

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO RIO
GRANDE DO NORTE
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM USO SUSTENTÁVEL DE
RECURSOS NATURAIS
MESTRADO PROFISSIONAL**

THIPHANIE KAROLINNE MEDEIROS ALBUQUERQUE SILVA

**UTILIZAÇÃO DE BIOCARVÃO PARA ADSORÇÃO DE GLIFOSATO EM
MEIO AQUOSO**

NATAL, RN.

2025

THIPHANIE KAROLINNE MEDEIROS ALBUQUERQUE SILVA

**UTILIZAÇÃO DE BIOCÁRVÃO PARA ADSORÇÃO DE GLIFOSATO EM
MEIO AQUOSO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Uso Sustentável de Recursos Naturais do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte, na Linha de Sustentabilidade e Gestão dos Recursos Naturais, em cumprimento às exigências legais como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Ciências Ambientais.

Orientador: Dr. Roberto Rodrigues Cunha Lima

NATAL, RN.
2025

Silva, Thiphane Karolinne Medeiros Albuquerque.
S586u Utilização de biocarvão para absorção de glifosato em meio aquoso /
Thiphane Karolinne Medeiros Albuquerque Silva. – 2025.
40 f. : il. color.

Dissertação (mestrado) – Instituto Federal de Educação, Ciência e
Tecnologia do Rio Grande do Norte, Natal, 2025.
Orientador(a): Dr. Roberto Rodrigues Cunha Lima.

1. Biocarvão. 2. Coco verde. 3. Adsorção. 4. Glifosato. 5. Tratamento
de água. I. Título.

SIBi/IFRN

CDU 502.131.1

THIPHANIE KAROLINNE MEDEIROS ALBUQUERQUE SILVA

UTILIZAÇÃO DE BIOCARVÃO PARA ADSORÇÃO DE GLIFOSATO EM MEIO AQUOSO


Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Uso Sustentável de Recursos Naturais do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte, na Linha de Sustentabilidade e Gestão dos Recursos Naturais, em cumprimento às exigências legais como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Ciências Ambientais.

Orientador: Dr. Roberto Rodrigues Cunha Lima


Banca examinadora:

Documento assinado digitalmente
 ROBERTO RODRIGUES CUNHA LIMA
Data: 17/09/2025 15:10:49-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Orientador Prof. Dr. Roberto Rodrigues Cunha Lima

Documento assinado digitalmente
 DOUGLISNILSON DE MORAIS FERREIRA
Data: 17/09/2025 11:38:36-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Avaliador - Dr. Douglisnilson de Moraes Ferreira

Documento assinado digitalmente
 MIGUEL CABRAL DE MACEDO NETO
Data: 16/09/2025 12:49:35-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Avaliador - Dr. Miguel Cabral de Macedo Neto

NATAL, RN.

2025

RESUMO

O glifosato, um dos agrotóxicos mais comercializados, é o ingrediente ativo em mais de 750 herbicidas de amplo espectro. Sua aplicação em grandes áreas de cultivo e possível uso excessivo, faz com que ele seja frequentemente pesquisado na literatura científica. Apesar de não ser classificado como de toxicidade extrema, há uma crescente atenção mundial sobre seus possíveis efeitos diretos e indiretos à saúde. A adsorção é uma via promissora para a remoção de glifosato, e materiais oriundos de rejeitos agrícolas, como a casca de coco verde, surgem como uma alternativa sustentável. O Brasil é um dos maiores produtores mundiais de coco, gerando milhões de toneladas de cascas de coco verde não aproveitadas anualmente – até 3 milhões de toneladas por ano. Essas cascas representam um vasto recurso lignocelulósico que pode ser convertido em biocarvão a partir de tratamento térmico. Este trabalho teve como objetivo principal avaliar a eficiência do biocarvão produzido a partir de resíduos das cascas de coco verde como biossorvente na remoção de glifosato em meio aquoso. Os resultados e discussões demonstraram que todas as amostras de biocarvão foram obtidas satisfatoriamente pelo processo de pirólise. A eficiência de adsorção da amostra A7 foi de 84,36%. A adsorção de glifosato aumentou rapidamente em baixas concentrações e de forma mais lenta até a saturação dos sítios na superfície do adsorvente. Ambos os modelos de Langmuir e Freundlich apresentaram excelentes ajustes aos dados, o que é consistente com a literatura mais recente, indicando que a adsorção de glifosato em biocarvão pode envolver múltiplos mecanismos, incluindo atração eletrostática, aprisionamento físico em poros e exclusão por tamanho. As análises de EDS indicaram alterações na composição elementar (redução de carbono e oxigênio e aparecimento de fósforo) nas amostras pós-adsorção, o que atesta a eficácia do processo de adsorção do glifosato. Em conclusão, os resultados obtidos indicam que o biocarvão de casca de coco verde tem um potencial promissor como adsorvente para a remoção de glifosato em meio aquoso. A elevada eficiência de adsorção verificada com uma pequena massa de adsorvente sugere que não seriam necessárias grandes quantidades de biocarvão para o tratamento de águas contaminadas, contribuindo com o processo de tratamento de águas e para a promoção de uma agricultura brasileira sustentável, com consumo e produção responsáveis.

Palavras-chave: Biocarvão; coco verde; adsorção; glifosato; tratamento de água.

ABSTRACT

Glyphosate, one of the most widely sold pesticides, is the active ingredient in over 750 broad-spectrum herbicides. Its application across large crop areas and potential overuse, have led to it being frequently researched in scientific literature. Although it is not classified as extremely toxic, there is growing global attention to its potential direct and indirect health effects. Adsorption is a promising route for glyphosate removal, and materials derived from agricultural waste, such as green coconut husks, are emerging as a sustainable alternative. Brazil is one of the world's largest coconut producers, generating millions of tons of unused green coconut husks annually—up to 3 million tons per year. These husks represent a vast lignocellulosic resource that can be converted into biochar through heat treatment. The main objective of this study was to evaluate the efficiency of biochar produced from green coconut husk waste as a biosorbent in removing glyphosate from aqueous media. The results and discussions demonstrated that all biochar samples were satisfactorily obtained through the pyrolysis process. The adsorption efficiency of sample A7 was 84.36%. Glyphosate adsorption increased rapidly at low concentrations and more slowly until the sites on the adsorbent surface were saturated. Both the Langmuir and Freundlich models presented excellent fits to the data, which is consistent with the most recent literature, indicating that glyphosate adsorption on biochar may involve multiple mechanisms, including electrostatic attraction, physical pore trapping, and size exclusion. EDS analyses indicated changes in elemental composition (reduction of carbon and oxygen and appearance of phosphorus) in the post-adsorption samples, attesting to the effectiveness of the glyphosate adsorption process. In conclusion, the results obtained indicate that green coconut shell biochar has promising potential as an adsorbent for glyphosate removal in aqueous media. The high adsorption efficiency observed with a small mass of adsorbent suggests that large quantities of biochar would not be necessary for the treatment of contaminated water, contributing to the water treatment process and to the promotion of sustainable Brazilian agriculture, with responsible consumption and production.

Keywords: Biochar; Green coconut; Adsorption; Glyphosate; Water treatment.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Estrutura molecular do glifosato.....	13
Figura 2 - Moinho de Facas utilizado para triturar as cascas de coco verde.....	20
Figura 3 - Amostras de cascas de coco sendo inseridas no forno tubular horizontal (A) para realização da pirólise e (B) confecção do biocarvão.....	21
Figura 4 - Determinação das curvas de Potenciais de Carga Zero (PCZ), das amostras de biocarvão.....	22
Figura 5 - Leitura no espectrofotômetro UV-Visível.....	23
Figura 6 - Ensaio de adsorção em réplicas.....	24
Figura 7 - Amostra 7 (A7) de biocarvão da casca de coco verde.....	25
Figura 8 - Curvas de Potencial de Carga Zero das amostras de biocarvão.....	25
Figura 9 - Varredura e determinação do λ_{\max} no espectrofotômetro.....	27
Figura 10 - Curva de calibração.....	28
Figura 11 - Determinação do tempo de equilíbrio de adsorção do Glifosato na solução R4 em biocarvão de coco.....	29
Figura 12 - Isoterma de adsorção de glifosato (solução R4) em amostra de biocarvão A7.....	30
Figura 13 - Isotermas obtidas para os modelos de Langmuir (linha azul) e de Freudlich (linha vermelha).....	31
Figura 14 - Imagens MEV-FEG de amostras de biocarvão A7 antes da adsorção.....	32
Figura 15 - Imagens MEV-FEG de amostras de biocarvão A7 depois da adsorção.....	33
Figura 16 - Análises EDS de amostras de biocarvão A7 antes da adsorção.....	34
Figura 17 - Análises EDS de amostras de biocarvão A7 depois da adsorção.....	34

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

A1 Amostra 1, elaborada a 400 graus Celsius por 120 minutos.

