25
Figura 7 - Esquema do processo de adsorção.....	28
Figura 8 - Adsorvente comercial	29
Figura 9 - Uso do biochar na remediação de água e solos.....	30
Figura 10 - Parte interna do reator	35
Figura 11 - Reator completo para a produção do biochar.....	36
Figura 12 - Microscopia eletrônica de varredura (A) MO e (B) carvão ativado...	41

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Distribuição granulométrica de MO.....	39
Gráfico 2 - Potencial zeta (A) MO e (B) carvão ativado.....	40
Gráfico 3 - FTIR (A) MO e (B) Carvão Ativado Comercial	43
Gráfico 4 - Equilíbrio químico e porcentual de remoção da metformina utilizando MO.....	45
Gráfico 5 - Equilíbrio químico e porcentual de remoção de diuron utilizando MO.....	46
Gráfico 6 - Equilíbrio químico e porcentual de remoção de azul de metileno utilizando MO.....	47
Gráfico 7 - Equilíbrio químico e porcentual de remoção de azul de chumbo utilizando MO.....	48
Gráfico 8 - Equilíbrio químico e porcentual de remoção da metformina utilizando CA	49
Gráfico 9 - Equilíbrio químico e porcentual de remoção de diuron utilizando CA	50
Gráfico 10 - Equilíbrio químico e porcentual de remoção de azul de metileno utilizando CA	51
Gráfico 11 - Equilíbrio químico e porcentual de remoção de chumbo utilizando CA.....	52

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Diâmetro das peneiras utilizadas para a análise de distribuição granulométrica.....	37
Tabela 2 - Propriedades texturais da casca da MO e carvão ativado comercial.....	42
Tabela 3 - Modelos cinéticos para o adsorvente MO.....	48
Tabela 4 - Modelos cinéticos para o adsorvente CA	52
Tabela 5 - Valores de produção de cada material.....	53

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
1.1	Justificativa	13
1.2	Objetivos	14
1.2.1	Objetivo geral.....	14
1.2.2	Objetivo específicos.....	14
1.3	Delimitação do escopo.....	14
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	15
2.1	Agroindústria	15
2.2	Agroindústria no Brasil	17
2.3	Resíduos gerados na Agroindústria	18
2.4	Poluentes emergentes.....	20
2.4.1	Metformina	21
2.4.2	Diuron	22
2.4.3	Azul de Metileno	23
2.4.4	Chumbo	24
2.5	Moringa oleifera Lam.....	25
2.6	Adsorção	27
2.7	Adsorventes comerciais	28
2.8	Biochar	29
2.9	Custo de produção	31
3	METODOLOGIA.....	34
3.1	Reagentes.....	34
3.2	Preparação das soluções.....	34
3.3	Preparo das cascas da semente de <i>Moringa oleifera</i> Lam.....	34
3.4	Preparo do biochar	34
3.5	Distribuição granulométrica do bioissorvente	36
3.6	Caracterização dos adsorventes	37
3.7	Estudo cinético e equilíbrio químico de cada contaminante estudado.....	38
3.8	Análise de custos	38
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	39
4.1	Distribuição granulométrica da MO.....	39
4.2	Caracterização dos adsorventes	39

4.2.1	Potencial Zeta	39
4.2.2	Microscopia eletrônica de varredura	41
4.2.3	Fisissorção de N ₂	42
4.2.4	Espectroscopia no infravermelho com transformada de Fourier	42
4.3	Estudo cinético e equilíbrio químico	44
4.4	Estudo do custo de produção de cada adsorvente	53
5	CONCLUSÃO.....	54
	REFERÊNCIAS	55

1 INTRODUÇÃO

No decorrer das últimas décadas, a ocorrência de micropoluentes no ambiente aquático passou a ser uma questão de grande preocupação mundial. Os micropoluentes, também denominados contaminantes emergentes, consistem em uma vasta quantidade de substâncias de origem antrópica ou natural. Esse grupo inclui produtos químicos industriais, agrotóxicos, hormônios e esteroides, produtos de higiene pessoal e os fármacos (Farré *et al.*, 2008). Os contaminantes emergentes estão comumente presentes nos corpos hídricos em concentrações baixas, variando de ng L⁻¹ a µg L⁻¹. Essa baixa concentração e a diversidade dos compostos não só complicam os procedimentos de detecção e análise, como também dificultam os processos de tratamento de águas residuais e tratamento de água para abastecimento (Bayabil; Teshome; Li, 2022).

Os resíduos agroindustriais são subprodutos gerados durante a etapa de transformação de matérias-primas agrícolas em produtos destinados aos seus consumidores, por vários tipos de processos industriais. Estes resíduos podem ser biodegradáveis ou não, orgânicos ou inorgânicos (Yaashikaa; Kumar; Varjani, 2022). Geralmente, estes resíduos são compostos por cinzas, cascas, farelos, fibras, óleos, entre outros. O descarte inadequado desses materiais tem provocado graves problemas de poluição ambiental. Por exemplo, a contaminação das águas dos lençóis freáticos, a emissão de gases nocivos para a atmosfera, a erosão do solo e até mesmo a redução da biodiversidade (Shirahigue; Ceccato-Antonini, 2020). Além disso, a gestão inadequada destes resíduos dificulta a reciclagem, exigindo que sejam armazenados em aterros sanitários, aumentando assim o risco de contaminação ainda mais (Khorairi *et al.*, 2023).

Uma das alternativas para uso desses resíduos agroindustriais é para a produção de biochar, que a partir dos resíduos agroindustriais gerados nas indústrias, existem a possibilidade de desenvolvimento de novos materiais adsorventes e que possam ser utilizados em locais para descontaminação de poluentes (Sadh; Duhan; Duhan, 2018). Uma enorme atenção devido à sua capacidade de solucionar múltiplos problemas ambientais e sociais em uma só solução (Kumar *et al.*, 2022). O biochar pode ajudar na melhoria da qualidade do solo, reduzir a liberação de gases do efeito estufa, melhorar o manejo de resíduos agroindustriais da geração de energia, melhorar a condição de saúde da população e aumentar a segurança alimentar e

nutricional em comunidades pobres (Yaashikaa *et al.*, 2020). Além disso, os custos e benefícios dessa tecnologia podem ser globais e locais. Podendo oferecer importantes oportunidades para pequenos agricultores de baixa renda, produtores de biomassa, indústrias, empresas de equipamentos e governos. E ressaltando que esse material para o tratamento de efluentes e águas de abastecimento são eficientes, assim como o carvão ativado comercial (Osman *et al.*, 2022).

Os carvões ativados comerciais são um meio eficaz para remover diversos contaminantes de água, gases e líquidos industriais. O mecanismo básico por trás da remoção de contaminante envolve alterações nas propriedades físicas e químicas do carvão, permitindo que ele capte substâncias específicas (Chi *et al.*, 2021). O custo de produção dos carvões ativados comerciais é extremamente alto, devido à complexidade do processo de produção, sendo os processos para a produção destes materiais longos e custosos (Heidarinejad *et al.*, 2020). No entanto, mesmo com o custo elevado para produzir, os carvões ativados comerciais mostram-se extremamente eficazes em lidar as mais diversas toxinas, auxiliando na qualidade do meio ambiente (Naji; Tye, 2022).

O meio ambiente sofre com a presença de uma vasta variedade de poluentes e contaminantes emergentes que, entre outros, comprometem a saúde das pessoas, dos animais, dos ecossistemas e do próprio planeta (Chandini *et al.*, 2019). Como tal, existe uma crescente necessidade de remoção destes contaminantes, no qual se utiliza o carvão ativado como uma ferramenta eficaz para esse fim, mas o custo de produção deste material limita o seu uso em larga escala. Para enfrentar esse desafio, surge a inovação tecnológica do biochar. Esta solução vem se destacando como um material eficiente para remover os contaminantes emergentes, além de apresentar um custo de produção mais acessível que o carvão ativado (Tsatsakis *et al.*, 2017).

1.1 Justificativa

A utilização de resíduos agroindustriais para a produção de biochar é uma alternativa interessante para a remoção de contaminantes emergentes presentes na água. Isso porque o biochar, além de neutralizar a presença de poluentes tóxicos, também pode servir como um meio para o armazenamento de nutrientes, pois está enriquecido com substâncias que são necessárias para o desenvolvimento da vida no solo. Além disso, a utilização de resíduos agroindustriais na produção de biochar permite aproveitar materiais que, do contrário, seriam descartados como lixo,

reduzindo assim a quantidade de lixo gerado na fabricação e a possibilidade de impactar o meio ambiente negativamente. Com isso esse trabalho se enquadra de acordo com a Associação Brasileira de Engenharia de Produção no âmbito de gestão ambiental dos processos produtivos na produção mais limpa e gestão de resíduos industriais e prevenção de poluição. O trabalho também se enquadra nos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), sendo eles: água e saneamento, vida saudável, produção e consumo sustentáveis e cidades e comunidades sustentáveis.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo geral

Avaliar um material adsorvente a partir de um resíduo agroindustrial pelo método sustentável de biochar e realizar a comparação de custos de produção com um carvão ativado comercial.

1.2.2 Objetivo específicos

- Desenvolver um adsorvente a partir de um resíduo agroindustrial pelo método de biochar;
- Caracterizar o material desenvolvido e o carvão ativado comercial;
- Realizar uma cinética química com quatro contaminantes emergentes para ambos os materiais adsorventes e realizar a comparação;
- Verificar o custo de produção de cada material adsorvente.

1.3 Delimitação do escopo

Da justificativa apresentada e dos objetivos propostos procedem a seguinte hipótese:

Desenvolver um novo material adsorvente proveniente de resíduos agroindustriais pelo método de biochar e comparar com um produto comercial. No qual poderá ser avaliado a seguinte questão: é viável a produção desse material para remoção de poluentes presentes no ambiente?

Neste sentido, o presente estudo pretende contribuir na inovação de materiais alternativos, minimizando os problemas ambientais e gestão de desenvolvimento de novos produtos a partir de um problema de resíduos que são gerados nas agroindústrias.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Agroindústria

A agroindústria é uma importante fonte de alimentos nacional e internacional visando a produção de alimentos nutritivos para serem consumidas por toda população. É considerada como uma das principais razões por trás da produção mundial de alimentos. Números apontam que cerca de 3 milhões de agricultores brasileiros estão envolvidos na agroindústria, número que tende a crescer todos os anos (Hamdani; Fatonah; Awatara, 2018). A produção de alimentos e matérias-primas derivadas é de cerca de 2,2 trilhões de dólares por ano. Além disso, a agroindústria contribui significativamente para o Produto Interno Bruto (PIB) total de vários países e especialmente no Brasil. A agricultura juntamente com a agroindústria é particularmente importante para o crescimento econômico das comunidades rurais e desenvolvimento daquela determinada região (Wardah *et al.*, 2020). A agroindústria ajuda a exportar alimentos para os consumidores nos principais mercados e pode contribuir para aumentar a disponibilidade do alimento a baixo custo. A Figura 1 demonstra diversas matérias primas que podem ser processadas nas agroindústrias.

Figura 1 - Matérias primas para serem processadas na agroindústria



Fonte: Galina (2021)

Um grande problema da agroindústria é que ela é responsável por cerca de 70% das emissões de gases de efeito estufa. No entanto, a emissão desses gases tem sido reduzida, pois a agroindústria está assumindo medidas adequadas como

práticas de agricultura conservacionista que não afetam de forma negativa o meio ambiente (Yusianto *et al.*, 2020). Os custos das operações da agroindústria são geralmente mais elevados do que de outras indústrias, pois é necessário investimento para máquinas, equipamentos e instalações. Os maiores custos gerais da agroindústria compreendem a mão de obra, combustível e energia (Bueno-Solano *et al.*, 2022).

A agroindústria é um setor produtivo global em fase de crescimento e desenvolvimento constante, constituído pelo conjunto de empreendimentos industriais dedicados à transformação, beneficiamento, conservação e comercialização de produtos agrícolas, pecuários ou aquícolas, envolvendo uma cadeia produtiva desde a produção de matérias primas, processamento, geração do produto até a sua distribuição final (Herlina *et al.*, 2022). São conhecidas como os “elos invisíveis” entre os campos agrícolas e as mesas das famílias. A agroindústria surgiu há milhares de anos com a produção de alimentos em larga escala e foi aperfeiçoada ao longo dos anos com o aparecimento da modernização na agricultura e a agricultura de precisão. Tendo o seu objetivo em aumentar a produtividade, melhorar a qualidade, ampliar a diversificação e aumentar a disponibilidade de alimentos, bem como melhorar sua distribuição ao longo de várias cadeias de mercado (Mariño; Cypriano; Tasic, 2021).

As vantagens da agroindústria são diversas, desde a criação de mais empregos em todos os setores, da produção de alimentos até o comércio global. Levando em conta a produção e a exportação de materiais agrícolas, o fornecimento de alimentos regulares às populações locais e o comércio de produtos alimentícios com alcance global, tudo com eficiência (Dovgal *et al.*, 2017). No entanto, há algumas desvantagens, a produção agroindustrial em grande escala pode levar à destruição e à degradação das florestas e à erosão dos solos, desde que sejam aplicadas de forma incorreta. Além disso, esta indústria, em particular, geralmente tende a ser altamente competitiva e exigente (Lemes *et al.*, 2022). Os custos de capital, manutenção e até mesmo de operação são mais elevados do que nas outras indústrias.

A importância da agroindústria para economia mundial é inegável uma vez que contribui para a melhoria na qualidade e disponibilidade de alimentos às populações mundiais, aumenta sua segurança alimentar, da mesma forma que possibilita a aquisição de alimentos por preços reduzidos podendo assim melhorar a qualidade de vida das pessoas, impulsionando a economia mundial (Pratiwi; Harianto; Daryanto, 2017).

Em termos de alimentação, a agroindústria é responsável por melhorar a qualidade e a quantidade de alimentos disponíveis em todo o mundo. Além disso, contribui para a segurança alimentar das populações garantindo que as pessoas tenham acesso a alimentos saudáveis, sólidos e duradouros. Finalmente, a agroindústria ajuda a desenvolver fortes suprimentos de produtos alimentícios controlados e certificados em aspectos de qualidade e ambiental por exemplo (Oktaliando; Hudoyo; Soelaiman, 2013). É inegável que a agroindústria tem se tornado cada vez mais importante para o crescimento e sustentabilidade da economia mundial, além de melhorar a alimentação da população mundial. Por meio de uma abordagem mais responsável e sustentável em relação à produção de alimentos, o setor pode colaborar para criar um mundo mais saudável e igualitário (Sari; Affandi; Abidin, 2014).

2.2 Agroindústria no Brasil

A agroindústria brasileira é crucial para o desenvolvimento econômico e social do país. Representando mais de um terço do PIB brasileiro, pois tem um importante papel na agricultura, promovendo o crescimento da economia em geral, auxiliando na melhoria dos níveis de renda das populações rurais brasileiras. A agroindústria gera emprego e produtividade para as áreas rurais e demais áreas, ajudando a alcançar o alto nível de qualidade e competitividade necessárias para a expansão da economia (Wohlenberg *et al.*, 2022). É fundamental para o desenvolvimento econômico do país e tem sido alvo das preocupações e investimentos governamentais nos últimos anos visto que o setor é responsável por uma parte considerada do PIB nacional. O setor da agroindústria já conta com mais de 8 milhões de trabalhadores de forma direta e indireta, possui responsabilidade sobre 25,3% do PIB e quase 30% das exportações brasileiras. Além disso, é responsável por cerca de 65% do uso de água potável e 80% da terra arável (Costa; Burnquist; Guilhoto, 2014).

Zeller e Schiesari (2020) relatam que em 2017/2018, o número de empresas agroindustriais de porte grande, médio e pequeno foi de 102.674, mostrando um aumento de 5,5% em relação a 2016/2017. Entre elas, há a representação de todos os setores agroindustriais, tais como o agronegócio, a conservação de alimentos, a produção de alimentos processados e embalados, entre outros. Em 2019, a agroindústria brasileira apresentou um aumento na receita real de 4,3%, aumento de 3,7% na produção real e redução de 0,5% na média de custos de produção. Em 2022,

o setor apresentou um aumento na exportação total de alimentos, bens e serviços agroindustriais de 21,9%, totalizando o valor de US\$ 92,8 bilhões. Um dos principais países importadores de produtos agroindustriais brasileiros foram os Estados Unidos, representando cerca de 20% do total exportado (Viola; Mendes, 2022).