A2 Amostra 2, elaborada a 600 graus Celsius por 120 minutos.

A3 Amostra 3, elaborada a 400 graus Celsius por 180 minutos.

A4 Amostra 4, elaborada a 600 graus Celsius por 128 minutos.

A5 Amostra 5, elaborada a 500 graus Celsius por 150 minutos.

A6 Amostra 6, elaborada a 500 graus Celsius por 150 minutos.

A7 Amostra 7, elaborada a 500 graus Celsius por 150 minutos.

°C Graus Celsius

EDS Espectroscopia por Dispersão de Elétrons

Fe Ferro

g Gramas

Ha Hectare

IFRN Instituto Federal do Rio Grande do Norte

Kg Quilogramas

kV Quivolt

L Litros

LACINA Laboratório de Pesquisa em Ciências da Natureza

mg Miligramas

Mg Magnésio

mL Mililitros

PCZ Ponto de Carga Zero

pH Potencial hidrogeniônico

MEV-FEG Microscopia de Varredura Eletrônica

R1 Repetição 1, alíquota de 50 mL da *solução-mãe*, diluídas a 1 L com água destilada.

R2 Repetição 2, alíquota de 100 mL da *solução-mãe*, diluídas a 1 L com água destilada.

R3 Repetição 3, alíquota de 150 mL da *solução-mãe*, diluídas a 1 L com água destilada.

R4 Repetição 4, alíquota de 200 mL da *solução-mãe*, diluídas a 1 L com água destilada.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	10
2. OBJETIVOS.....	11
2.1 Objetivo geral.....	11
2.2 Objetivos específicos.....	11
3. JUSTIFICATIVA.....	12
4. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	12
4.1 Glifosato.....	12
4.2 Biocarvão da Casca de Coco Verde.....	14
4.3 Adsorção.....	16
5. MATERIAIS E MÉTODOS.....	19
5.1 Materiais utilizados.....	19
5.2 Métodos.....	19
6. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	24
7. CONCLUSÃO.....	35
8. REFERÊNCIAS.....	35
9. APÊNDICE A.....	38
10. APÊNDICE B.....	40

1. INTRODUÇÃO

Devido à alta mobilidade nos corpos d'água, os agrotóxicos constituem uma grande preocupação, pois mesmo quando são aplicados diretamente no solo, sobretudo em grandes quantidades, os resíduos contaminantes podem ser lixiviados para os mananciais hídricos (BEZERRA *et al.*, 2022).

Os agrotóxicos têm sido detectados em amostras de águas de diversos mananciais e existem dificuldades na separação desses produtos de meio aquoso, em parte devido à polaridade, estando presentes nas amostras aquosas juntamente com cátions metálicos e ânions inorgânicos, dificultando ainda mais a sua remoção (AMARANTE JUNIOR *et al.*, 2002).

A utilização de agrotóxicos em larga escala na agricultura se inicia na década de 1950, nos Estados Unidos, com a chamada 'Revolução Verde', que teria o intuito de modernizar a agricultura e aumentar sua produtividade. No Brasil, esse movimento chega na década de 1960 com a implantação do Programa Nacional de Defensivos Agrícolas (LOPES, 2018).

O glifosato, um dos agrotóxicos mais comercializados, é um ingrediente ativo em mais de 750 herbicidas diferentes de amplo espectro (CARDOSO; HARTWIG, 2022), costuma ser pulverizado nas plantas em diversos tipos de cultivo, com ação nos sistemas enzimáticos, inibindo o metabolismo de aminoácidos e secando-as lentamente. Em poucos dias ou semanas, pode resultar na presença de resíduos tanto na colheita quanto em animais usados na alimentação humana, além de sua dispersão pelo solo e corpos hídricos (AMARANTE JUNIOR *et al.*, 2002).

Sua aplicação em grandes áreas de cultivo e possível uso excessivo faz com que o glifosato apareça em grande número de pesquisas reportadas na literatura científica. Embora a sua classificação não o aponte como de toxicidade extrema, nos últimos anos cresceu, no mundo inteiro, a atenção sobre a utilização do glifosato devido aos seus possíveis efeitos diretos e indiretos à saúde (BEZERRA *et al.*, 2022).

Vias de remoção de glifosato para a remediação de corpos aquáticos, como a coagulação/filtração por membrana e processos oxidativos avançados, estão sendo estudados, muito embora o processo de adsorção pareça ser a via de remoção mais promissora desse contaminante (BEZERRA *et al.*, 2022).

Adsorventes oriundos de rejeitos de atividades agrícolas, como a casca de coco verde, revestidos de sustentabilidade pelo grande volume, disponibilidade, atoxicidade e de composição básica lignocelulósica, mostram-se como uma alternativa promissora para a remoção de glifosato de meios aquosos (BEZERRA *et al.*, 2022), que permitem a sua aplicação de forma direta ou a partir de modificações químicas (SULTANA *et al.* 2022).

O elevado consumo de coco verde tem aumentado a geração de cascas de coco, agro resíduos de difícil coleta e descarte adequado, constituindo vasta matéria-prima lignocelulósica que pode ser convertida em biocarvão a partir de tratamento térmico (MIOLA *et al.*, 2020; ZAPAROLI, M. *et al.*, 2023).

O Brasil é um dos maiores produtores mundiais de coco, cuja área atual é de 187,5 mil hectares (ha) com uma produtividade de 1,6 bilhão de frutos. Desta produção, 1,5 kg de casca de cada coco consumido pode ser perdida, o que indica uma quantidade de até 3 milhões de toneladas de coco verde não aproveitadas por ano (SOUSA *et al.*, 2007), tornando-se resíduos da cadeia agrícola do coco.

Vários adsorventes foram desenvolvidos para remover o glifosato do solo e de meios aquáticos, como carvão ativado magnético impregnado com Mg e Fe e biocarvões lignocelulósicos, que são sólidos porosos contendo carbono produzido pela conversão termoquímica de materiais orgânicos em uma atmosfera deficiente em oxigênio (DONG, X *et al.*, 2024). Nesse contexto, a utilização da casca de coco verde como adsorvente, é uma alternativa para minimizar os problemas de poluição urbana e ambiental, agregando valor ao resíduo (SOUSA *et al.*, 2007).

Com caráter inovador, neste trabalho foram obtidas amostras de biocarvão a partir de resíduos das cascas de coco verde e foi testada a sua eficácia na remoção de glifosato comercial de meio aquoso.

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

Avaliar a eficiência do biocarvão produzido a partir dos resíduos das cascas de coco verde como bioadsorvente na remoção de glifosato comercial em meio aquoso.

2.2 Objetivos específicos

- a) Produzir diferentes amostras de biocarvões de coco verde, sob tempo e temperatura de pirólise diferentes;
- b) Testar condições para a produção de biocarvão de coco verde com elevada eficácia como adsorvente para glifosato comercial;
- c) Determinar o ponto de carga zero para as amostras de biocarvão de coco verde obtidas;
- d) Realizar ensaios de caracterização de amostras de biocarvão de coco verde pré e pós-adsorção;
- e) Investigar o modelo de isoterma que melhor se ajusta à adsorção de glifosato comercial em biocarvão de coco verde.

3. JUSTIFICATIVA

Proporcionar reaproveitamento de volumoso agro resíduo que pressiona a gestão de resíduos sólidos na região nordeste do Brasil, agregando valor e contribuindo com a redução de emissão de gases estufa. Utilizado na forma de biocarvão, o material adsorvente tem potencial para a remoção de glifosato comercial de meio aquoso contribuindo com o processo de tratamento de águas e para a promoção de uma agricultura brasileira sustentável, com consumo e produção responsáveis.

4. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

4.1 Glifosato

O Brasil é uma grande potência agrícola mundial e o maior consumidor de agrotóxicos do mundo. Os agrotóxicos são constituídos por uma diversa gama de compostos, comercializados em diferentes formulações e concentrações, que podem ser divididos em herbicidas, inseticidas, fungicidas, acaricidas (HO, 2020).

Na última década, o Brasil expandiu em 190 % o mercado de agrotóxicos, o que colocou o país em primeiro lugar no ranking mundial de consumo desse tipo de produto,

desde 2008. O Paraná se destaca no uso de agrotóxicos entre os estados brasileiros, com uso de 12 Kg/ha ano, diante de uma média brasileira de 4 g/ha ano (LOPES *et al.*, 2018).

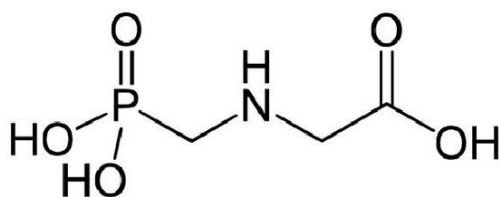
Se por um lado, o uso de agrotóxicos permite uma maior produtividade alimentar ao minimizar os danos causados por pragas, por outro lado, o uso indiscriminado causa sérios impactos ambientais e na e saúde dos trabalhadores rurais e na população em geral (SOUSA *et al.*, 2007).

Um dos agrotóxicos mais comercializados é o glifosato, com aplicações desde a agricultura até ambientes domésticos. As formulações comerciais têm pH em torno de 4,6 e contêm entre 36% e 48% de glifosato, assim como água, sais minerais e adjuvantes (CARDOSO; HARTWIG, 2022).

O glifosato (N-(fosfometil)glicina) é utilizado no país desde a década de 1970, sendo classificado como classe III de perigo ao meio ambiente (CARDOSO; HARTWIG, 2022), é indicado no controle de ervas daninhas anuais e perenes, monocotiledôneas ou dicotiledôneas, classificado como sistêmico e pós-emergente, representando 60% do mercado mundial de herbicidas não seletivos, contabilizando um total de US\$1,2 bilhão/ano com vendas do produto (AMARANTE JUNIOR *et al.*, 2002).

O glifosato contém o grupo amino secundário e o grupo carboxila (Figura 1), apresentando caráter ácido mais pronunciado apesar de suas propriedades anfotéricas (MAYAKADUWA, *et al.*, 2016).

Figura 1: Estrutura molecular do glifosato.



Fonte: <https://www.researchgate.net/publication/340467394>.

Três tipos de glifosato são comercializados: glifosato-isopropilamônio, glifosato-sesquisódio, e glifosato-trimesium. O glifosato tem fórmula molecular $C_3H_8NO_5P$ (massa molar = 169,1 g mol⁻¹) e na forma de sal de isopropilamônio apresenta-se acrescido do grupo $(CH_3)_2CHNH_3^+$ (massa molar = 228,2 g mol⁻¹) (AMARANTE *et al.*, 2002). Em condições ambientais, tanto glifosato quanto seus sais são sólidos cristalinos, muito solúveis em água (12 g L⁻¹ a 25 °C, para glifosato), possui densidade aparente de 0,5

g cm⁻³ e se apresenta bastante estável em presença de luz, inclusive em temperaturas superiores a 60 °C (AMARANTE *et al.*, 2002).

A solubilidade dos agrotóxicos em água é dada em função da temperatura, pH, força iônica e matéria orgânica do solo. Com o aumento da concentração dos íons hidróxidos e do pH, os agrotóxicos ácidos aumentam sua solubilidade, enquanto os agrotóxicos básicos atuam de modo contrário (MANZATTO *et al.*, 2002).

A presença de matéria orgânica dissolvida, como ácidos fúlvicos e húmicos, pode aumentar a solubilidade, como também adjuvantes e conservantes na formulação dos herbicidas, que melhoram a fixação do produto nas plantas, tornando tóxica a atividade sinérgica dessas propriedades (PETERSON *et al.*, 2018)

Os diferentes efeitos ambientais do uso do glifosato estão diretamente relacionados a alguns fatores, como: propriedades da água, temperatura do solo, além da forma como é pulverizado. As sucessivas aplicações de glifosato nas plantações resultam em maior impacto na microbiota do solo, que ao ser espalhado nas folhas e caule das plantas alvo, uma parte é absorvida, no entanto, outra porção atinge o solo e infiltrar-se (MARQUES *et al.*, 2021).

Os impactos do glifosato vão desde a alteração da composição do solo, água ao ar, interferindo nos organismos vivos terrestres e aquáticos, alterando sua morfologia e função dentro do ecossistema. Tem sido associado ao declínio de polinizadores, como abelhas e borboletas, que desempenham um papel crucial na biodiversidade dos ecossistemas, alteração da composição do solo, água e do ar, podendo interferir nos organismos vivos terrestres e aquáticos, alterando sua morfologia e função dentro do ecossistema (LOPES, 2018).

Modificações celulares e, conseqüentemente, associada a alguns tipos de câncer, causando também alterações nos sistemas reprodutores masculinos e femininos, no binômio mãe-feto, malformações congênitas, nascimentos prematuros e micropênis em recém-nascidos, como também doença de Alzheimer (LOPES, 2018), além dos relatos dos efeitos tóxicos em outras espécies não-alvo (YAAH *et al.*, 2023).

4.2 Biocarvão da Casca de Coco Verde

Resíduos agrícolas como cascas de vegetais e frutas, serragem, folhas, farelo e palhadas, modificadas ou não, são alternativas de adsorventes naturais (JAMES *et al.*,

2021), neste contexto, vários adsorventes foram desenvolvidos para remover o glifosato do solo e de meios aquáticos, como carvão ativado magnético impregnado com Mg e Fe e biocarvões lignocelulósicos.

Utilizar materiais oriundos das cascas de coco verde como adsorventes para purificar águas residuárias é uma alternativa interessante por ser um material de alta disponibilidade (SOUSA *et al.*, 2007), pois conforme os últimos dados fornecidos pela Faostat (2021), a área mundial colhida de coco é de 11,8 milhões de hectares, produzindo 62,9 milhões de toneladas do fruto.

O coqueiro está sendo cultivado em quase todo o Brasil, cuja área atual é de 187,5 mil ha com uma produtividade de 1,6 bilhão de frutos. Desta produção, aproximadamente 1,5 kg de casca de cada coco consumido é perdida, o que indica uma quantidade de até três milhões de toneladas de coco verde não aproveitadas por ano (SOUSA *et al.*, 2007), devido à falta de gestão e investimento por parte do setor público ou privado, as cascas não são reutilizadas, tornando-se resíduos da cadeia agrícola do coco.

A disposição muitas vezes inadequada das cascas de coco, cuja destinação mais usual são os aterros sanitários, vazadouros e lixões, representa um custo expressivo nos gastos com limpeza urbana, contribuindo com a proliferação de insetos e outros vetores de doenças, como a dengue, além de causar mau cheiro e contaminação do solo e de corpos d'água devido à lixiviação de compostos (JAMES *et al.*, 2021).

Cerca de 33% a 35% do coco é a casca e 20% a 30% da casca é fibra. A casca, em peso seco, é composta por 70% de miolo e 30% de fibra, e é composta em média por 36,15% de lignina, 33,61% de celulose, 29,27% de pentosano e 0,61% de cinzas. A fibra de coco consiste em média de 35,0% de celulose, 25,2% de lignina, 7,5% de pentosanos, 1,8% de gorduras e resinas, 8,7% de cinzas, 11,9% de umidade e 10,6% de outras substâncias (JAMES *et al.*, 2021).