Em relação às importações, a agroindústria brasileira também obteve resultados expressivos, com um aumento de 5,7%. O total importado foi de US\$ 17,5 bilhões sendo que o principal parceiro foi a Argentina, com cerca de 24% das compras. Sendo assim, é visível que o setor agroindustrial tem grande papel no PIB e desenvolvimento econômico do Brasil, e com uma tendência alta de crescimento nos próximos anos (Patias *et al.*, 2021). É importante ressaltar que os investimentos governamentais neste setor têm garantido taxas elevadas de crescimento no PIB, emprego gerado e maior diversificação de produtos agroindustriais oferecidos ao mercado.

A agroindústria está diretamente relacionada com a globalização e o capitalismo. A internacionalização do comércio e a integração de mercados de bens e serviços através das modernas tecnologias de informação contribuem para o aumento da produtividade, redução de custos e aumento da competitividade do setor. Os principais setores que impulsionam a agroindústria no Brasil são a soja, o milho, o feijão, o algodão e a cana de açúcar. Os produtos resultantes destes setores são processados para criar biodiesel, biocombustível, alimentos processados, e diversos outros produtos agrícolas (Caldarelli; Perdigão, 2018).

Outro papel importante da agroindústria brasileira é o incremento dado à produção de energia elétrica a partir da biomassa. Através da utilização destes recursos renováveis, a agroindústria brasileira pode contribuir para a redução dos impactos ambientais causados pelas fontes tradicionais de energia. Além disso, a agroindústria também contribui para melhoria da qualidade de vida da população. Isso porque ela gera renda, o que, consequentemente, aumenta o poder aquisitivo e melhora o nível de vida das famílias brasileiras (Fernandes; Lobão; Vale, 2009).

2.3 Resíduos gerados na Agroindústria

Os resíduos gerados representam um grande problema para o meio ambiente já que podem conter componentes químicos tóxicos, radioativos, biológicos e metais pesados, além de outros materiais prejudiciais à saúde humana e ao meio ambiente. Esses resíduos são geralmente vastos e diversificados. Em termos financeiros, são

cifrados em bilhões de dólares anualmente em todo o mundo. Por exemplo, os resíduos provenientes do processamento de alimentos industriais consistem principalmente de pequenos materiais, incluindo cascas, extrato de plantas, grãos e outros componentes, representam um custo significativo para as empresas agroindustriais, pois eles precisam ser tratados e descartados corretamente, o que pode gerar custos adicionais para a empresa em questão (Solís Jiménez; Cervantes; Turpin Marion, 2019).

Por outro lado, os resíduos orgânicos da agricultura podem ser transformados em vários tipos de materiais ecológicos, como por exemplo: bioplásticos e biocombustíveis, o que pode oferecer uma oportunidade financeira significativa para as empresas agroindustriais. Além disso, os resíduos orgânicos da agricultura podem ser utilizados para produção de fertilizantes, adubos e compostagem, o que pode proporcionar uma economia significativa de custos (Santos *et al.*, 2021).

Um dos principais problemas relacionados aos resíduos gerados pela indústria é o custo elevado para o armazenamento adequado. Este custo é significativamente maior do que o custo de tratamento adequado e a descarga destes resíduos em um local apropriado. Além disso, a disposição inadequada destes resíduos também pode levar a danos ao meio ambiente, sejam eles terrestres ou aquáticos. Os rejeitos radioativos podem contaminar o solo e água de rios e lagos, resultando em problemas graves de saúde em longo prazo para os seres humanos e animais que vivem na área (Gaspar *et al.*, 2020).

O impacto ambiental causado pelo descarte inadequado desses resíduos agroindustriais também é muito importante. Almaraz-Sánchez *et al.* (2022) mostraram que a descarga destes resíduos em águas diminui a qualidade destas e leva à contaminação da fauna e flora aquáticas. Além disso, os rejeitos agroindustriais também representam um grande risco para o meio ambiente e para a saúde humana, pois eles podem se infiltrar nas camadas mais profundas do solo, contaminar fontes de água e afetar também a qualidade do ar.

Portanto, medidas rigorosas devem ser tomadas para lidar com os resíduos gerados pela agroindústria. A aplicação de políticas de prevenção modernas e práticas de tratamento é uma das principais medidas para evitar que esses rejeitos sejam descartados em locais inadequados. Além disso, o aumento da conscientização sobre os problemas ambientais gerados pela indústria também pode contribuir para

diminuir a quantidade de rejeitos industriais gerados e descartados de forma irresponsável (Basanta *et al.*, 2007).

2.4 Poluentes emergentes

São compostos químicos que geralmente não são monitorados por órgãos públicos ou regulamentadores, e que conseqüentemente podem apresentar grandes efeitos negativos ao meio ambiente e aos seres humanos. Esses compostos químicos podem estar presentes em uma vasta variedade de produtos comerciais e que são utilizados em grandes quantidades diariamente, como embalagens de alimentos, produtos de higiene, aditivos industriais, pesticidas, fármacos entre outros (Geissen *et al.*, 2015).

Contrariamente dos poluentes orgânicos persistentes, os poluentes emergentes não necessitam estar no ambiente para que algum efeito negativo seja causado já que sua alta capacidade de transformação e remoção é reparada pela constante introdução do mesmo no ambiente (Petrović; Gonzalez; Barceló, 2003; Rodriguez-Narvaez *et al.*, 2017).

Esses poluentes uma vez no ambiente são distribuídos rapidamente e alcançam os corpos hídricos, os quais se tornam um grande problema para as estações de tratamento de água (ETA) e estações de tratamento de efluentes (ETE), que, na maioria das vezes, não são efetivas para remover esses tipos de substâncias (Luo *et al.*, 2014). Quando esses poluentes alcançam as ETAs e ETEs, podem entrar em contato com substâncias químicas sintéticas e geralmente promover algum tipo de reação, podendo formar outros produtos que também impacta o ambiente, resultando em produtos ainda mais tóxicos e persistentes (Farré *et al.*, 2008).

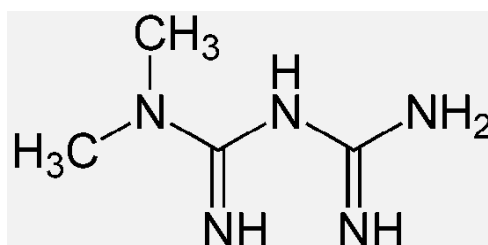
Bolong *et al.* (2009) relatam que existem três grandes problemas relacionados aos poluentes emergentes. O primeiro problema consiste no fato de que determinada substância apresenta uma maneira e seu mecanismo de ação, o qual dificulta a avaliação e a identificação dentro das matrizes ambientais. O segundo problema é pela falta de valores máximos permitidos em legislação de forma que nenhuma ou muito pouca precaução e monitoramento são determinados para garantir que essas substâncias não sejam despejadas em corpos hídricos. O terceiro problema relatado é a preocupação desses poluentes emergentes serem considerados desreguladores endócrinos e estão em constante crescimento, pois a maioria deles é persistente ao ambiente.

Grande parte dos poluentes emergentes que recebem pouca atenção são os princípios ativos de produtos para usos pessoais, farmacêuticos, pesticidas, corantes e metais pesados. Com isso, serão apresentados de forma mais detalhada os seguintes contaminantes: metformina, diuron, azul de metileno e chumbo.

2.4.1 Metformina

A metformina ($C_4H_{11}N_5$), cuja fórmula molécula é apresentada na Figura 2, pertence à classe das biguanidas dos medicamentos antidiabéticos orais podendo melhorar a ação da insulina sem ganho de peso (Chaudhury *et al.*, 2017).

Figura 2 - Estrutura molecular da metformina



Fonte: Autoria própria (2024)

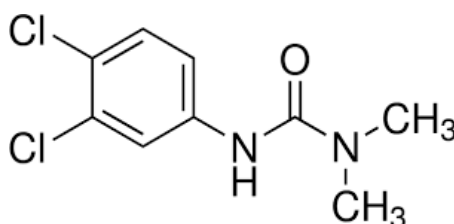
É um dos medicamentos mais eficazes para o tratamento de diabetes tipo 2, sendo muito utilizada para tratar o diabetes em adultos desde 1957. A dose diária de metformina é geralmente de 2 gramas (Cho *et al.*, 2018). A Organização Mundial da Saúde (OMS) relata que mais de 119 países do mundo utilizam esse medicamento e mais de 90% dos países da América e Europa fazem seu uso. No total, mais de 200 milhões de pessoas em todo mundo estão consumindo metformina como um medicamento antidiabético (Kyzas *et al.*, 2015).

Sua principal função é o controle glicêmico, mas possui outras funções como o controle no crescimento de células cancerosas. Os aspectos farmacocinéticos clinicamente relevantes da metformina são: absorção de 50 a 60%, tempo de meia-vida de aproximadamente seis horas, pico de ação de uma a três horas, efeito máximo de duas semanas, eliminação de 90% via renal e é um fármaco dialisável (Rojas; Gomes, 2013).

2.4.2 Diuron

Diuron é um herbicida de amplo uso em agricultura e sua estrutura molecular é apresentada na Figura 3. Sua fórmula molecular é $C_{12}H_{14}N_2O_2Cl_2$, sendo classificado como um dialil-ureia clorado. Dentre suas propriedades químicas, destaca-se por se tratar de um organoclorado resistente à desiodificação, o que impede a sua degradação (Angly *et al.*, 2016).

Figura 3 - Estrutura molecular do diuron



Fonte: Autoria própria (2024)

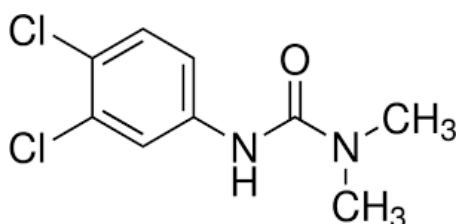
O uso do diuron se dá tanto para produção agrícola quanto para produção florestal. Age como inibidor da multiplicação da clorofila, afetando principalmente a germinação das sementes. O diuron também é utilizado como descalcificador em sistemas de aquecimento de água (Villaverde *et al.*, 2017).

No meio ambiente, entretanto, o diuron se torna extremamente persistente no solo, até sua acumulação nos organismos. A contaminação do solo e das águas subterrâneas por esse agrotóxico é extremamente prejudicial, especialmente para animais aquáticos e animais de sangue frio, que ficam mais expostos ao problema (Jones *et al.*, 2003). Para reduzir os problemas de contaminação, estudos determinam que haja normas de manejo do diuron, como a aplicação apenas em tratamentos específicos, a não utilização além da dose necessária, a não realização de aplicação próxima a águas superficiais e nascentes hídricas e o uso correto dos equipamentos de proteção individual (EPI) para todos os operadores que possam manusear o diuron. Também é necessário incentivar o uso de práticas de controle da erosão de modo que evitem a contaminação dos corpos hídricos (Kamarudin *et al.*, 2020).

2.4.3 Azul de Metileno

Azul de metileno é um produto sintético químico usado para tratamento de água. Sua estrutura molecular é demonstrada na Figura 4. Sua fórmula molecular é $C_7H_8N_2$. É utilizado como corante em alguns processos de tingimentos têxteis, alimentos entre outros processos, o azul de metileno é estável em condições ácidas e geralmente solúvel em água (Khan *et al.*, 2022).

Figura 4 - Estrutura molecular do azul de metileno



Fonte: Autoria própria (2024)

É utilizado como indicador para auxiliar no controle de bactérias, eliminar odores e reduzir o teor de ferro presente em efluentes e outros sedimentos. Um dos seus usos é como agente químico de limpeza de piscinas, mas, em altas concentrações, pode ser tóxico, ocasionando sérios problemas aos usuários das piscinas e para o meio ambiente. Além disso, seu uso não é seguro quando diluído incorretamente (Alver; Metin; Brouers, 2020).

A contaminação por azul de metileno no meio ambiente pode afetar as águas residuais, o solo e a vida aquática. A exposição recorrente de curto prazo pode causar irritação da pele e olhos, inchaço da garganta, tosse persistente ou ainda dores de cabeça. Além disso, também pode contribuir com problemas crônicos de saúde, como câncer, doenças do sistema reprodutivo e problemas no funcionamento do sistema neurológico (Oladoye *et al.*, 2022).

Segundo Adogaye *et al.* (2021), estima-se que, a cada ano, em torno de 8 bilhões de litros de águas residuais são gerados mundialmente com concentrações significativas de azul de metileno. Esta contaminação pode levar a um aumento das concentrações desta substância nos lagos, rios e demais corpos hídricos, provocando graves impactos na qualidade da água. Por isso, além de reduzir ao máximo o uso

desse produto químico, é necessário adotar medidas que possam prevenir a contaminação do meio ambiente.

2.4.4 Chumbo

O chumbo é um metal pesado formado por átomos de Pb, que é encontrado naturalmente perto da superfície da Terra, apresentado na Figura 5:

Figura 5 - Estrutura do chumbo



Fonte: FSP-USP (2021)

É um elemento químico que possui baixa estabilidade química, o que significa que reage facilmente com vários elementos, e seus íons podem formar produtos diferentes de reação. É altamente resistente à corrosão e altamente condutivo. As reações químicas do chumbo são empregadas para a fabricação de materiais de construção como telhas de chumbo e vidros pigmentados (Schuhmacher; Kuester, 2012).

A contaminação do ambiente por chumbo é extremamente prejudicial, podendo penetrar no solo, água e ar, e, se exposto às concentrações mais elevadas, pode causar problemas nos sistemas respiratórios, reprodutivo e nervoso central (LIN *et al.*, 2015). A exposição ao chumbo tem sido associada a problemas cancerígenos, danos ao fígado, rim, sistemas respiratórios e desenvolvimento neurológico em crianças. Devido a estes efeitos nocivos à saúde, existem normas regulamentadoras em vigor em todo o mundo que limitam a quantidade de chumbo no ar, solo e água (Venezs; Dóry; Raišienė, 2022). Estes regulamentos têm desempenhado um papel importante na redução da contaminação por chumbo e têm permitido a melhoria das condições

ambientais. Os parâmetros de contaminação por chumbo devem ser mantidos para garantir que as concentrações não ultrapassem os limites estabelecidos (GÜRKAN, 2014).

2.5 *Moringa oleifera* Lam

A *Moringa oleifera* Lam. pertence à família das Moringaceae. Trata-se de uma planta de tamanho médio e que possui apenas um gênero e 14 espécies. Sua origem é do norte da Índia, porém é encontrada em Cuba, Egito, Filipinas, Jamaica, Malásia, Nigéria, Paquistão, Singapura e Tailândia. A planta se adapta em qualquer tipo de solo, principalmente em regiões tropicais, não é exigente a água. Fotografias são apresentadas na Figura 6 (Araújo *et al.*, 2010; Ndabigengesere; Narasiah; Talbot, 1995).

Figura 6 - *Moringa oleifera* Lam. (A) Árvore, (B) Flores, (C) Vagens, (D) Casca da semente, (E) Semente



Fonte: Araújo *et al.* (2010)

A *Moringa oleifera* Lam é utilizada em diversos usos, principalmente na culinária e na medicina fitoterápica. São utilizadas praticamente todas as partes da planta: sementes, flores, folhas, raízes e cascas, podendo ser utilizadas como alimento, preparação de cosméticos, lubrificantes mecânicos, para fins medicinais e terapêuticos e para elaboração de biodiesel (Ghasi; Nwobodo; Ofili, 2000; Fuglie, 2001; Abaliwano; Ghebremichael; Amy, 2008).

Há alguns anos tem-se estudado o potencial de suas sementes como coagulante natural e auxiliador de floculação no tratamento de água devido ao seu conteúdo proteico e seu potencial de adsorção de poluentes orgânicos (Akhtar *et al.*, 2007). De acordo com Pritchard *et al.* (2010), as sementes de *Moringa oleifera* Lam possuem uma proteína solúvel, um polieletrólito catiônico natural que provoca a coagulação. Diversos pesquisadores concluíram que estas se destacam como um dos mais promissores coagulantes naturais (Baptista *et al.*, 2015; Cardoso Valverde *et al.*,

2018; Madrona *et al.*, 2012; Nishi *et al.*, 2011). Outros pesquisadores desenvolveram esse coagulante natural magnético, potencializando ainda mais o coagulante e permitindo o reuso do mesmo (Santos *et al.*, 2018; Mateus *et al.*, 2018).

Alguns pesquisadores têm utilizado partes de *Moringa oleifera* Lam como sementes, vagens, folhas, flores, e cascas da semente para o processo de bioadsorção de poluentes inorgânicos e orgânicos. Alguns trabalhos são citados abaixo.

Reddy *et al.* (2011) empregaram um tratamento químico nas folhas de moringa para bioadsorção de Cd (II), Cu (II) e Ni (II). Os autores utilizaram NaOH seguido de ácido cítrico para o tratamento. As máximas capacidades de adsorção encontradas foram 171,37 mg g⁻¹ para Cd (II), 167,90 mg g⁻¹ para Cu (II) e 163,88 mg g⁻¹ para Ni (II). Esses resultados foram relativamente satisfatórios, pois essa remoção se manteve durante quatro ensaios consecutivos de bioadsorção e dessorção.

Meneghel *et al.* (2013) avaliaram as sementes de moringa na bioadsorção de cádmio. Nesse estudo, o pH neutro resultou na melhor adsorção utilizando 400 mg de bioadsorvente em contato com a solução por 160 min, atingindo-se uma capacidade máxima de adsorção de 7,864 mg g⁻¹.

Reck *et al.* (2018) utilizaram as sementes de moringa com bioadsorvente para remoção do corante tartrazina. Os autores obtiveram remoção do corante de 95% com capacidade máxima de adsorção de 91,27 mg g⁻¹ a 15 °C. Os autores realizaram estudos comparativos com carvões ativados e concluíram que o material produzido é de baixo custo e mais eficiente que os demais adsorventes.

Wernke *et al.* (2018) estudaram a remoção do herbicida diuron com as cascas in natura da moringa em coluna de leito fixo. Foi obtida uma remoção máxima de 47,44% na vazão de 1 mL min⁻¹ com um tempo de saturação de 690 minutos.

Alsharaa *et al.* (2016) avaliaram a adsorção de halo-éteres, trihalometanos e halo-cetonas pelas sementes in natura da moringa. Após 50 minutos de contato entre o adsorbato e o bioadsorvente, aproximadamente 95, 91 e 89% de halo-éteres, trihalometanos e halo-cetonas foram adsorvidos, respectivamente. Obtiveram-se capacidades de adsorção de 115,5 a 120,5 mg g⁻¹ para os contaminantes.

Bezerra *et al.* (2018) avaliaram as cascas da semente da moringa tratadas químicas e termicamente para remoção do herbicida diuron. Os autores estudaram duas concentrações no estudo cinético e obtiveram a maior capacidade máxima de adsorção de 14,74 mg g⁻¹ na temperatura de 45 °C em pH 5.

Cusioli *et al.* (2019) estudaram as cascas das sementes da moringa tratadas com metanol 0,1 mol L⁻¹ e ácido nítrico 0,1 mol L⁻¹ e termicamente a 300 °C por uma hora, resultando em um carvão para remoção do herbicida atrazina. Os autores registraram 70% de remoção e uma capacidade máxima de 10,32 mg g⁻¹ na temperatura de 45 °C, sendo o equilíbrio atingido em 18 horas.

Com isso, pode-se verificar o potencial do resíduo agroindustrial gerado pelas diferentes partes da *Moringa oleifera* Lam para remoção de diversos contaminantes presentes em soluções aquosas.

2.6 Adsorção

Atualmente, um dos processos mais utilizados para a remoção de poluentes orgânicos, contemplando os fármacos, é a adsorção, devido a sua natureza universal, facilidade de operação e custo (Ali, *et al.*, 2012). O processo de adsorção pode ser definido como uma operação unitária de transferência de massa do tipo sólido-fluido onde certos sólidos possuem a capacidade de concentrar, em sua superfície, determinadas substâncias existentes em soluções gasosas ou líquidas. Considerando-se tal afirmação, quanto maior for esta superfície externa por unidade de massa sólida mais efetiva será a adsorção. Dessa forma, geralmente os adsorventes são sólidos com partículas porosas (Ruthven, 1985).

O mecanismo de adsorção pode ser explicado por meio de três etapas consecutivas (Nascimento *et al.*, 2014):

- Transferência de massa externa: corresponde à transferência de moléculas do fluido para a superfície externa da partícula adsorvente, por intermédio de uma camada de fluido que envolva a partícula;
- Difusão no poro: é a etapa ocasionada pela difusão de moléculas do fluido para o interior dos poros;
- Difusão na superfície: etapa em que ocorre a difusão das moléculas totalmente adsorvidas ao longo das superfícies dos poros.

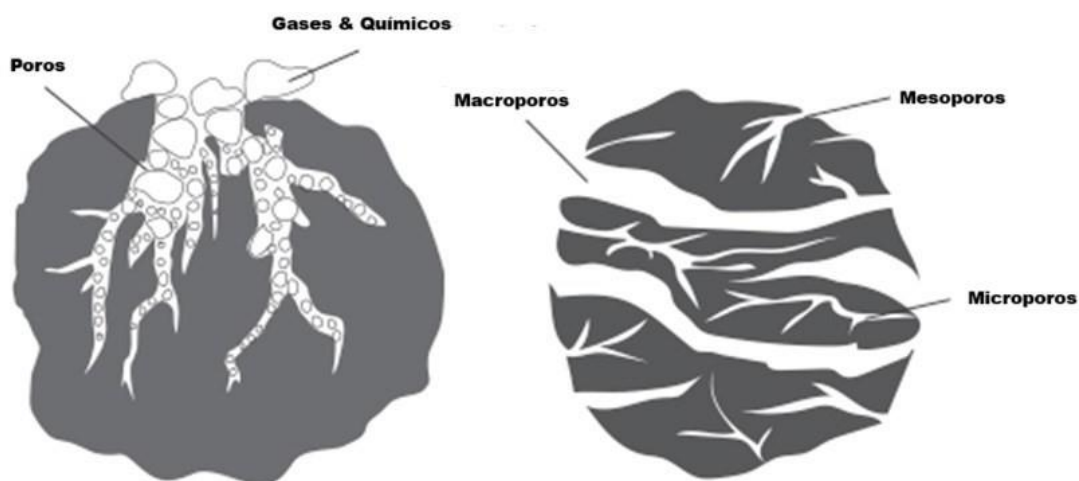
O processo de adsorção pode ser classificado em dois tipos quanto a sua intensidade: física e química. No processo de adsorção física, a ligação entre a superfície do adsorvente e o adsorbato é considerada relativamente fraca, podendo ser atribuída às forças de Van der Waals. Já o processo de adsorção química envolve

partilha ou troca de elétrons, sendo caracterizada uma possível ligação química mais forte em relação ao processo de adsorção física (Nascimento *et al.* 2014).

Com relação ao tratamento de água, o processo ocorre entre um adsorvente sólido e a água contaminada. O poluente em solução é chamado de adsorbato, e o sólido de adsorvente. O processo de adsorção é um dos mais eficientes tratamentos de águas para consumo e águas residuárias, sendo empregado a fim de reduzir os níveis de compostos tóxicos no ambiente a valores toleráveis (Moreira *et al.*, 2016). As principais vantagens da adsorção em processos de tratamento é que sua natureza universal, seu baixo custo e facilidade de operação e eficiência podem resultar em uma capacidade de remoção de contaminantes de 99,9% (Ali *et al.* 2012).

Na Figura 7 pode ser observado como se dá o acúmulo de gases e substâncias químicas (adsorbato) na superfície de um sólido poroso (adsorvente), esquematizando o processo de adsorção. A figura mostra três tipos de poros: macroporos, mesoporos e microporos. De acordo com (Ruthven 1985), os macroporos possuem tamanho maior que 500 Å, os mesoporos, entre 20 e 500 Å e os microporos, menores que 20 Å.

Figura 7 - Esquema do processo de adsorção



Fonte: Adaptado de Nascimento (2014)

2.7 Adsorventes comerciais

Os adsorventes comerciais (Figura 8) são materiais que podem adsorver, ou reter, diversas substâncias em sua superfície. São usados na indústria como meio de filtração para remover diversos contaminantes da água, como o metano, ácidos orgânicos voláteis e outras substâncias.

Figura 8 - Adsorvente comercial



Fonte: BahiaCarbon (2014)

Os adsorventes comerciais são geralmente disponíveis em diferentes formas, tais como granulados, blocos, de carvão ativado ou outros materiais sólidos. O carvão ativado é uma das formas mais comuns de adsorvente comercial, com granulados de carvão sendo usados em diversas aplicações (Silva *et al.*, 2020), são úteis para a remoção de gases e odores indesejáveis, bem como outras substâncias químicas, tratamento de águas e efluentes, entre outras funcionalidades (Laredo *et al.*, 2016).

Além disso, os adsorventes comerciais também são usados para remoção de sais, metais, pesticidas, e outras substâncias nocivas da água. São geralmente usados em uma variedade de métodos de tratamento, tais como filtração, adsorção, e osmose reversa. Todos esses métodos são projetados para remover os materiais desejados da água, com o objetivo de manter a qualidade da água nos padrões que são estabelecidos por normas regulamentadoras (Luo *et al.*, 2017). Os adsorventes comerciais podem ser reutilizados após seu uso inicial, no entanto é importante certificar-se de que os materiais que estão sendo reutilizados não contenham substâncias químicas tóxicas que possam contaminar outras amostras (Tsai *et al.*, 2008).

Os adsorventes comerciais são obtidos de empresas que produzem esse material com soluções comerciais específicas para cada necessidade, a fim de garantir a melhor e mais segura qualidade dos materiais produzidos. Alguns desses produtos também são usados em outras aplicações como, por exemplo, a purificação do ar (Hasdemir *et al.*, 2022).

2.8 Biochar

Biochar é o produto natural de baixo impacto ambiental obtido a partir de um processo de conversão térmica de uma determinada biomassa na ausência de

oxigênio, que vem sendo cada vez mais utilizado como meio de aumentar a fertilidade dos solos, a quantidade de nutrientes encontrados nele e o uso desse material como adsorvente natural (Xie *et al.*, 2022). O biochar é produzido a partir de biomassa oriunda de agroindústria como madeira, restos de culturas, palha, excrementos animais, resíduos industriais e de alimentos. A Figura 9 demonstra algumas aplicações do biochar.

Figura 9 - Uso do biochar na remediação de água e solos



Fonte: Biotec (2014)

Esta biomassa é produzida à baixa temperatura, altas pressões e com o controle adequado da quantidade de ar envolvido. O biochar é caracterizado por apresentar uma textura semelhante à porcelana, em que seus poros são constituídos de muito carbono, fato esse que auxilia muito para o processo de adsorção. Essa rica estrutura de carbono torna o biochar capaz de armazenar nutrientes e água durante mais tempo do que outros produtos agrícolas. Tal estrutura também é amplamente considerada como um importante substrato para microrganismos, permitindo o crescimento saudável de fungos e bactérias benéficas à agricultura (Tomczyk; Sokołowska; Boguta, 2020).

Além disso, o biochar também pode ajudar na redução de carbono, pois, ao reter o carbono na forma estável, faz com que não haja a permissão que ele retorne à atmosfera, dessa forma, reduzindo o aquecimento global. De fato, o uso de biochar para devolver nutrientes ao solo tem provado ser uma ótima forma de sequestrar o carbono que é liberado para a atmosfera (Buss *et al.*, 2022). Outra vantagem do

biochar é a capacidade de aumentar a resistência dos solos quando expostos a temperaturas mais elevadas, devido aos altos níveis de silício e alumínio, que ajudam a estabilizar as temperaturas do solo. E possui potenciais para melhorar os níveis de pH do solo, tornando-o mais adequado para determinadas culturas, como hortaliças e plantas ornamentais (Maroušek *et al.*, 2023).

É importante destacar que o uso do biochar deve ser realizado com cuidado para que não sejam desperdiçados os benefícios que ele oferece. Por isso, é importante garantir que o biochar seja bem incorporado ao solo antes da aplicação. Além disso, é fundamental monitorar adequadamente as quantidades aplicadas e os nutrientes liberados, pois a aplicação excessiva pode resultar em algumas deficiências nutricionais (Hagemann *et al.*, 2018).

2.9 Custo de produção

Custo de produção é o montante total de todos os gastos diretos e indiretos provenientes da produção de determinado produto ou serviço. Estes custos podem incluir custos industriais, distribuição, marketing, produtos, serviços, materiais, serviços gerais, manutenção, impostos, salários, seguros, outros custos administrativos, transporte, seguros e outros. Estes custos são normalmente divididos em três categorias principais: custos diretos, indiretos e de operação (Acién *et al.*, 2012).

Custos diretos são aqueles gastos que podem ser vinculados diretamente ao processo de fabricação de um produto ou serviço. Estes custos incluem o custo dos materiais necessários para a fabricação por meio de compra, manufatura, aluguéis, comissões e outros. Estes custos também incluem equipamentos, matérias-primas, mão de obra direta e outros custos de produção, são os mais fáceis de se identificar e controlar, pois, estão diretamente relacionados ao processo de fabricação de um produto (Kaiser, 2021).

Custos indiretos são gastos solicitados no processo de fabricação de um produto ou serviço que não são associados diretamente ao processo. Estes custos indiretos incluem gastos com finanças, custos administrativos, marketing, logística, segurança, seguros, fretes, instalações e outros (Devaraj; Syron; Donnellan, 2020).

Custos de operação são aqueles gastos incorridos no processo operacional que diretamente afetam o processo de fabricação do produto ou serviço. Estes custos incluem salários, horas extras, custos de treinamento, custos de transporte, luz, água,

limpeza, serviços de reparação, segurança, manutenção, materiais de escritório e equipamentos, todos os quais são necessários para manter a empresa funcionando (Wu *et al.*, 2019).

Ao calcular o custo de produção de um produto ou serviço, é importante incluir todos os custos diretos, indiretos e operacionais. Estes gastos devem ser documentados e armazenados para fins de auditoria e relatórios contábeis, para que possam ser verificados quais são os custos reais da fabricação de um produto. Como esses custos mudam conforme o produto e a escala de fabricação, os gerentes de produção devem monitorar os custos de produção constantemente para garantir que eles sejam os mais baixos possíveis (Raineri; Stivari; Gameiro, 2015).

O custo de produção fornece informações importantes para tomada de decisão para a empresa e para os clientes. Por meio dele, as empresas podem determinar o preço adequado para seus produtos ou serviços, bem como monitorar o desempenho de seus processos de produção. Por outro lado, os clientes são fornecedores de informações importantes para a empresa por meio do custo de produção, pois esta medida os ajuda a avaliar o valor de um produto ou serviço relativo ao de outros. Dessa forma, é possível determinar o preço justo de um produto ou serviço (Boulamanti; Moya, 2017).

A redução do custo de produção é crucial para a promoção do sucesso de uma empresa. Para alcançar esta meta deve-se primeiro entender como calcular o seu custo de produção e o que contribui para que esse custo fique alto ou baixo. Algumas das medidas principais que as empresas podem tomar para reduzir seus custos de produção incluem o aperfeiçoamento dos processos de produção, o uso de materiais mais eficientes, a contratação de mão de obra mais experiente e qualificada, utilização de tecnologia de fabricação de ponta e formação de parcerias com fornecedores para negociar melhores preços. Além disso, as empresas também podem reduzir seus custos de produção ao aperfeiçoar melhor seus processos de distribuição, manter seus produtos e serviços atualizados e inovar constantemente (Tanrisever *et al.*, 2021).