Durante a combustão da casca de coco já seco, a maior perda de massa (83,4%), ocorre na faixa entre 200 °C (temperatura de ignição) e 450 °C (temperatura de pico), em um intervalo de 20 a 42 minutos. De modo geral, uma curva termogravimétrica obtida da pirólise desse material, divide-se em três fases: a primeira (temperaturas ≤ 200 °C) caracterizada por uma ligeira perda de massa (≤ 10 %) em função da secagem e da liberação de voláteis, a segunda (temperaturas de 200 °C a 500 °C), quando ocorre a decomposição térmica da hemicelulose, da celulose e da lignina, com diminuição

significativa da massa ($\geq 40\%$) e a terceira fase (temperaturas $\geq 500\text{ }^{\circ}\text{C}$) com a decomposição de componentes de elevada massa molecular (SULTANA *et al.*, 2022).

O biocarvão é um sólido poroso contendo carbono produzido pela conversão termoquímica de materiais orgânicos em uma atmosfera deficiente em oxigênio. À medida que a temperatura aumenta, uma estrutura de poros polidispersos é gradualmente formada e sua proporção de superfície aumenta (DONG, X *et al.*, 2024).

Cascas de coco e fibra de coco possuem propriedades benéficas como estabilidade estrutural, alta capacidade de adsorção e estrutura porosa, tornando-os excelentes biossorventes para poluentes de águas poluídas. As cascas de coco têm potencial para serem utilizadas de forma mais eficaz na forma de biocarvão e carvão ativado. A carbonização de uma tonelada de casca de coco produz 300 kg de carvão, que por sua vez, pode ser convertido em 120 kg de carvão ativado (JAMES *et al.*, 2021).

O processo de pirólise é dividido em três etapas: pré-pirólise, pirólise principal e formação de produtos carbonáceos. A fase de pré-pirólise ocorre desde a temperatura ambiente até 200°C , durante a qual a umidade e os voláteis são liberados. A evaporação da água leva à quebra das ligações e à formação de peróxido de hidrogênio, grupos -COOH e -CO (DONG, X *et al.*, 2024).

O estágio principal de pirólise de 200°C a 500°C envolve aromatização adicional e condensação intramolecular de hemicelulose e celulose, resultando na formação de biocarvão sólido, a etapa final, acima de 500°C , envolve a degradação da lignina e de outras substâncias orgânicas com fortes ligações químicas (DONG, X *et al.*, 2024).

Apesar da diversidade de tecnologias disponíveis para tratamento de água, existem limitações de eficiência, processo e de custos. A adsorção é um método eficaz para tratamento de água de diversas fontes e finalidades, e os resíduos agrícolas são uma fonte mais promissora e sustentável para a produção de materiais adsorventes (SULTANA *et al.*, 2022).

4.3 Adsorção

Adsorção é o mecanismo no qual uma molécula ou íon presente em uma fase gasosa ou líquida permanece em uma superfície sólida, em que o adsorbato não penetra na estrutura do adsorvente. A adsorção é uma técnica muito viável para remoção de contaminantes de meios aquosos devido a facilidade de operação, flexibilidade e ausência de formação de subprodutos. Basicamente, os adsorventes são classificados em três tipos:

adsorventes orgânicos naturais, adsorventes inorgânicos naturais e adsorventes sintéticos (RATHI, 2021).

Os adsorventes foram classificados em cinco tipos: resíduos agrícolas e domésticos, fabricação de subprodutos, efluentes, componentes marinhos, solo e componentes minerais (RATHI, 2021).

A adsorção pode ser classificada com base na energia envolvida na interação como o adsorbato é adsorvido na superfície adsorvente: adsorção física e adsorção química. Os parâmetros que influenciam o mecanismo de adsorção incluem: área superficial do adsorvente, natureza do adsorbato, concentração inicial de adsorbato, pH da solução, temperatura, dosagem de adsorventes, tempo de contato, competição com outros solutos e pressão (RATHI, 2021).

Isotermas de adsorção são representações gráficas que exibem as alterações na concentração de equilíbrio no adsorvente em relação à concentração de adsorbato da fase líquida, em uma temperatura específica (NASCIMENTO, 2014).

Uma isoterma de adsorção é uma representação matemática que indica a quantidade de um soluto adsorvido por uma superfície adsorvente, em relação à concentração de equilíbrio desse soluto na solução, mantendo-se a temperatura constante. É obtida de forma simples a partir da adição de uma massa de adsorvente a um volume determinado (V) de diferentes soluções com concentrações iniciais conhecidas (C_0). No tempo de equilíbrio, plota-se a capacidade de adsorção (q_e) em relação à concentração de equilíbrio (C_e), obtendo-se gráficos de (q_e) no eixo vertical, em função de (C_e) no eixo horizontal (NASCIMENTO, 2014).

É possível determinar a capacidade de adsorção do adsorvente por meio da equação (1):

$$q_e = \frac{(C_0 - C_e) \cdot V}{m} \quad (1)$$

Onde:

q_e : Capacidade de adsorção do adsorvente;

C_0 : Concentração inicial do adsorbato;

C_e : Concentração do adsorbato no estado de equilíbrio (em mol.L⁻¹ ou g.L⁻¹);

V : Volume da solução;

m : Massa do adsorvente;

Entre os modelos matemáticos de isotermas de adsorção, os dois mais amplamente utilizados são o de Langmuir e o de Freundlich. Enquanto no modelo de Langmuir (Equação 2) a premissa é de que a adsorção ocorre em monocamada, em locais específicos do adsorvente, até que o equilíbrio adsorção-dessorção seja atingido (LANGMUIR, 1918), no modelo de isoterma de Freundlich (Equação 3) considera-se a ideia da formação de multicamadas do adsorvato atraídas eletrostaticamente pela superfície do adsorvente (ARMBRUSTER; AUSTIN, 1944).

$$q_e = \frac{K_L \cdot b \cdot C_e}{1 + K_L \cdot C_e} \quad (2)$$

Onde:

q_e : Quantidade de material adsorvido em $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$;

C_e : Concentração do adsorvato em equilíbrio em $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$;

K_L : Constante de afinidade de Langmuir (em $\text{L} \cdot \text{mg}^{-1}$);

b : Capacidade máxima de adsorção $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$.

$$q_e = K_F \cdot C_e^{1/n} \quad (3)$$

Onde:

q_e : Quantidade de soluto adsorvido (em $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$);

K_F : Constante de Freundlich (em $\text{mol} \cdot \text{g}^{-1}$ ou $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$);

C_e : Concentração de equilíbrio em solução (em $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$);

$1/n$: Parâmetro empírico.

Vários fatores influenciam a adsorção de agrotóxicos: o tipo e a concentração dos solutos na solução do solo, o tipo e a quantidade de minerais de argila, a quantidade de matéria orgânica no solo, temperatura, o composto específico envolvido (MANZATTO *et al.*, 2002) e principalmente, o pH (ZAPAROLI *et al.*, 2023).

O glifosato tem caráter anfotérico e a capacidade de adsorção apresenta respostas diferentes de acordo com a protonação e desprotonação dos grupos funcionais, fortemente dependente do pH do meio. Entre pH 2,2 e 5,4, o herbicida se mostra com predominância da forma ionizada e carregado negativamente (ZAPAROLI *et al.*, 2023).

A adsorção de agroquímicos em amostras de biocarvão envolve múltiplos mecanismos. Inicialmente, os grupos funcionais carregados presentes na superfície do biocarvão interagem com as moléculas carregadas do pesticida através da atração eletrostática. Além disso, as moléculas dos agroquímicos podem ficar fisicamente presas nos poros do biocarvão. Esta interação é uma força não covalente que envolve a atração entre sistemas ricos em elétrons paralelos ou quase paralelos, ajudando a estabilizar as moléculas dos agroquímicos na superfície do biocarvão e a melhorar a capacidade e eficiência de adsorção (DONG, X *et al.*, 2024).

5. MATERIAIS E MÉTODOS

5.1 Materiais utilizados

Coco verde: fornecido por fazendas parceiras, localizadas nas cidades da área metropolitana de Natal (RN).