O custo de produção de material adsorvente é um dos fatores de maior importância na escolha do material apropriado para a aplicação desejada e para a maximização da eficiência da produção. O custo total de um material adsorvente engloba a seleção dos materiais básicos, bem como sua aquisição, processamento e manuseio (Soundararajan; Janardhan Reddy, 2019). No que se refere à seleção, o

primeiro passo é a identificação de qual é o material básico mais apropriado. As características químicas e físicas deste material são determinantes do nível de adsorção, sendo necessário ter em conta fatores como a capacidade de adsorção, resistência física e estabilidade química. Além disso, deve ser avaliado o nível de reciclar, processamento e a necessidade desses materiais para determinar o seu respetivo custo (Kovács, 2020).

Na sequência, a sua aquisição poderá ser feita de matérias-primas de processadores locais ou da aquisição ao abrigo de contratos em longo prazo com fornecedores externos. As quantidades necessárias, as características técnicas específicas exigidas e a reputação dos fornecedores locais se revelam fatores decisivos para a avaliação da melhor opção de aquisição. Durante todo o processo, devem ser estudadas as técnicas mais adequadas para a preparação do material adsorvente, adaptando-o às necessidades específicas implementadas (Geng; Krishnan; Sohoni, 2022). Esta parte do processo abrange o que se denomina processamento, que será definido pelas variações, por exemplo: na pressão, temperatura ou concentração. Estas alterações aplicadas ao material afetam diretamente as suas propriedades, logrando-se o produto final desejado (ELIA *et al.*, 2021).

O custo da produção de material adsorvente está objetivamente ligado aos custos em todas as etapas, e cada uma delas deve ser avaliada e considerada durante a tomada de decisão. O conhecimento das técnicas relevantes, bem como dos processos de fabricação já desenvolvidos, juntamente com a análise custo-benefício dos materiais em questão, é essencial para se escolher a melhor opção num cenário de competitividade cada vez maior (Mpwanya; Van Heerden, 2017; Tortorella *et al.*, 2022).

3 METODOLOGIA

3.1 Reagentes

Para a realização do trabalho, foram utilizados os seguintes reagentes: metformina com pureza de 99% (Sigma-Aldrich®), diuron com pureza de 99% (Sigma-Aldrich®), azul de metileno com pureza de 99% (Neon) e chumbo solução 99% (ACS). O carvão ativado comercial foi doado pela empresa Carbontec®, sediada na cidade de Maringá - Paraná.

3.2 Preparação das soluções

As soluções de contaminantes foram fixadas na concentração de 30 mg L⁻¹, nas quais foram diluídas separadamente em balão volumétrico de 1 L e completadas com água deionizada, sob agitação constante para que fossem completamente dissolvidas e que consequentemente foram utilizadas para os estudos.

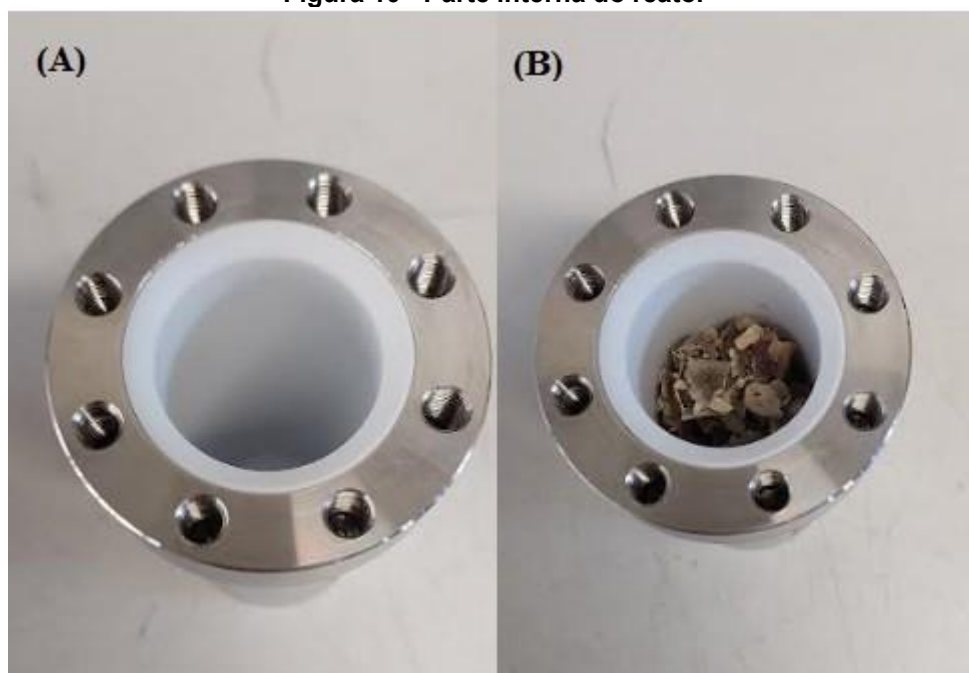
3.3 Preparo das cascas da semente de *Moringa oleifera* Lam

Os resíduos agroindustriais das cascas das sementes de *Moringa oleifera* Lam. (MO) foram doadas pela Universidade Federal de Sergipe, Aracajú - SE. Foram selecionadas as cascas de boa qualidade, que foram consequentemente trituradas em liquidificador industrial (Poli LS04MB). Após a trituração, as cascas foram lavadas com água deionizada a uma temperatura de 60 ± 10 °C para remover as impurezas grosseiras presentes e foram secas em estufa microprocessada com circulação de ar (Temporizador Digital SX CR/42) a 105 °C durante 12 horas (Akhtar *et al.*, 2007; Zafar *et al.*, 2015).

3.4 Preparo do biochar

Após esse processo, o material foi homogeneizado e os resíduos da MO foram introduzidos no reator digital vertical, na proporção de 1:100 (m/v), conforme apresentado na Figura 10.

Figura 10 - Parte interna do reator



Fonte: Autoria própria (2024)

Na Figura 10 (A) é apresentada a parte interna do reator sem o material a ser processado e na Figura 10 (B), verifica-se a MO com água deionizada dentro do reator para iniciar o processo.

Ao final dessa etapa inicial, na qual foi introduzido o material a ser processado, o reator foi fechado com auxílio dos parafusos, vedando-o totalmente. O reator foi ajustado para operar em temperatura de 100 °C à pressão de 3 bar, por 6 horas, conforme demonstrado na Figura 11.

Figura 11 - Reator completo para a produção do biochar



Fonte: Autoria própria (2024)

Na Figura 11 (A) é representado o temporizador do equipamento, o qual contabilizará o tempo necessário para a reação. Na Figura 11 (B), é apresentado o termômetro digital acoplado com o sensor de temperatura que fica internamente no reator. A Figura 11 (C) mostra o reator hidrotermal e a Figura 11 (D) é o manômetro que controla a pressão.

Após o término da reação, o material foi resfriado naturalmente para temperatura ambiente, sendo o material sólido produzido separado da fase aquosa por filtração, consequentemente lavados com água deionizada, até pH próximo a 6, e seco em estufa por 24 horas a 105 °C. Depois disso, o material foi separado por granulometria.

3.5 Distribuição granulométrica do bioissorvente

Para verificar a distribuição granulométrica dos bioissorventes, utilizaram-se 30 gramas do bioissorvente e um conjunto de peneiras com Mesh de 20, 28, 35, 48 e 60. As amostras permaneceram em uma mesa vibratória até massa retida em cada peneira permanecer constante. A fração de sólidos ($\Delta\phi$) foi calculada pela Equação 1.

$$\Delta\varphi = \frac{\text{massa de adsorvente retida na peneira (g)}}{\text{massa total de adsorvente retida no conjunto de peneiras (g)}}$$

O diâmetro de abertura de cada peneira está apresentado na Tabela 1.

Tabela 1 - Diâmetro das peneiras utilizadas para a análise de distribuição granulométrica

Diâmetro de peneira (Mesh)	Diâmetro de abertura (µm)
20	850
28	600
35	425
48	300
60	250

Fonte: Autoria própria (2024)

3.6 Caracterização dos adsorventes

Ao carvão ativado comercial e ao adsorvente MO foram aplicadas diversas técnicas para caracterizá-los quanto à sua composição textural, estrutural, morfológica e química. A análise do Potencial Zeta foi realizada em analisador de partículas DelsaTMNanoC (Beckman Coulter), utilizando a proporção 1:1 (m/v) na faixa de pHs de 2 a 12, utilizando soluções de HCl e NaOH ambas em 0,1 mol L⁻¹. Análises de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) foram realizadas em Microscópio Eletrônico de Varredura de Emissão de Campo, Quanta 250 - FEG (FEI Company). Para condução das análises, as amostras foram revestidas com ouro na espessura de aproximadamente 30 nm.

Para a realização da fisissorção de N₂ (modelos BET e BJH), as amostras foram previamente secas em estufa por 24 horas a 100 °C, e em seguida submetidas à análise das isotermas de adsorção/dessorção registradas na temperatura do nitrogênio líquido utilizando o equipamento Nova 2000e (Quantachome).

As amostras passaram por um pré-tratamento a 120 °C por 6 h onde foram deixadas em vácuo para retirada de toda umidade e espécies adsorvidas da superfície do material. A Espectroscopia no Infravermelho com Transformada de Fourier (FTIR) foi utilizada para identificar os grupos funcionais presentes nos materiais estudados, em espectrofotômetro Vertex 70v (Bruker). Para obtenção dos pellets que foram inseridos no equipamento para obtenção dos resultados, foram misturados em KBr na proporção de 1:250 (m/m), na faixa espectral de 4000 a 400 cm⁻¹.

3.7 Estudo cinético e equilíbrio químico de cada contaminante estudado

Os estudos cinéticos e de equilíbrio foram realizados por meio de testes em batelada separadamente para cada adsorvente, nos quais foram utilizados 0,03 g de MO e carvão ativado comercial em contato com 30 mL de solução de metformina, diuron, metileno e chumbo separadamente, todas na concentração dos contaminantes foram fixadas em 30 mg L⁻¹, mantido em velocidade de agitação constante de 150 rpm no agitador orbital (Tecnal 4200) em frascos herméticos, em pH natural de cada amostra e temperatura controlada de 25 °C. Os intervalos de tempo para retirada das alíquotas de cada contaminante estudado foram de 5, 20, 30, 60, 120, 240, 360, 480, 600, 720, 900, 1080, 1260 e 1440 minutos, tempo necessário para que o equilíbrio fosse alcançado. As alíquotas foram filtradas através de membranas de acetato de celulose (0,45 µm) e as concentrações finais dos contaminantes foram determinadas em espectrofotômetro UV-VIS para cada comprimento de onda dos contaminantes (metformina 232 nm, diuron 248 nm, azul de metileno 598 nm) e para o chumbo foi utilizada a técnica de absorção atômica no comprimento de onda de 630 nm. Todos os testes foram realizados em duplicata.

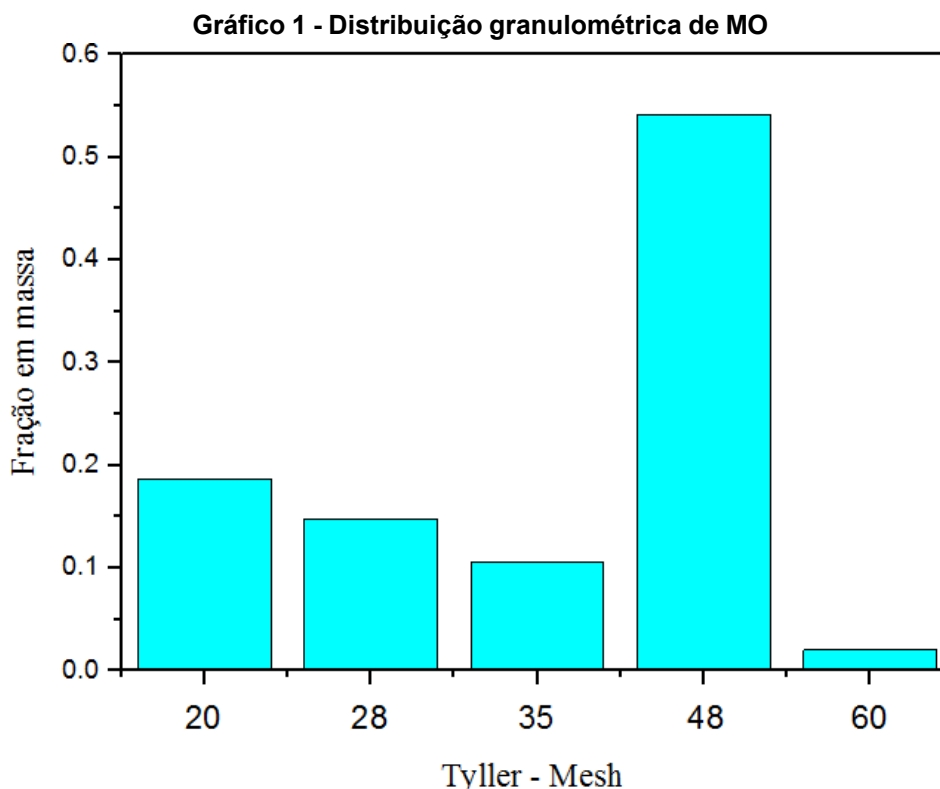
3.8 Análise de custos

A análise de custos foi estudada para ambos os adsorventes para reportar todos os gastos envolvidos na produção dos materiais. Ou seja, analisa as saídas financeiras relacionadas à produção. Assim, foi necessário reunir todas as movimentações de gastos para produção dos materiais estudados para poder informar o preço final de produção de cada material, no qual terá uma ideia para a produção de cada material.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Distribuição granulométrica da MO

A distribuição granulométrica da MO está apresentada no Gráfico 1, a qual mostra a fração mássica que ficou retida em cada peneira utilizada.



Fonte: Autoria própria (2024)

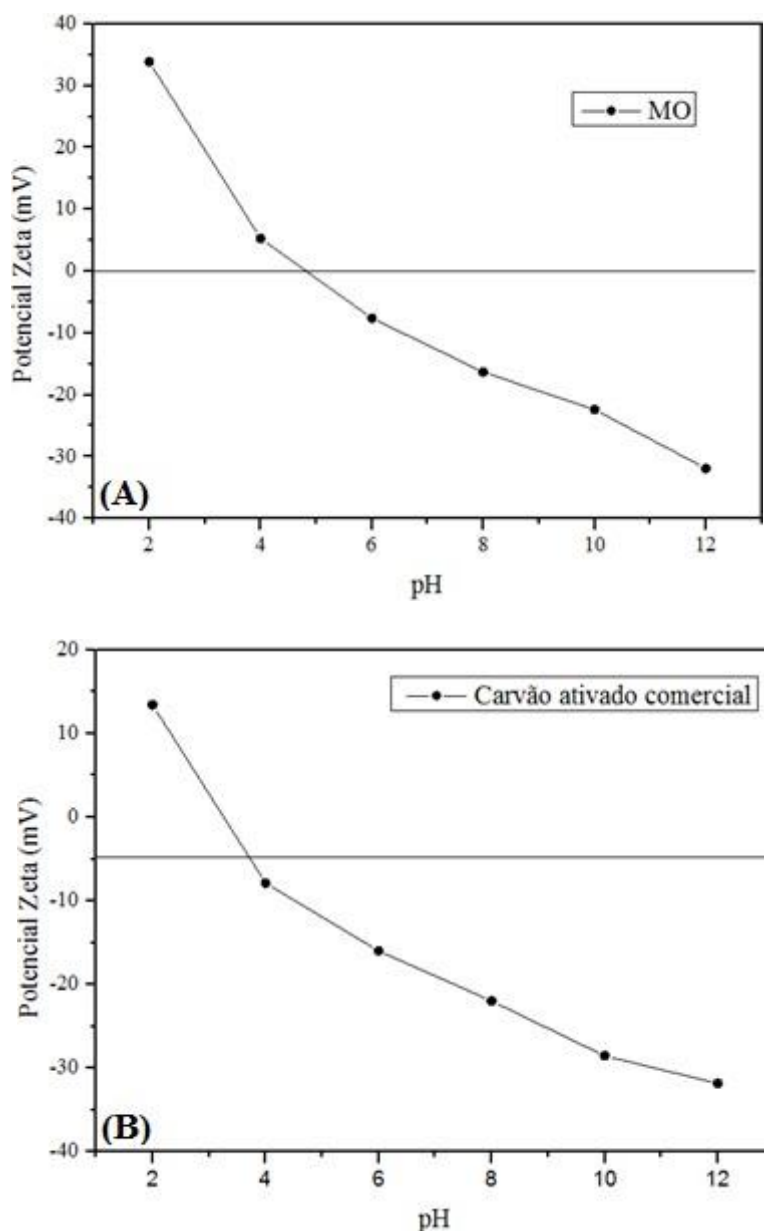
Observa-se que o maior rendimento após o peneiramento do adsorvente ocorreu na peneira de Tyller 48, com o diâmetro médio das partículas em 300 μm , maior que a soma das demais peneiras, representando 54,07 % da massa peneirada inicialmente. Com isso a justificativa para a escolha desse diâmetro de partículas nos estudos preliminares e ensaios de adsorção.