Glifosato comercial: Herbicida AKB Glifosato 480

Hidróxido de sódio: Vetec

Ácido clorídrico: Vetec

Moinho de facas: STAR FT-50

Forno tubular horizontal: Jung

PHmetro: Thermo Scientific A211

Balança analítica: Shimadzu AY220

Espectrofotômetro UV-Visível: Hitachi U-2900

Metalizadora: BAL-TEC SCD 005

MEV-FEG: Carl Zeiss - Auriga

EDS: Bruker 410-M

Softwares: Protimiza Experimental Desing e Origin 8

5.2 Métodos

Os experimentos foram realizados no Lacina - Laboratório de Pesquisa em Ciências da Natureza do Campus Natal Central do Instituto Federal do Rio Grande do Norte (IFRN), localizado na cidade de Natal (RN).

Inicialmente, foram obtidas amostras de biocarvão, elaborado a partir da pirólise de cascas de coco pré-tratadas e secas, reaproveitadas da produção local de coco verde e água de coco.

As cascas cortadas em tamanho adequado para trituração em moinho foram lavadas com solução de hipoclorito de sódio a 2,5 % e, posteriormente, com água destilada. Após secagem em estufa por três dias a 80 °C, as amostras foram trituradas em Moinho de Facas (Figura 2).

Figura 2: Moinho de Facas utilizado para triturar as cascas de coco verde.



Uma pesquisa bibliográfica foi realizada e estudos como em Zaparoli *et al.* (2023), Sousa *et al.* (2007) e o delineamento experimental, utilizando o software *Protimiza Experimental Design* - disponibilizado de forma on-line, foram utilizados para a determinação das variáveis de tempo e temperatura de pirólise. Para tal, foi utilizada a metodologia de delineamento de composto central para a geração das condições dos ensaios (Tabela 1).

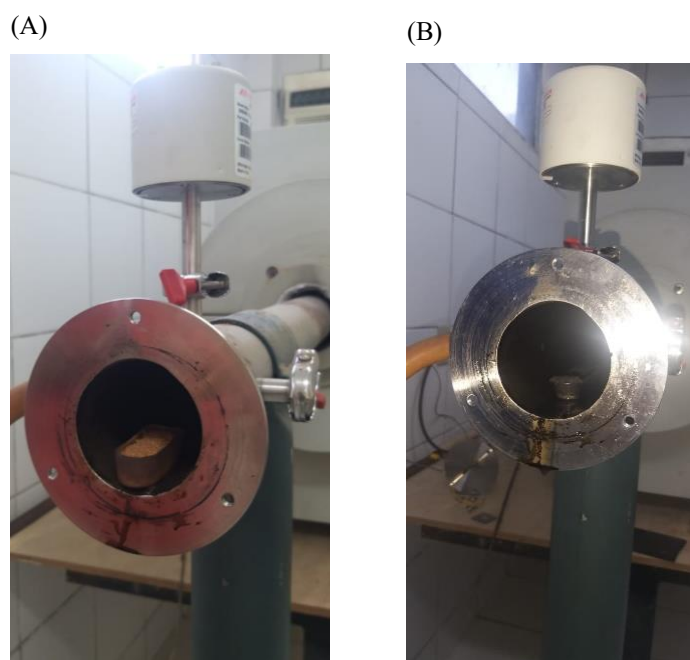
Tabela 1: Variáveis de temperatura e tempo em que os carvões foram confeccionados.

Amostras	Temperatura (°C)	Tempo (Minutos)
1	400°	120
2	600°	120

3	400°	180
4	600°	180
5	500°	150
6	500°	150
7	500°	150

A pirólise lenta das amostras de agro resíduo (cascas de coco verde) foi realizada em forno tubular horizontal, com taxa de aquecimento de 10 °C/min sob vácuo parcial para minimizar o fluxo de oxigênio no processo (Figura 3).

Figura 3: Amostras de cascas de coco sendo inseridas no forno tubular horizontal (A) para realização da pirólise e (B) confecção do biocarvão.



Posteriormente, para a determinação das curvas de Potenciais de Carga Zero (PCZ) das amostras de biocarvão (Figura 4), foi realizada a mensuração do potencial hidrogeniônico (pH), a partir de agitação magnética de soluções de NaCl 0,1 mol L⁻¹, misturadas a 0,2 g de cada amostra do biocarvão produzido, por 24 h à temperatura ambiente, ajustadas ao pH de 1 a 13 utilizando soluções de HCl e de NaOH ambas a 0,1 mol L⁻¹, conforme descrito por Giacomini *et al.* (2018).

Figura 4: Determinação das curvas de Potenciais de Carga Zero (PCZ), das amostras de biocarvão.



Com os resultados satisfatórios da determinação do Potencial de Carga Zero , foram escolhidas para a sequência metodológica as amostras de ponto central (A7).

Em seguida, para a elaboração da curva de calibração, foi realizada uma varredura no espectrofotômetro UV-Visível utilizando o que foi denominada “*solução-mãe*” de herbicida comercial preparada com concentração de 10,0 g/L de glifosato, ajustada ao pH 3 com base no resultado do PCZ, para a determinação do comprimento de onda de máxima absorção (λ_{\max}).

O espectrofotômetro foi ajustado ao valor encontrado de $\lambda_{\max} = 225$ nm (Figura 5), para que, assim, as absorbâncias de outras quatro soluções de glifosato comercial, que foram elaboradas com alíquotas de 50 mL (R1), 100 mL (R2), 150 mL (R3) e 200 mL (R4) da *solução-mãe*, diluídas a 1 L com água destilada, também fossem determinadas para a obtenção da curva de calibração. Para a conversão de Absorbância em Concentração (g/L) foi empregada a Lei de Lambert-Beer (Equação 4).

$$A = \epsilon.l.c \quad (4)$$

Na equação (4), “c” representa a concentração (g/L) da espécie em solução, “l” a distância percorrida pela radiação através da solução e ϵ o coeficiente de absorvidade da espécie em estudo.

Figura 5: Leitura no espectrofotômetro UV-Visível.



Para a determinação do tempo de equilíbrio de adsorção, amostra de 5 g de biocarvão foi acrescentada a 100 mL de água e submetida à agitação magnética por 1h, centrifugada e seca em estufa a 60 °C por 24 h. Posteriormente, amostras de 0,25 g do biocarvão foram submetidas à agitação magnética em 25 mL das soluções com pH ajustado para 3, em réplicas, nos seguintes tempos de agitação: 0,5, 1, 2, 5, 10, 15, 20, 40, 60 e 80 min. Após cada medida e separação da fase sólida, as absorbâncias das soluções foram aferidas para a determinação do tempo de equilíbrio da adsorção do glifosato pelo biocarvão de casca de coco.

Com o tempo de equilíbrio definido, foram realizados ensaios de adsorção em réplicas (Figura 6), para os quais 0,2 g de amostras de biocarvão foram agitados em 20 mL de cada uma das soluções (*solução-mãe* e diluições) com pH igual 3, com as respectivas medidas de suas absorbâncias para a determinação da capacidade de adsorção e confecção das isotermas. Foram testados os modelos de Langmuir e Freundlich para verificar qual apresentaria melhor ajuste dos dados obtidos.

Figura 6: Ensaios de adsorção em réplicas.



Por fim, amostras do biocarvão pré e pós-adsorção utilizados nos ensaios foram separadas e encaminhadas para análises de caracterização.

As imagens de MEV-FEG foram obtidas com aceleração de feixe de elétrons em 15 kV, com ampliação de 500 e 2.000 vezes, com distância de trabalho de 8.400 μm . Foi realizada Espectroscopia por Dispersão de Elétrons (EDS) em alguns campos selecionados a partir das imagens de MEV-FEG.