4.2 Caracterização dos adsorventes

4.2.1 Potencial Zeta

Os Gráficos 2 (A) e (B) mostram o potencial zeta de cada um dos adsorventes estudados.

Gráfico 2 - Potencial zeta (A) MO e (B) carvão ativado



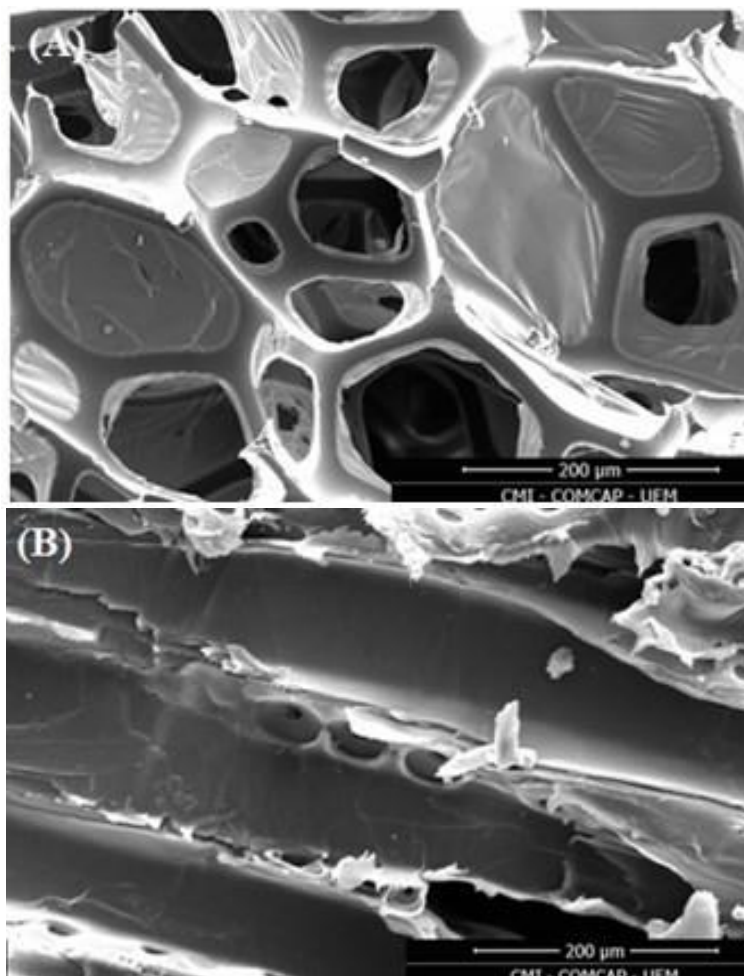
Fonte: Autoria própria (2024)

Os Gráficos 2 (A) e (B) mostram os valores obtidos para o potencial zeta de ambos os adsorventes em diferentes pHs (2 - 12). Observa-se que no Gráfico 2 (A) o ponto isoelétrico ocorreu próximo ao pH 5,5, relatando que em pH maior que 5,5 sua carga é negativa e em pH menor, sua carga é positiva (Bhattacharjee, 2016; Robles; Regalbuto, 2004). Já no Gráfico 2 (B), o ponto isoelétrico estava em pH 4, portanto, um pH menor que 4 tem carga positiva e um pH maior que 4 tem carga negativa. E em ambos os casos se observa que o potencial zeta foi negativo. Fazendo com que os pontos utilizados tenham interação entre os contaminantes estudados com seus adsorventes estudados (Chibowski; Szcześ, 2016; Kiwumulo *et al.*, 2022).

4.2.2 Microscopia eletrônica de varredura

As amostras foram submetidas à microscopia eletrônica de varredura onde se avaliou a estrutura morfológica do bioissorvente. Na Figura 12 estão apresentadas as estruturas morfológicas.

Figura 12 - Microscopia eletrônica de varredura (A) MO e (B) carvão ativado



Fonte: Autoria própria (2024)

A imagem de morfologia foi realizada em magnitude de 2000 x. Nota-se na que na Figura 12 (A) possui uma grande quantidade de cavidades de poros, sendo esses poros heterógenos podendo favorecer a capacidade de adsorção do bioissorvente. Coldebella *et al.* (2017) relatam que o bioissorvente proveniente de tratamento químico e térmico possui muitas cavidades abertas favorecendo o processo de adsorção. Reddy *et al.* (2010) afirmam que esse tipo de modificação é importante para adsorção de espécies químicas metálicas e de contaminantes orgânicos. E na Figura 12 (B), há muitas cavidades porosas e heterogêneas que facilitam muito a adsorção de contaminantes.

4.2.3 Fisissorção de N₂

Na Tabela 2 estão apresentadas as propriedades texturais da MO e do carvão ativado comercial.

Tabela 2 - Propriedades texturais da casca da MO e carvão ativado comercial		
	MO	Carvão Comercial
Área específica BET (m ² g ⁻¹)	38,25	205,71
Diâmetro médio de poros (Å)	26,44	32,57
Volume Total de poros (cm ³ g ⁻¹)	0,1293	0,4899
Volume de microporos (cm ³ g ⁻¹)	0,0996	0,4012
Volume de mesoporos (cm ³ g ⁻¹)	0,0297	0,0887

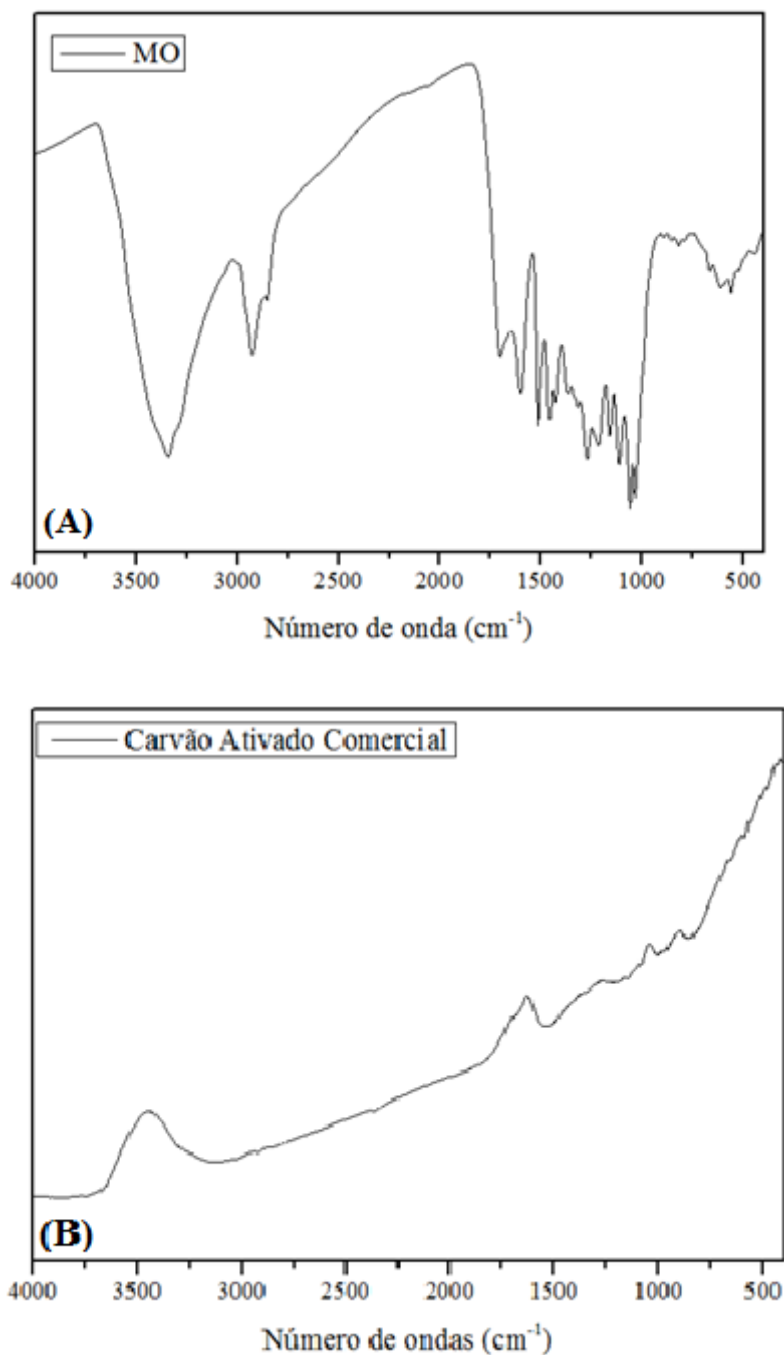
Fonte: Autoria própria (2024)

Diante da Tabela 2, os adsorventes estudados possuem uma área relativamente elevada para o processo de adsorção. No qual se observa que na MO houve predominância de mesoporos e o carvão comercial microporos. Materiais que possuem características mesoporosos e microporosos colaboram para a remoção de contaminantes muitas vezes de difícil remoção por volumes macroporosos (Adebayo *et al.*, 2019; Williams *et al.*, 2017).

4.2.4 Espectroscopia no infravermelho com transformada de Fourier

Para determinar os grupos funcionais dos materiais, foi realizada análise FTIR para os dois adsorventes estudados, conforme mostrado no Gráfico 3 (A) e (B).

Gráfico 3 - FTIR (A) MO e (B) Carvão Ativado Comercial



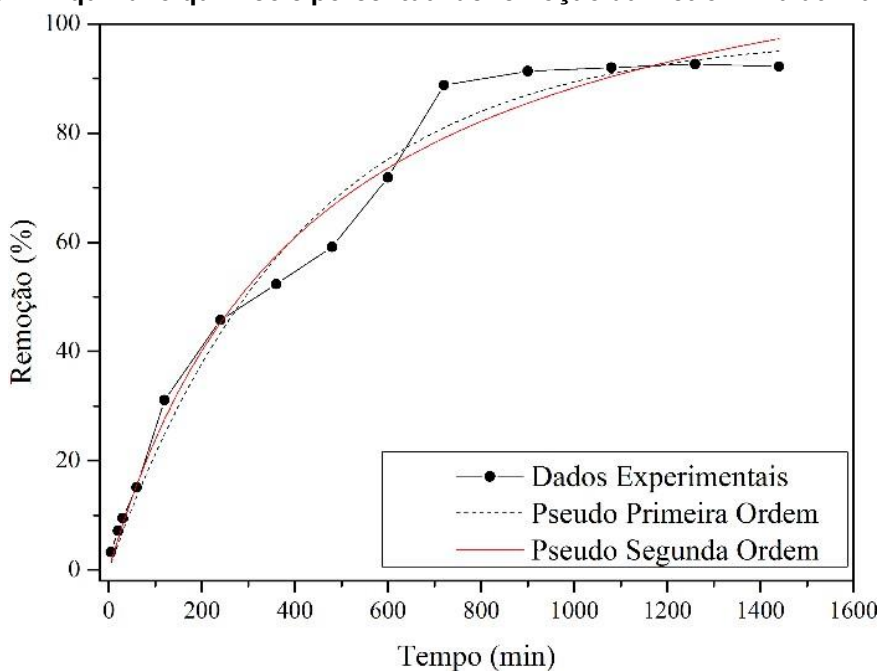
Fonte: Autoria própria (2024)

Observe que no Gráfico 3 (A) o material adsorvente MO possui uma banda grande e larga de 3421 - 3329 cm^{-1} , possivelmente indicando ligação de hidrogênio, característica do material orgânico (Cruz-Espinoza *et al.*, 2012). A presença de banda na região de 2921 cm^{-1} demonstra e determina a presença de metilcelulose, devido à possibilidade de estiramento assimétrico da ligação C-H presente no grupo CH_2 (Hashim *et al.*, 2017). O espectro realizado possui uma banda de 2809 cm^{-1} , se refere a um estiramento simétrico da ligação C-H do grupo CH_3 . Na região observa-se que

o valor de 1569 cm^{-1} , com aumento desta área relativa e com a modificação da banda para a região de aproximadamente 1521 cm^{-1} (Coldebella *et al.*, 2017). De acordo com esse fato, a alteração possivelmente do estiramento das ligações COO⁻ e parte da deformação NH dos grupos amina que podem ser secundários (Sya'banah *et al.*, 2020). A região da banda em 1072 cm^{-1} é caracterizada pela região C-O, que são as possíveis estruturas de lignina, celulose e hemicelulose, que compõem todo o material analisado (Dalhoumi *et al.*, 2022). Quanto ao FTIR do carvão ativado comercial Gráfico 3 (B), observa-se um aumento de intensidade entre 3540 e 3351 cm^{-1} , caracterizando uma banda de absorção típica de (OH), que normalmente também está associada à presença de hidrogênio (Joga Rao, 2021). Essa absorção pode ser atribuída à presença predominante de grupos OH de fenóis, pois em geral, a presença significativa de (OH) de grupos carboxílicos (Dittmann *et al.*, 2022). O aumento de intensidade entre 1681 e 1593 cm^{-1} evidencia a presença de grupos carbonila C=O existentes em ácidos carboxílicos, cetonas e na própria celulose (Giuri *et al.*, 2007). A presença da banda em aproximadamente 1477 cm^{-1} pode ser atribuída a vibrações de anéis aromáticos típicos em materiais carbonáceos. A banda entre 1068 e 1004 cm^{-1} pode ser atribuída ao estiramento da ligação CO correspondente às vibrações dos grupos fenólicos (Ali *et al.*, 2016). Um pico de menor intensidade em 673 cm^{-1} confirma a presença de éter e lactona (Mistar; Alfatah; Supardan, 2020).

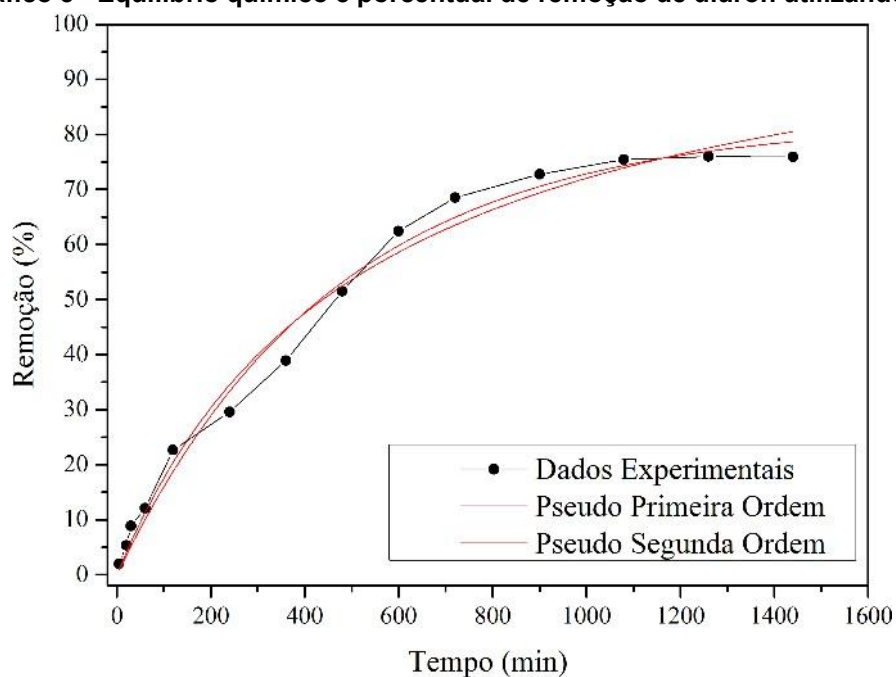
4.3 Estudo cinético e equilíbrio químico

A utilização do pH natural de cada amostra foi dada para que não houvesse qualquer tipo de modificação das características físico-químicas, que pudesse alterar os resultados. A importância dos estudos cinéticos e de equilíbrio para o processo de adsorção é essencial para compreender o comportamento de adsorção dos contaminantes em relação ao tempo. Pois neste estudo a remoção do contaminante é relatada em relação aos adsorventes estudados, conforme mostram as Gráficos 4 a 7.

Gráfico 4 - Equilíbrio químico e porcentual de remoção da metformina utilizando MO

Fonte: Autoria própria (2024)

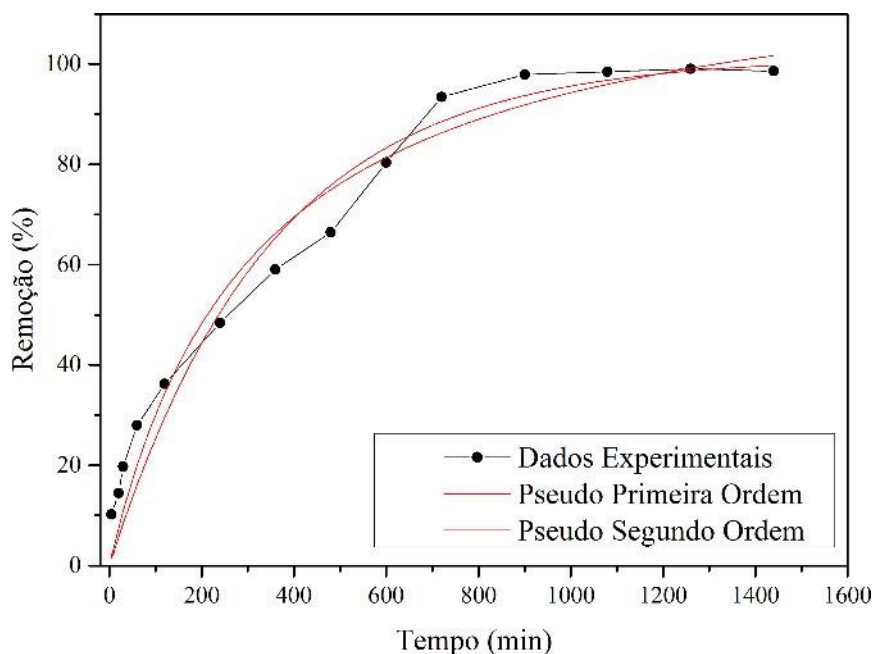
No Gráfico 4 é visualizada a remoção da metformina, observa-se que nos momentos iniciais da remoção ocorreu uma remoção significativa, possivelmente demonstrando que há uma boa interação dos sítios ativos com a metformina, conforme o tempo de remoção passa, observa-se uma remoção mais lenta, pois provavelmente os sítios ativos já estavam saturados. A estabilidade ocorreu em aproximadamente 900 minutos, pois a partir desse momento foi caracterizado o estado de equilíbrio da reação, ou seja, os sítios ativos estavam totalmente saturados e assim não houve interação com a metformina, impossibilitando a entrada de uma nova molécula na cavidade do sítio ativo, a remoção foi de 93,54% com capacidade adsorptiva de 28,05 mg g⁻¹.

Gráfico 5 - Equilíbrio químico e porcentual de remoção de diuron utilizando MO

Fonte: Autoria própria (2024)

No Gráfico 5 a remoção foi dada pelo contaminante diuron, observa-se que o contaminante também teve uma boa interação com o MO, nos momentos iniciais a remoção ocorreu de forma mais lenta e com o passar do tempo houve uma interação do adsorvente com o contaminante esse fato pode ser explicado porque as moléculas de diuron são maiores e possivelmente saturaram rapidamente as cavidades dos sítios ativos, o equilíbrio ocorreu em 1200 minutos com percentual de remoção de 84,56% com capacidade adsortiva de 25,36 mg g⁻¹.

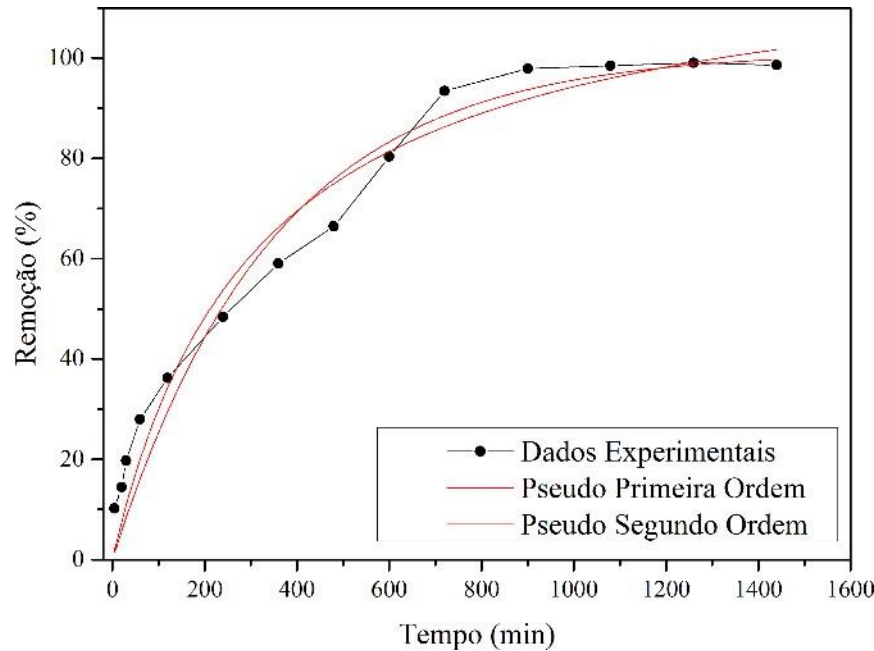
Gráfico 6 - Equilíbrio químico e porcentual de remoção de azul de metileno utilizando MO



Fonte: Autoria própria (2024)

O Gráfico 6 mostra a remoção do corante azul de metileno, que por sua vez foi o que teve maior interação com o MO, na fase inicial houve uma remoção muito expressiva, comprovando que as moléculas contaminantes ocuparam rapidamente os sítios ativos do material, com o passar do tempo essa interação aumentou, atingindo o ponto de equilíbrio em aproximadamente 800 minutos e com remoção máxima de 99,13% com capacidade adsortiva de $29,74 \text{ mg g}^{-1}$.

Gráfico 7 - Equilíbrio químico e porcentual de remoção de azul de chumbo utilizando MO



Fonte: Autoria própria (2024)

O Gráfico 7 mostra a remoção de chumbo, este contaminante teve alta interação com o material estudado. No início do processo de remoção ocorreu de forma mais lenta, pois a dificuldade de remoção do contaminante é alta, com o passar do tempo essa interação aumentou e permitiu que a remoção ocorresse, onde foi verificado que o equilíbrio ocorreu em 700 minutos e com remoção de 93,45% com capacidade adsortiva de 28,04 mg g⁻¹, comprovando que houve interação com o adsorvente. Resumidamente, o MO, para os quatro contaminantes estudados, obteve bom relacionamento e com boas remoções. Os modelos pseudo primeira ordem (PPO) e pseudo segunda ordem (PSO) para MO foram determinados e apresentados na Tabela 3.

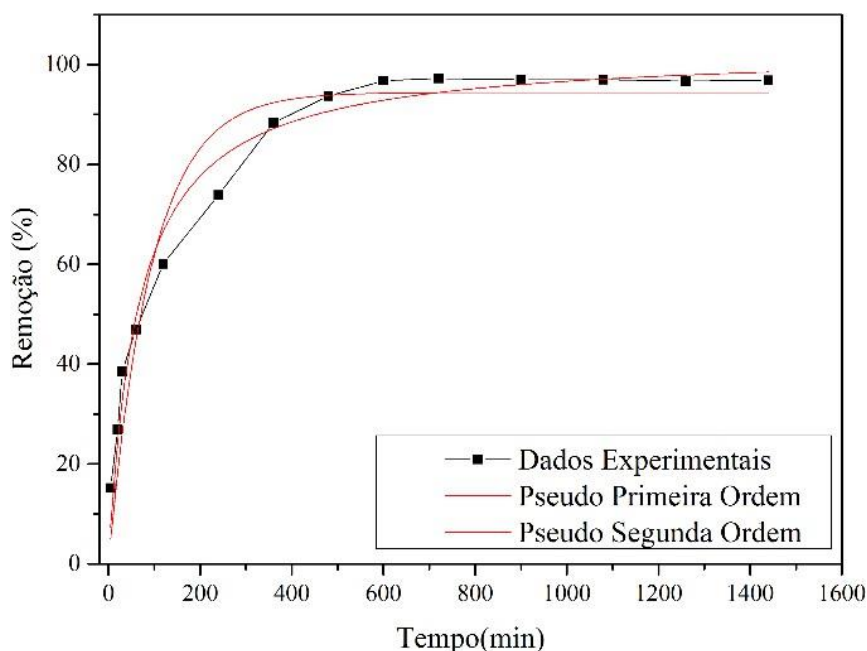
Tabela 3 - Modelos cinéticos para o adsorvente MO

Modelos	Parâmetros	Metformina	Diuron	Azul de Metileno	Chumbo
PPO	q _e (mg g ⁻¹)	29,65	27,13	31,07	30,20
	k ₁ (min ⁻¹)	0,008	0,013	0,009	0,015
	R ²	0,962	0,970	0,991	0,957
	χ ²	0,189	0,234	0,218	0,245
PSO	q _e (mg g ⁻¹)	25,17	21,22	30,78	27,45
	k ₂ (g mg ⁻¹ min ⁻¹)	0,012	0,023	0,011	0,033
	R ²	0,907	0,921	0,934	0,893
	χ ²	0,267	0,328	0,437	0,578

Fonte: Autoria própria (2024)

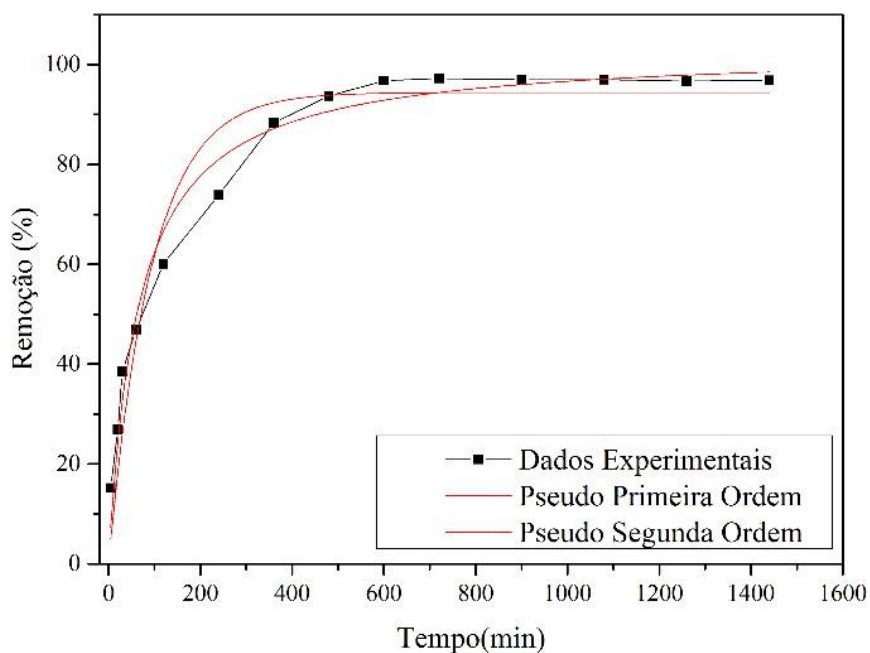
Os Gráficos 8 a 11 demonstram a remoção dos mesmos contaminantes, mas com outro material adsorvente, que neste caso foi o carvão ativado comercial (CA).

Gráfico 8 - Equilíbrio químico e porcentual de remoção da metformina utilizando CA



Fonte: Autoria própria (2024)

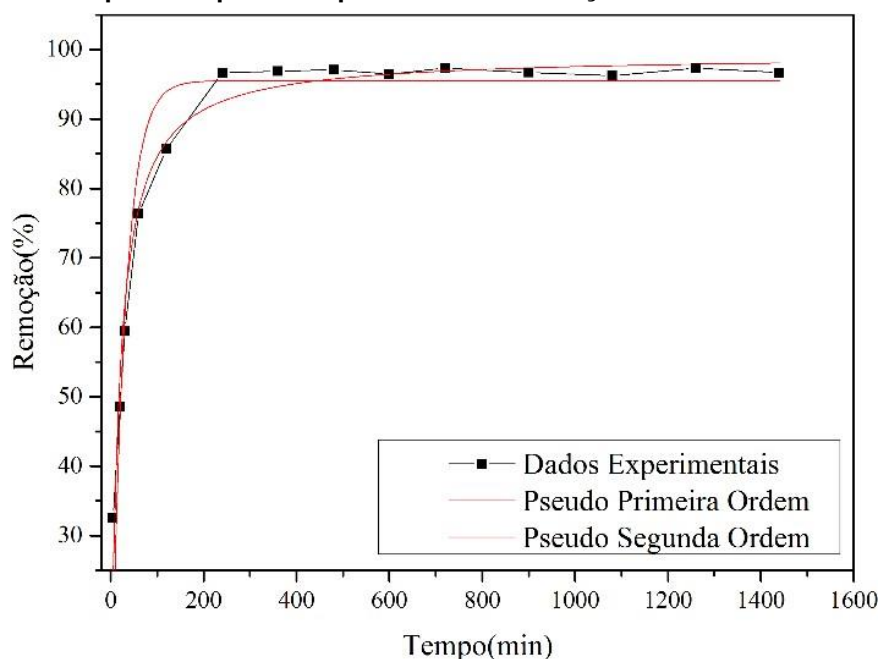
No Gráfico 8 observa-se a remoção do contaminante metformina com carvão ativado, neste caso está relacionado à alta interação do material utilizando o pH natural de cada amostra, o potencial zeta informou que a carga isoeletrica foi de 4,0 , e esse fato também pode ser explicado com a Tabela 1. Com grande quantidade de cavidade neste material estudado, rapidamente a grande quantidade de poros sequestra metformina para seus poros, observa-se que o equilíbrio ocorreu em aproximadamente 600 minutos e com uma remoção de 97,05% com capacidade adsortiva de 29,5 mg g⁻¹ comprovando que existe uma alta interação entre adsorvente e adsorbato.