6. RESULTADOS E DISCUSSÃO

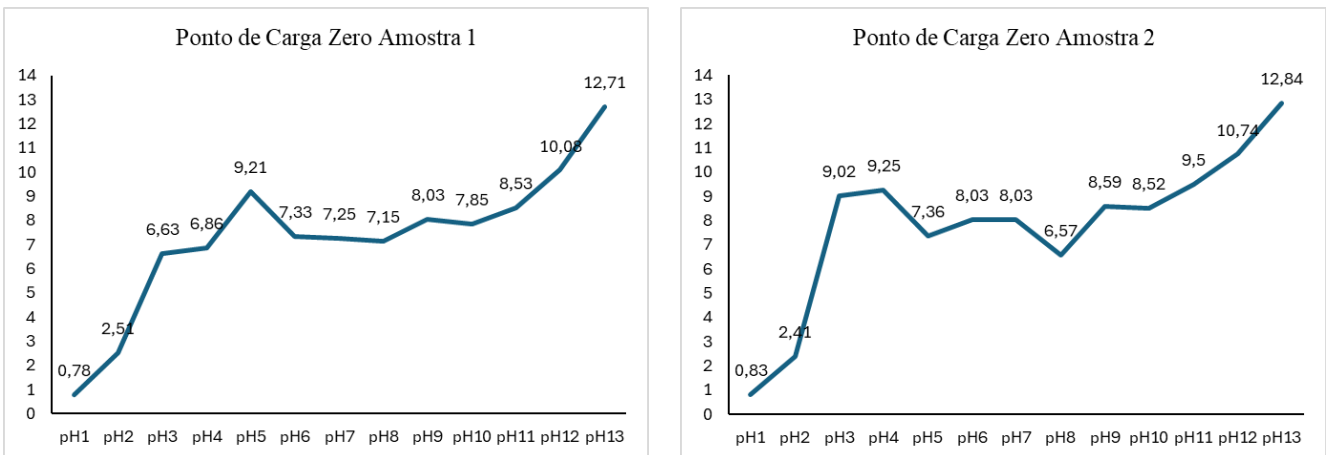
Todas as amostras de biocarvões (Figura 7) foram obtidas de forma satisfatória com o processo de pirólise em forno tubular horizontal sob vácuo, sendo confeccionados cinco tipos de biocarvões com um total de sete amostras (três repetições do ponto central), denominadas como Amostra 1 (A1), Amostra 2 (A2), Amostra 3 (A3), Amostra 4 (A4), Amostra 5 (A5), Amostra 6 (A6) e Amostra 7 (A7), conforme condições definidas em delineamento experimental.

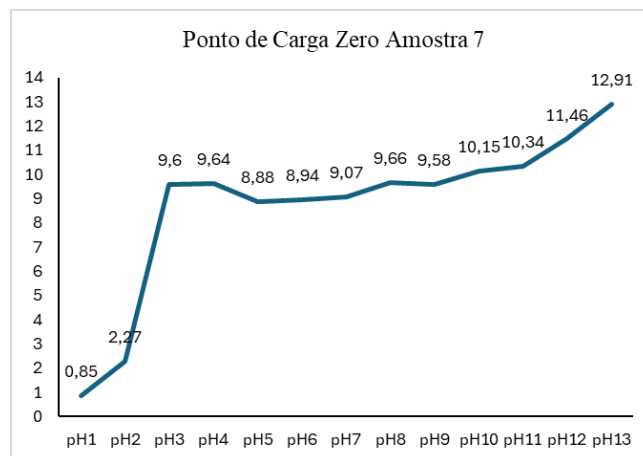
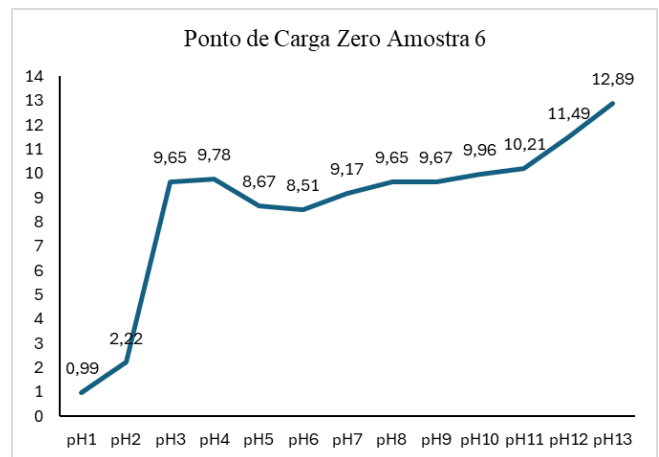
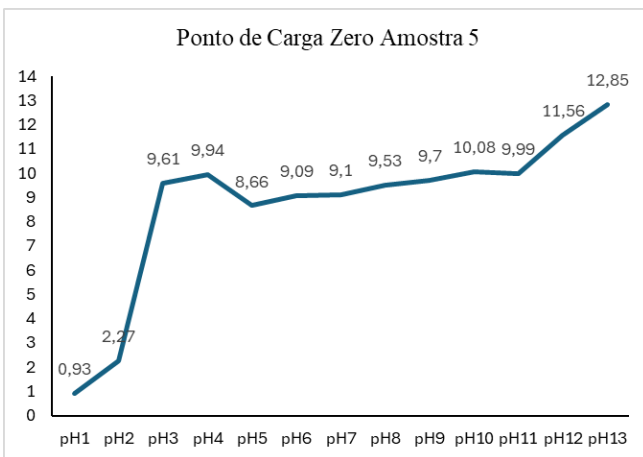
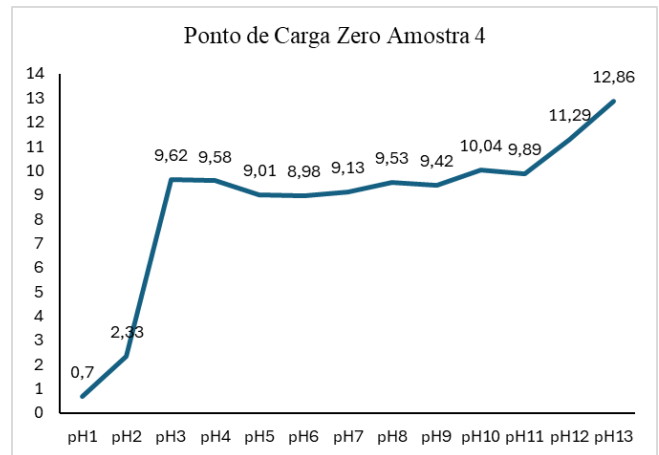
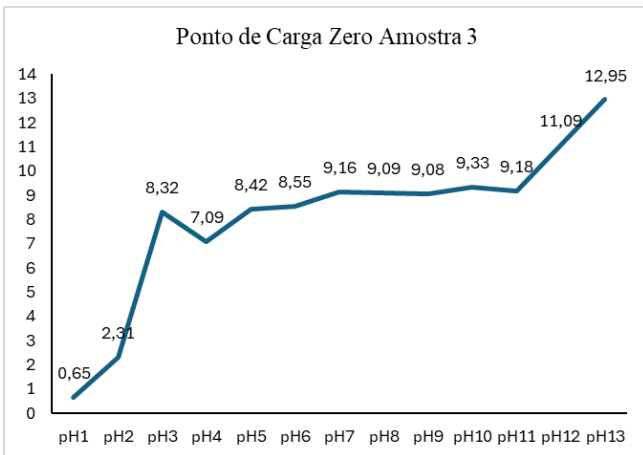
Figura 7: Amostra 7 (A7) de biocarvão da casca de coco verde.



Com o controle e o monitoramento do potencial hidrogeniônico (pH), foram obtidas as curvas de Potencial de Carga Zero das sete amostras, com definição do ponto de carga zero (PCZ) em torno de 7,5 para A1, em torno de 8 para a A2, em torno de 9 para a A3 e em torno de 9,5 para as demais amostras (A4 a A7), conforme representado pelos patamares observados nos gráficos abaixo (Figura 8).

Figura 8: Curvas de Potencial de Carga Zero das amostras de biocarvão.





Os pontos de carga zero representam os níveis de pH nos quais os componentes da superfície atingem uma carga neutra. Assim, a determinação do PCZ busca otimizar o processo de adsorção através da avaliação da carga superficial do adsorvente. Para valores de pH inferiores ao PCZ a carga superficial do adsorvente é positiva e a adsorção da forma aniônica gerada pela ionização do glifosato é favorecida.