Gráfico 9 - Equilíbrio químico e percentual de remoção de diuron utilizando CA

Fonte: Autoria própria (2024)

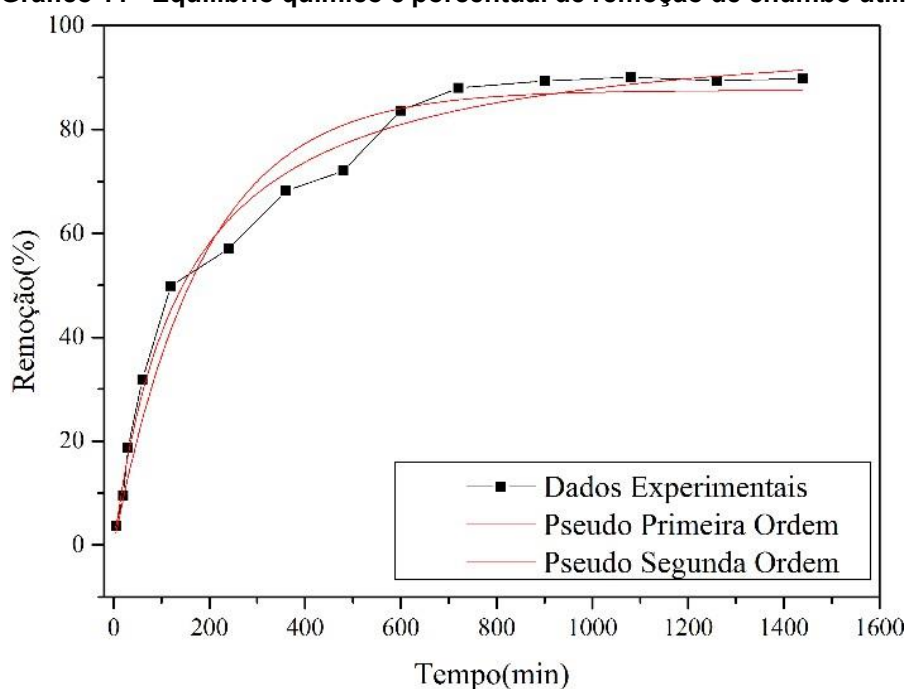
No Gráfico 9 foi utilizado carvão ativado para remoção do pesticida diuron, que teve uma boa interação na fase inicial com altas taxas de remoção, pois suas moléculas são extensas e fáceis de remover inicialmente, com o passar do tempo, o diuron teve sua remoção diminuída a partir de sua solução aquosa na qual sua estabilidade foi de aproximadamente 500 minutos, não tendo variação mais significativa com os percentuais de remoção, pode-se afirmar que houve um estado de equilíbrio, os sítios ativos vazios foram diminuindo, o que dificultou a molécula de diuron. Após a estabilidade no estudo cinético o percentual máximo de remoção foi de 86,53% com capacidade adsortiva de 25,90 mg g⁻¹.

Gráfico 10 - Equilíbrio químico e porcentual de remoção de azul de metileno utilizando CA



Fonte: Autoria própria (2024)

O Gráfico 10 relata o uso de carvão ativado para remoção do corante azul de metileno, muito utilizado no Brasil nas indústrias têxteis para tingimento de roupas, que consequentemente gera muitos efluentes. Observa-se que existem altas taxas de remoções na fase inicial, pois há uma excelente interação do material com a solução aquosa de azul de metileno, pois a molécula de adsorbato é considerada uma macromolécula e com isso acontecem altas remoções, com a passagem do tempo. Com o tempo, a velocidade de remoção diminui porque as cavidades dos sítios ativos ficam saturadas e dificultam a entrada de novas moléculas no adsorvente. O estudo de equilíbrio mostra que ocorreu em aproximadamente 300 minutos, ou seja, após esse momento não há mais interação entre adsorvente e adsorbato, sua remoção atingiu o valor de 98,76% com capacidade adsortiva de 29,61 mg g⁻¹.

Gráfico 11 - Equilíbrio químico e porcentual de remoção de chumbo utilizando CA

Fonte: Autoria própria (2024)

No Gráfico 11 foi apresentada a remoção do chumbo utilizando carvão ativado, nota-se que também nos momentos iniciais há uma interação entre adsorvente e adsorbato, com o passar do tempo o processo adsorptivo diminui, pois os poros ficam saturados com a molécula de chumbo dificultando a remoção do contaminante. O equilíbrio ocorre em aproximadamente 900 minutos sem maior interação entre eles, a remoção do contaminante foi de 87,45% com capacidade adsorptiva $26,4 \text{ mg g}^{-1}$. Em geral, o carvão ativado é um bom adsorvente para remoção dos quatro contaminantes estudados em comparação ao MO. Os modelos PPO e PSO para carbono ativo foram determinados e apresentados na Tabela 4.

Tabela 4 - Modelos cinéticos para o adsorvente CA

Modelos	Parâmetros	Metformina	Diuron	Azul de Metileno	Chumbo
PPO	$q_e \text{ (mg g}^{-1}\text{)}$	32,34	27,76	32,10	32,10
	$k_1 \text{ (min}^{-1}\text{)}$	0,004	0,009	0,005	0,005
	R^2	0,973	0,981	0,994	0,994
	χ^2	0,109	0,156	0,153	0,153
PSO	$q_e \text{ (mg g}^{-1}\text{)}$	30,72	24,55	28,83	28,83
	$k_2 \text{ (g mg}^{-1} \text{ min}^{-1}\text{)}$	0,009	0,013	0,009	0,009
	R^2	0,942	0,954	0,962	0,962
	χ^2	0,203	0,293	0,374	0,374

Fonte: Autoria própria (2024)

4.4 Estudo do custo de produção de cada adsorvente

Na Tabela 5 são apresentados os valores de produção de cada material utilizado neste estudo, os valores estavam em moeda local do Brasil (R\$) e são apresentados a seguir:

Tabela 5 - Valores de produção de cada material		
Carvão Ativado		
Produção		Custo (R\$/kg)
Carvão Ativado (comercial)		35,00
Custo Total		35,00
MO		
Produção		Custo (R\$/kg)
Matéria-prima (resíduos)		0,00
Lavagem com água		1,25
Secagem de Materiais		1,05
Trituração do material		2,00
Processamento de Reator Hidrotérmico		3,25
Secagem de Materiais		1,05
Separação Granulométrica		0,80
Custo total		9,4

Fonte: Autoria própria (2024)

Observa-se que o carvão ativado comercial já tem o preço final de produção em kg foi de 35,00 reais, visto que é um produto comercial e a empresa que realizou a doação do material manteve os custos detalhados ocultos, mantendo seu segredo industrial, e quando comparado em valores com MO o custo de produção é mais caro, pois no processo de produção do carvão é realizada via ativação do material, no qual possivelmente utiliza muito reagente, energia e outros custos.

Mas por outro lado, o material possui uma área superficial elevada, como pode ser visto na Tabela 1. Em comparação com a MO foi um material desenvolvido a partir de resíduos agroindustriais através do processo biochar, no qual são utilizadas apenas água e pressão em um determinado tempo (Osborne; Nasi; Powell, 2021). O custo de produção em kg foi de 9,4 reais, aproximadamente 3,72 vezes mais barato para produção, como pode ser visto na Tabela 1, o material não possui área específica elevada comparada ao carvão ativado. Porém, seus volumes de microporos são elevados e, portanto, o material estudado apresenta boa interação com diversos contaminantes e, conseqüentemente, pode ser removido. Por sua vez, o material do MO foi determinado como sendo barato pela sua produção, rentabilidade, fácil produção e interações com contaminantes que precisam ser removidos do meio ambiente (Bahşi; Çetin, 2020).

5 CONCLUSÃO

Este estudo avaliou a produção de um adsorvente a partir de resíduos agroindustriais e comparou-o com um adsorvente comercial, o carvão ativado. A caracterização do MO demonstrou que o material era uma boa alternativa para produção, visto que é um material que possui muitos sítios ativos que favorecem a adsorção, possuem microporos que auxiliam a remoção de contaminantes mais perigosos ao meio ambiente, o FTIR do MO demonstrou que seus grupos funcionais obtiveram muita interação com os contaminantes estudados, no qual possa facilitar a adsorção e remoção deles, tendo a possibilidade de produção em larga escala no futuro.

O estudo foi realizado para remover contaminantes emergentes como: metformina, diuron, azul de metileno e chumbo e cujas remoções foram de 84,56 a 99,13%, com o intuito de comparar que um produto adsorvente produzido a partir de um resíduo agroindustrial em um processo simples que envolve apenas água, pressão e temperatura seja bom como um produto comercial.

E em relação ao custo de produção do material, foi um ponto importante a ser avaliado, já que o resíduo é totalmente descartado sem fins comerciais e lucrativos o processo de produção do hidro carvão é relativamente mais barato que o do carvão ativado comercial, aproximadamente de 3,72 vezes menos.

Os valores elevados de volume total de mesoporos e microporos deixam o material eficiente, de baixo custo, reaproveitamento e de fácil obtenção, apresentando bom potencial como adsorvente, podendo ser utilizado no futuro em escala comercial para tratamento de água e efluentes em indústrias.

REFERÊNCIAS

- ABALIWANO, J. K.; GHEBREMICHAEL, K. A; AMY, G. L. Application of the purified *Moringa Oleifera* coagulant for surface water treatment. **WaterMill Working Paper Series**, v. 5, n. 5, p. 1-22, 2008.
- ACIÉN, F. G.; *et al.* Production cost of a real microalgae production plant and strategies to reduce it. **Biotechnology Advances**, 2012.
- ADEBAYO, G. B.; *et al.* Kinetics, thermodynamics and isothermal modelling of liquid phase adsorption of methylene blue onto moringa pod husk activated carbon. **South African Journal of Chemistry**, 2019.
- ADOGAYE, S. B. B.; *et al.* Assessment of domestic water sources safety: application of the micro biological survey method and microbiological profile of the contaminating bacteria. **Journal of Water Resource and Protection**, 2021.
- AKHTAR, M.; *et al.* Sorption potential of *Moringa oleifera* pods for the removal of organic pollutants from aqueous solutions. **Journal of Hazardous Materials**, v. 141, n. 3, p. 546-556, 2007.
- ALI, A.; *et al.* Synthesis, characterization, applications, and challenges of iron oxide nanoparticles. **Nanotechnology, Science and Applications**, 2016.
- ALI, I.; ASIM, M.; KHAN, T. A. Low cost adsorbents for the removal of organic pollutants from wastewater. **Journal of Environmental Management**, v. 113, p. 170-183, 2012.
- ALMARAZ-SÁNCHEZ, I.; *et al.* Processing agroindustry by-products for obtaining value-added products and reducing environmental impact. **Journal of Chemistry**, 2022.
- ALSHARAA, A.; *et al.* Removal of haloethers, trihalomethanes and haloketones from water using *Moringa oleifera* seeds. **International Journal of Environmental Science and Technology**, 2016.
- ALVER, E.; METIN, A. Ü.; BROUERS, F. Methylene blue adsorption on magnetic alginate/rice husk bio-composite. **International Journal of Biological Macromolecules**, v. 154, p. 104-113, jul. 2020.
- ANGLY, F. E.; *et al.* Diuron tolerance and potential degradation by pelagic microbiomes in the great barrier reef lagoon. **PeerJ**, 2016.
- ARAÚJO, C. S. T.; *et al.* Characterization and use of *Moringa oleifera* seeds as biosorbent for removing metal ions from aqueous effluents. **Water Science and Technology**, v. 62, n. 9, p. 2198-2203, 2010.

BAHIA CARBON. Carvão vegetal granulado (C.G.A), proveniente de dendê. **Tipos de carvões**. Disponível em: <http://bahiacarbon.com.br>. Acesso: 9 out 2023.

BAHŞI, N.; ÇETIN, E. Determining of agricultural credit impact on agricultural production value in turkey. **Ciencia Rural**, 2020.

BAPTISTA, A. T. A.; *et al.* Coagulation-flocculation process with ultrafiltered saline extract of moringa oleifera for the treatment of surface water. **Chemical Engineering Journal**, v. 276, p. 166-173, 2015.

BASANTA, R.; *et al.* Sustainable recycling of waste from sugarcane agroindustry: a review. **Ciencia y Tecnologia Alimentaria**, 2007.

BAYABIL, H. K.; TESHOME, F. T.; LI, Y. C. Emerging Contaminants in Soil and Water **Frontiers in Environmental Science**, 2022.

BEZERRA, C. O.; *et al.* Assessment of the use of Moringa oleifera seed husks for removal of pesticide diuron from contaminated water. **Environmental Technology (United Kingdom)**, v. 0, n. 0, p. 1-11, 2018.

BHATTACHARJEE, S. DLS and zeta potential: what they are and what they are not? **Journal of Controlled Release**, 2016.

BIOTEC. Extent of pyrolysis impacts on fast pyrolysis biochar properties. **Journal of Environmental Quality**. Disponível em: <https://colincarbon.com/activated-carbon-supplier/wooden-ac/biochar.html>? Acesso: 10 out 2023.

BOLONG, N.; *et al.* A review of the effects of emerging contaminants in wastewater and options for their removal. **Desalination**, 2009.

BOULAMANTI, A.; MOYA, J. A. Production costs of the chemical industry in the EU and other countries: ammonia, methanol and light olefins **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, 2017.

BUENO-SOLANO, A.; *et al.* Conceptual fluidity model for resilient agroindustry supply chains. **Production and Manufacturing Research**, 2022.

BUSS, W.; *et al.* Composition of PAHs in biochar and implications for biochar production. **ACS Sustainable Chemistry and Engineering**, 2022.

CALDARELLI, C. E.; PERDIGÃO, C. A agroindústria canavieira e seus impactos socioeconômicos na região Centro-Sul do Brasil. **Revista Brasileira de Estudos Regionais e Urbanos**, 2018.

CARDOSO VALVERDE, K.; *et al.* Moringa oleifera Lam. and its potential association with aluminium sulphate in the process of coagulation/flocculation and sedimentation of surface water. **International Journal of Chemical Engineering**, 2018.

CHANDINI *et al.* The impact of chemical fertilizers on our environment and ecosystem. **Research Trends in Environmental Sciences**, 2019.

CHAUDHURY, A.; *et al.* Clinical review of antidiabetic drugs: Implications for type 2 diabetes mellitus management **Frontiers in Endocrinology**, 2017.

CHI, N. T. L.; *et al.* A review on biochar production techniques and biochar based catalyst for biofuel production from algae. **Fuel**, 2021.

CHIBOWSKI, E.; SZCZES, A. Zeta potential and surface charge of DPPC and DOPC liposomes in the presence of PLC enzyme. **Adsorption**, 2016.

CHO, N. H.; *et al.* IDF Diabetes Atlas: global estimates of diabetes prevalence for 2017 and projections for 2045. **Diabetes Research and Clinical Practice**, 2018.

COLDEBELLA, P. F.; *et al.* Potential effect of chemical and thermal treatment on the Kinetics, equilibrium, and thermodynamic studies for atrazine biosorption by the *Moringa oleifera* pods. **The Canadian Journal of Chemical Engineering**, v. 95, n. 5, p. 961-973, 2017.

COSTA, C. C.; BURNQUIST, H. L.; GUILHOTO, J. Relations of the regional cane agroindustry with the national economy: analysis applied to the center-south and north-northeast. **SSRN Electronic Journal**, 2014.

CRUZ-ESPINOZA, J. E.; *et al.* FTIR analysis of phenolic extracts from *Moringa oleifera* leaves. **Journal of Biometrics & Biostatistics**, 2012.

CUSIOLI, L. F.; *et al.* Modified *Moringa oleifera* Lam. Seed husks as low-cost biosorbent for atrazine removal. **Environmental Technology**, v. 0, n. 0, p. 1-12, 2019.

D.M.RUTHVEN. Principles of adsorption and adsorption processes. **Chemical Engineering and Processing: Process Intensification**, 1985.

DALHOUMI, W.; *et al.* Therapeutic strategies of *Moringa oleifera* Lam. (Moringaceae) for stomach and forestomach ulceration induced by HCl/EtOH in rat model. **Saudi Journal of Biological Sciences**, 2022.

DEVARAJ, D.; SYRON, E.; DONNELLAN, P. Synthetic natural gas production: Production cost, key cost factors and optimal configuration. **International Journal of Energy Production and Management**, 2020.

DITTMANN, D.; *et al.* Characterization of activated carbons for water treatment using TGA-FTIR for analysis of oxygen-containing functional groups. **Applied Water Science**, 2022.

DOVGAL, O. V.; *et al.* Methods of competitiveness assessment of agricultural enterprise in Eastern Europe. **Regional Science Inquiry**, 2017.

ELIA, A.; *et al.* Impacts of innovation on renewable energy technology cost reductions. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, 2021.

FARRÉ, M. L. A.; *et al.* Fate and toxicity of emerging pollutants, their metabolites and transformation products in the aquatic environment. **TrAC - Trends in Analytical Chemistry**, v. 27, n. 11, p. 991-1007, 2008.

FERNANDES, R. C.; LOBÃO, J. S. B.; VALE, R. M. C. Oeste baiano: da agricultura familiar à agroindústria. In: **Encontro de Geógrafos da América Latina**. [s.l.: s.n.].

FSP-USP. Evitar a contaminação por chumbo para garantir um crescimento saudável. **Contaminação por chumbo**. Disponível em: <http://www.fsp.usp.br/prevencao-da-contaminacao-por-chumbo>. Acesso: 11 out. 2023.

FUGLIE, L. J. Combating malnutrition with Moringa. **Engineering**, v. 3, n. 5338, p. 1999-2002, 2001.

GALINA, Y. Networking cooperation in the implementation of lifelong education programs. **Field Sciences**, 2021.

GASPAR, L. M. R.; *et al.* Economic and financial analysis of the management of organic solid waste from a small-scale agro-processing industry. **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, 2020.

GEISSEN, V.; *et al.* Emerging pollutants in the environment: a challenge for water resource management. **International Soil and Water Conservation Research**, 2015.

GENG, X.; KRISHNAN, H.; SOHONI, M. G. Operational collaboration between rivals: The impact of cost reduction. **Production and Operations Management**, 2022.

GHASI, S.; NWOBODO, E.; OFILI, J. O. Hypocholesterolemic effects of crude extract of leaf of Moringa oleifera Lam in high-fat diet fed wistar rats. **Journal of Ethnopharmacology**, v. 69, n. 1, p. 21-25, 2000.

GIURI, P.; *et al.* Inventors and invention processes in Europe: results from the PatVal-EU survey. **Research Policy**, 2007.

GÜRKAN, G. Ç. Identification of lead user characteristics the case of surgeons in Turkey. **European Journal of Business and Management**, 2014.

HAGEMANN, N.; *et al.* Activated carbon, biochar and charcoal: linkages and synergies across pyrogenic carbon's ABCs. **Water (Switzerland)**, 2018.

HAMDANI, A.; FATONAH, S.; AWATARA, I. G. P. D. Implementation of creating start up used waste of agroindustry company. **International Journal of Engineering and Technology(UAE)**, 2018.

HASDEMIR, İ. M.; *et al.* Adsorption of acetic acid onto activated carbons produced from hazelnut shell, orange peel, and melon seeds. **Applied Water Science**, 2022.

HASHIM, F. J.; *et al.* GC-MS and FTIR Analysis of Moringa oleifera leaves different extracts and evaluation of their antioxidant activity. **Asian Journal of Microbiology, Biotechnology and Environmental Sciences**, 2017.

HEIDARINEJAD, Z.; *et al.* Methods for preparation and activation of activated carbon: a review. **Environmental Chemistry Letters**, 2020.

HERLINA, L.; *et al.* An Integrated production and distribution planning model in shrimp agroindustry supply chain. **Industrial Engineering and Management Systems**, 2022.

JOGA RAO, H. Characterization studies on adsorption of lead and cadmium using activated carbon prepared from waste tyres. **Nature Environment and Pollution Technology**, 2021.

JONES, R. J.; *et al.* Effects of herbicides diuron and atrazine on corals of the Great Barrier Reef, Australia. **Marine Ecology Progress Series**, 2003.

KAISER, M. J. A Review of Exploration, Development, and Production Cost Offshore Newfoundland. **Natural Resources Research**, 2021.

KAMARUDIN, N. A.; *et al.* Herbicide diuron as endocrine disrupting chemicals (EDCs) through histopathological analysis in gonads of Javanese Medaka (*Oryzias Javanicus*, Bleeker 1854). **Animals**, 2020.

KHAN, I.; *et al.* Review on Methylene blue: its properties, uses, toxicity and photodegradation. **Water (Switzerland)**, 2022.

KHORAIIRI, A. N. S. A.; *et al.* A review on agro-industrial waste as cellulose and nanocellulose source and their potentials in food applications. **Food Reviews International**, 2023.

KIWUMULO, H. F.; *et al.* Green synthesis and characterization of iron-oxide nanoparticles using Moringa oleifera: a potential protocol for use in low and middle income countries. **BMC Research Notes**, 2022.

KOVÁCS, G. Combination of lean value-oriented conception and facility layout design for even more significant efficiency improvement and cost reduction. **International Journal of Production Research**, 2020.

KUMAR, V.; *et al.* Emerging challenges for the agro-industrial food waste utilization: A review on food waste biorefinery. **Bioresource Technology**, 2022.

KYZAS, G. Z.; *et al.* Effectively designed molecularly imprinted polymers for selective isolation of the antidiabetic drug metformin and its transformation product guanyurea from aqueous media. **Analytica Chimica Acta**, 2015.

LAREDO, G. C.; *et al.* Comparison of the metal-organic framework MIL-101 (Cr) versus four commercial adsorbents for nitrogen compounds removal in diesel feedstocks. **Fuel**, 2016.

LEMES, A. C.; *et al.* Biological approaches for extraction of bioactive compounds from agro-industrial by-products: a review. **Frontiers in Bioengineering and Biotechnology**, 2022.

LIN, Y. S.; *et al.* Impact of pacemaker lead characteristics on pacemaker related infection and heart perforation: a nationwide population-based cohort study. **PLoS ONE**, 2015.

LUO, L.; *et al.* Adsorption species distribution and multicomponent adsorption mechanism of SO₂, NO, and CO₂ on commercial adsorbents. **Energy and Fuels**, 2017.

MADRONA, G. S.; *et al.* Evaluation of extracts of Moringa oleifera Lam seeds obtained with NaCl and their effects on water treatment. **Acta Scientiarum. Technology**, v. 34, n. 3, p. 289-293, 2012.

MARIÑO, M. A.; CYPRIANO, D.; TASIC, L. Agroindustry residues as a source for cellulose nanofibers production. **Journal of the Brazilian Chemical Society**, 2021.

MAROUŠEK, J.; *et al.* Environmental and economic advantages of production and application of digestate biochar. **Environmental Technology and Innovation**, 2023.

MATEUS, G. A. P.; *et al.* Obtaining drinking water using a magnetic coagulant composed of magnetite nanoparticles functionalized with Moringa oleifera seed extract. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, 2018.

MENEGHEL, A. P.; *et al.* Biosorption and removal of chromium from water by using moringa seed cake (Moringa oleifera Lam.). **Quimica Nova**, v. 36, n. 8, p. 1104-1110, 2013.

MISTAR, E. M.; ALFATAH, T.; SUPARDAN, M. D. Synthesis and characterization of activated carbon from Bambusa vulgaris striata using two-step KOH activation. **Journal of Materials Research and Technology**, 2020.

MOREIRA, S. A.; *et al.* Removal of Ni²⁺, Cu²⁺, Zn²⁺, Cd²⁺ and Pb²⁺ ions from aqueous solutions using cashew peduncle bagasse as an eco-friendly biosorbent. **Desalination and Water Treatment**, 2016.

MPWANYA, M. F.; VAN HEERDEN, C. H. A supply chain cost reduction framework for the South African mobile phone industry. **South African Journal of Economic and Management Sciences**, 2017.

NAJI, S. Z.; TYE, C. T. A review of the synthesis of activated carbon for biodiesel production: Precursor, preparation, and modification. **Energy Conversion and Management: X**, 2022.

NASCIMENTO, R. F.; *et al.* **Adsorção**: aspectos teóricos e aplicações ambientais. [s.l.]: [s.n.], 2014.

NDABIGENGESERE, A.; NARASIAH, K. S.; TALBOT, B. G. Active agents and mechanism of coagulation of turbid waters using Moringa oleifera. **Water Research**, v. 29, n. 2, p. 703-710, 1995.

NISHI, L.; *et al.* Cyanobacteria removal by coagulation/flocculation with seeds of the natural coagulant moringa oleifera lam. **Chemical Engineering Transactions**, v. 24, p. 1129-1134, 2011.

OKTALIANDO, R.; HUDOYO, A.; SOELAIMAN, A. Analisis Keterkaitan sektor agroindustri terhadap perekonomian di provinsi Lampung. **Jurnal Online Fakultas Pertanian Unila**, 2013.

OLADOYE, P. O.; *et al.* Methylene blue dye: Toxicity and potential elimination technology from wastewater. **Results in Engineering**, 2022.

OSBORNE, S. P.; NASI, G.; POWELL, M. Beyond co-production: Value creation and public services. **Public Administration**, 2021.

OSMAN, A. I.; *et al.* Biochar for agronomy, animal farming, anaerobic digestion, composting, water treatment, soil remediation, construction, energy storage, and carbon sequestration: a review. **Environmental Chemistry Letters**, 2022.

PATIAS, T. Z.; *et al.* Inovação social e sustentabilidade em agroindústrias familiares. **Revista Eletrônica de Estratégia & Negócios**, 2021.

PETROVIĆ, M.; GONZALEZ, S.; BARCELÓ, D. Analysis and removal of emerging contaminants in wastewater and drinking water TrAC - **Trends in Analytical Chemistry**, 2003.

PRATIWI, N. A.; HARIANTO, H.; DARYANTO, A. Peran Agroindustri hulu dan hilir dalam perekonomian dan distribusi pendapatan di Indonesia. **Jurnal Manajemen dan Agribisnis**, 2017.

PRITCHARD, M.; *et al.* A comparison between Moringa oleifera and chemical coagulants in the purification of drinking water: an alternative sustainable solution for developing countries. **Physics and Chemistry of the Earth**, v. 35, n. 13-14, p. 798-805, 2010.

RAINERI, C.; STIVARI, T. S. S.; GAMEIRO, A. H. Lamb production costs: analyses of composition and elasticities analysis of lamb production costs. **Asian-Australasian Journal of Animal Sciences**, 2015.

RECK, I. M.; *et al.* Removal of tartrazine from aqueous solutions using adsorbents based on activated carbon and Moringa oleifera seeds. **Journal of Cleaner Production**, v. 171, p. 85-97, 2018.

REDDY, D. H. K.; *et al.* Biosorption of Pb²⁺ from aqueous solutions by Moringa oleifera bark: equilibrium and kinetic studies. **Journal of Hazardous Materials**, v. 174, n. 1-3, p. 831-838, 2010.

REDDY, D. H. K.; *et al.* Biosorption of Ni(II) from aqueous phase by Moringa oleifera bark, a low cost biosorbent. **Desalination**, v. 268, n. 1-3, p. 150-157, 2011.

ROBLES, J. O.; REGALBUTO, J. R. The engineering of Pt/carbon catalyst preparation for application on Proton Exchange Fuel Cell Membrane (PEFCM). **Progress Report**, 2004.

RODRIGUEZ-NARVAEZ, O. M.; *et al.* Treatment technologies for emerging contaminants in water: A review. **Chemical Engineering Journal**, 2017.

ROJAS, L. B. A.; GOMES, M. B. Metformin: an old but still the best treatment for type 2 diabetes. **Diabetology and Metabolic Syndrome**, 2013.

SADH, P. K.; DUHAN, S.; DUHAN, J. S. Agro-industrial wastes and their utilization using solid state fermentation: a review. **Bioresources and Bioprocessing**, 2018.

SANTOS, E. O.; *et al.* Resíduo da agroindústria como coagulante natural em estação de tratamento de efluente. **Revista Brasileira de Meio Ambiente**, 2021.

SANTOS, T. R. T.; *et al.* Magnetic coagulant based on moringa oleifera seeds extract and super paramagnetic nanoparticles: Optimization of operational conditions and reuse evaluation. **Desalination and Water Treatment**, 2018.

SARI, A. N.; AFFANDI, M. I.; ABIDIN, Z. Analisis keterkaitan dan pengganda perkebunan dan agroindustri kelapa sawit terhadap perekonomian wilayah provinsi Lampung. **Sosio Ekonomika**, 2014.

SCHUHMACHER, M. C.; KUESTER, S. Identification of lead user characteristics driving the quality of service innovation ideas. **Creativity and Innovation Management**, 2012.

SHIRAHIGUE, L. D.; CECCATO-ANTONINI, S. R. Agro-industrial wastes as sources of bioactive compounds for food and fermentation industries. **Ciencia Rural**, 2020.

SILVA, B.; *et al.* Waste-based biosorbents as cost-effective alternatives to commercial adsorbents for the retention of fluoxetine from water. **Separation and Purification Technology**, 2020.

SOLÍS JIMÉNEZ, E. M. DE LOS Á.; CERVANTES, G.; TURPIN MARION, S. Revaluation of wastes generated in agroindustry in guanajuato applying principles of industrial ecology. **Revista Internacional de Contaminacion Ambiental**, 2019.

SOUNDARARAJAN, K.; JANARDHAN REDDY, K. Cost-reduction and quality improvement using DMAIC in the SMEs. **International Journal of Productivity and Performance Management**, 2019.

SYA'BANAH, N.; *et al.* Characterization and effectiveness of moringa oleifera seeds extract as a phosphate coagulant. **Jurnal Neutrino**, 2020.

TANRISEVER, F.; *et al.* Managing capital market frictions via cost-reduction investments. **Manufacturing and Service Operations Management**, 2021.

TOMCZYK, A.; SOKOŁOWSKA, Z.; BOGUTA, P. Biochar physicochemical properties: pyrolysis temperature and feedstock kind effects. **Reviews in Environmental Science and Biotechnology**, 2020.

TORTORELLA, G. L.; *et al.* Healthcare costs' reduction through the integration of Healthcare 4.0 technologies in developing economies. **Total Quality Management and Business Excellence**, 2022.

TSAL, J. H.; *et al.* Adsorption characteristics of acetone, chloroform and acetonitrile on sludge-derived adsorbent, commercial granular activated carbon and activated carbon fibers. **Journal of Hazardous Materials**, 2008.

TSATSAKIS, A. M.; *et al.* Impact on environment, ecosystem, diversity and health from culturing and using GMOs as feed and food **Food and Chemical Toxicology**, 2017.

VENESZ, B.; DÖRY, T.; RAIŠIENĖ, A. G. Characteristics of lead users in different stages of the new product development process: a systematic review in the context of open innovation. **Journal of Open Innovation: Technology, Market, and Complexity**, 2022.

VILLAYERDE, J.; *et al.* Bioremediation of diuron contaminated soils by a novel degrading microbial consortium. **Journal of Environmental Management**, 2017.

VIOLA, E.; MENDES, V. Agricultura 4.0 e mudanças climáticas no Brasil. **Ambiente & Sociedade**, 2022.

WARDAH, S.; *et al.* Methods and approaches of decision support system for coconut agroindustry development and down-streaming: A systematic literature review and future agenda. **International Journal of Supply Chain Management**, 2020.

WERNKE, G.; *et al.* Mathematical modelling applied to the rate-limiting mass transfer step determination of a herbicide biosorption onto fixed-bed columns. **Environmental Technology (United Kingdom)**, 2018.

WILLIAMS, F. E.; *et al.* Moringa oleifera functionalised sand: reuse with non-ionic surfactant dodecyl glucoside. **Journal of Water and Health**, 2017.

WOHLENBERG, J.; *et al.* Sustainability in agriculture: analysing the environmental and social aspects of the family farmers' economy. **Journal of Sustainability Science and Management**, 2022.

WU, Q.; *et al.* The role of rural infrastructure in reducing production costs and promoting resource-conserving agriculture. **International Journal of Environmental Research and Public Health**, 2019.

XIE, Y.; *et al.* A critical review on production, modification and utilization of biochar. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, 2022.

YAASHIKAA, P. R.; *et al.* A critical review on the biochar production techniques, characterization, stability and applications for circular bioeconomy. **Biotechnology Reports**, 2020.

YAASHIKAA, P. R.; KUMAR, P. S.; VARJANI, S. Valorization of agro-industrial wastes for biorefinery process and circular bioeconomy: A critical review. **Bioresource Technology**, 2022.

YUSIANTO, R.; *et al.* Method and mapping of trust and trustworthiness in agroindustry logistic and supply chain: a systematic review. **International Journal of Supply Chain Management**, 2020.

ZAFAR, M. N.; *et al.* Characterization of chemically modified biosorbents from rice bran for biosorption of Ni(II). **Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers**, v. 46, p. 82-88, 2015.

ZELLER, M.; SCHIESARI, C. The unequal allocation of PRONAF resources: which factors determine the intensity of the program across Brazil? **Revista de Economia e Sociologia Rural**, 2020.