Assim, dado o caráter ácido mais pronunciado do glifosato e a predominância da forma aniônica, foi definido que os demais ensaios seriam realizados utilizando soluções

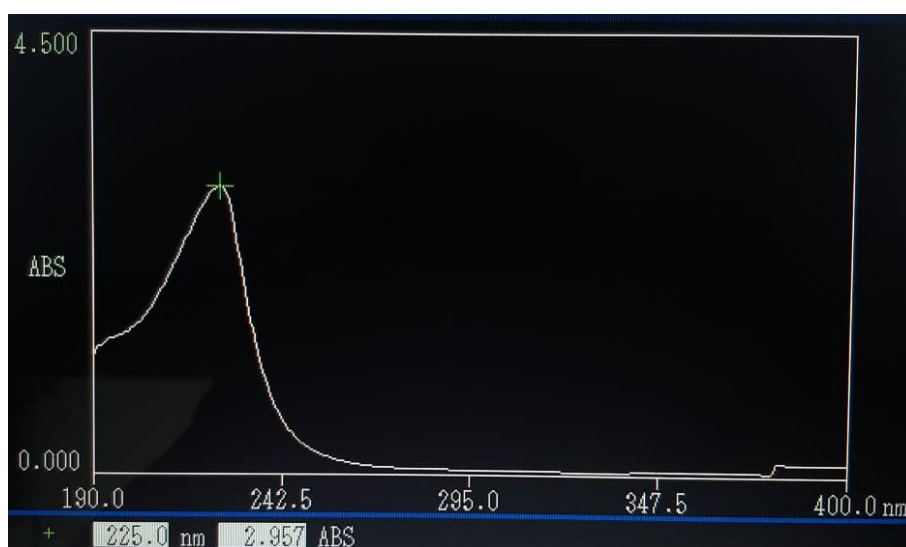
com pH ajustado para 3 a fim de garantir uma superfície positiva das partículas de biocarvão. Zaparoli *et al.* (2023) realizaram ensaios de adsorção em biocarvão de açaí com soluções de glifosato mantidas em pH igual a 4, enquanto Anjali *et al.* (2019) ajustaram o pH das soluções de glifosato para pH 5 em estudos de adsorção em biocarvão de madeira (Sigma-Aldrich). Em ambos os casos foram utilizados glifosatos de elevado grau de pureza (Sigma-Aldrich).

Pelo fato de todas as amostras de biocarvão gerarem curvas nas quais o pH = 3 está abaixo do valor de PCZ e ainda pelo perfil mais aproximado e com patamares mais estáveis das curvas obtidas para as amostras A5, A6 e A7, foi escolhida uma das amostras de ponto central (A7) para utilização nos demais procedimentos.

Importante considerar o caráter inovador do processo metodológico aqui proposto: o de produzir diversas amostras de biocarvão por delineamento experimental, cruzando-se os resultados com a análise dos valores médios de PCZ para a escolha e aplicação da amostra adsorvente mais adequada ao processo desejado.

Com o valor de comprimento de onda de absorção máxima de 225 nm encontrado com a varredura realizada no espectrofotômetro (Figura 9), as absorbâncias de soluções diluídas obtidas (R1, R2, R3 e R4) a partir de alíquotas retiradas da solução-mãe também foram determinadas.

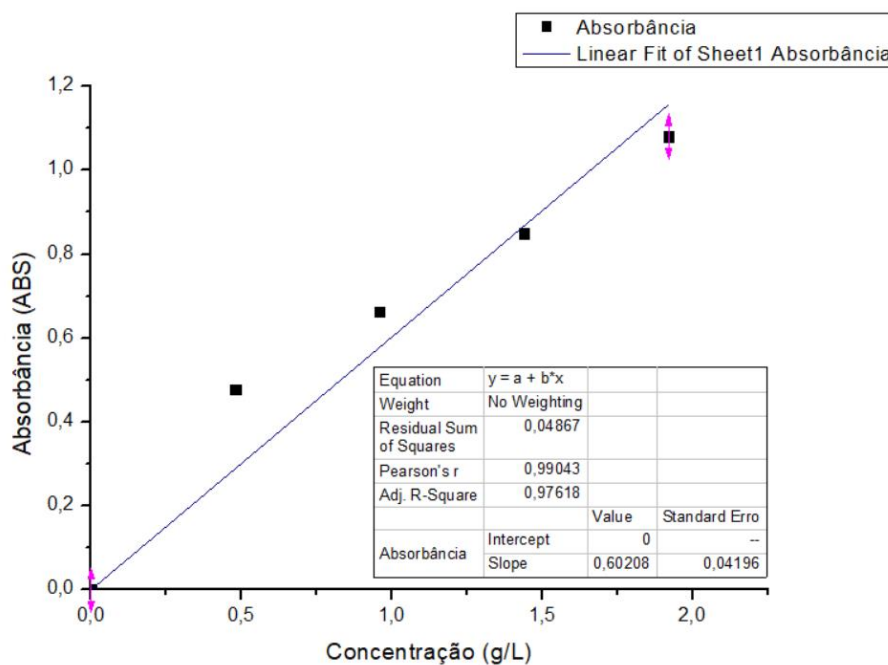
Figura 9: Varredura e determinação do λ_{max} no espectrofotômetro.



Foram mensuradas as absorbâncias médias de 0,477, 0,663, 0,849 e 1,080 para as soluções diluídas R1, R2, R3 e R4, respectivamente, com as suas concentrações

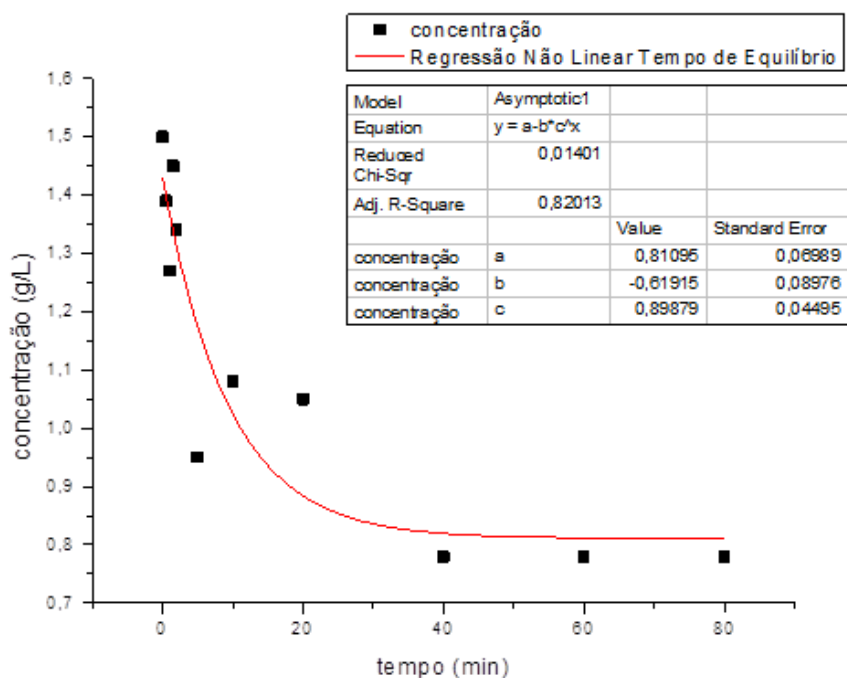
definidas a partir da Lei de Lambert-Beer, posteriormente submetidas à regressão linear, para confecção da curva de calibração (Figura 10).

Figura 10: Curva de calibração.



Foi determinado o tempo de equilíbrio igual a 40 minutos, tempo a partir do qual a absorbância e a conseqüente concentração tornaram-se constantes, indicando que a partir desse momento as velocidades de adsorção e de dessorção mantiveram-se iguais. Verificou-se que o tempo de equilíbrio de adsorção do glifosato em biocarvão A7 foi o mesmo em todas as soluções testadas. A partir desta constatação, os demais testes passaram ser realizados com a solução R4, devido à facilidade de leitura (menor oscilação) no espectrofotômetro UV-Visível e considerando a Lei de Lambert-Beer (Figura 11).

Figura 11: Determinação do tempo de equilíbrio de adsorção do Glifosato na solução R4 em biocarvão de coco.



Em estudos de adsorção de glifosato em amostras de compósitos de biocarvão e em biocarvão, Rallet *et al.* (2022) e Mayakaduwa *et al.* (2016) observaram que o tempo de equilíbrio de adsorção foi alcançado em cerca de 60 minutos.

A partir da média de absorbâncias medidas em triplicata utilizando a solução de glifosato R4, foi calculada a eficiência de adsorção de 84,36 % em amostras de biocarvão A7 (Tabela 2). A eficiência de adsorção verificada aproxima-se daquela obtida por Zapparoli *et al.* (2023) utilizando solução de glifosato de elevada pureza (Sigma-Aldrich) em biocarvão de açaí – 87,9 %; valor um pouco menor do que a eficiência de 100 % relatada por Anjali *et al.* (2019) que utilizaram solução de glifosato de elevada pureza e biocarvão de madeira, ambos com a qualidade Sigma-Aldrich.

Tabela 2: Eficiência de adsorção da amostra de biocarvão A7, em testes de adsorção com a solução de glifosato R4.

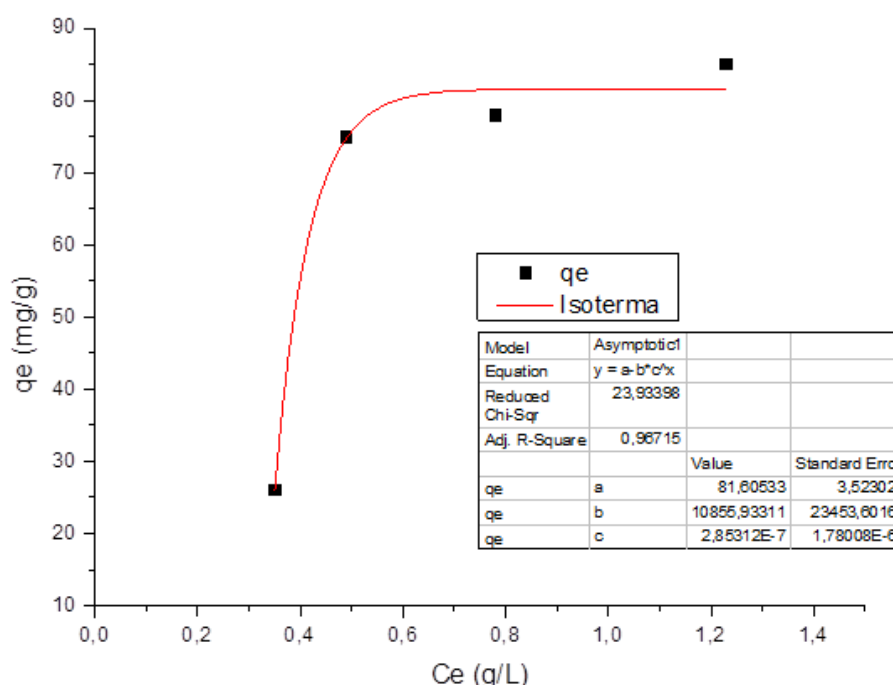
Amostra	Absorbância	Eficiência de adsorção (%)	Desvio Padrão
A7R4	0,145	86,58%	2,22%
A7R4	0,193	82,13%	2,22%
A7R4	0,169	84,36%	0,02%
Média	0,169	84,36%	0,02%

Os ensaios de adsorção em batelada realizados em duplicata, permitiram a determinação dos valores das capacidades de adsorção (q_e) (Tabela 3) e confecção de isoterma de adsorção (Figura 12).

Tabela 3: Capacidades de adsorção (q_e).

C_0 (g/L)	C_e (g/L)	q_e (mg/g)
0,5	0,35	28
1,0	0,49	75
1,5	0,78	78
2,0	1,23	85

Figura 12: Isotherma de adsorção de glifosato (solução R4) em amostra de biocarvão A7.



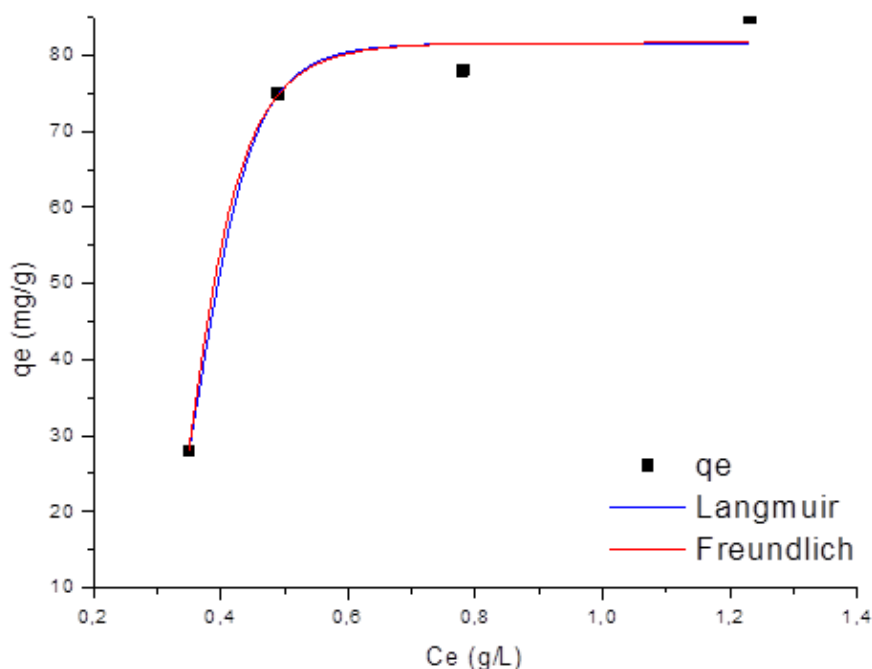
Assim como foi observado por Rallet *et al.* (2022) e também por Zaparoli *et al.* (2023), é possível inferir que a adsorção do glifosato aumentou rapidamente em baixa concentração, e depois de forma mais lenta até estabilizar, considerando que o aumento da concentração de glifosato provocou maior adsorção em uma quantidade maior de sítios disponíveis na superfície do adsorvente até a sua saturação.

Segundo Dong *et al.* (2024), o processo de adsorção em biocarvão pode envolver diversos mecanismos. Inicialmente, grupos funcionais e a superfície carregada do adsorvente podem interagir com regiões carregadas do adsorvato, por meio de atração eletrostática. Posteriormente, interações intermoleculares mais fortes podem também

ocorrer, além de não ser possível descartar a adsorção por exclusão do tamanho de moléculas e íons devido aos diferentes diâmetros dos poros do biocarvão, o que naturalmente exige investigações mais aprofundadas sobre a natureza do processo de adsorção.

Foram testados os modelos de Langmuir e Freundlich para verificar se haveria um melhor ajuste com os dados obtidos (Figura 13), com os resultados revelando excelentes ajustes para ambos os modelos.

Figura 13: Isotermas obtidas para os modelos de Langmuir (linha azul) e de Freundlich (linha vermelha).



Model	LangmuirEX		
Equation	$y = (a \cdot b \cdot x^{(1-c)}) / (1 + b \cdot x^{(1-c)})$		
Reduced Chi-Sqr	23,78775		
Adj. R-Squar	0,96483		
		Value	Standard Err
qe	a	81,61796	3,51582
	b	7161,3107	21195,0266
	c	-8,07261	2,84673

Model	FreundlichE		
Equation	$y = a \cdot x^a (b \cdot x^a (-c))$		
Reduced Chi-Sqr	23,58288		
Adj. R-Squar	0,96513		
		Value	Standard Err
qe	a	81,6456	3,50585
	b	0,00137	0,00383
	c	6,29681	2,66307

Essa impossibilidade de definição entre os modelos testados é compreensível quando são analisados trabalhos mais recentes envolvendo a adsorção de glifosato em biocarvão. Por exemplo, enquanto Anjali *et al.* (2019) e Kumarathilaka *et al.* (2016) indicaram melhores ajustes dos dados ao modelo de Freundlich, Zaparoли *et al.* (2023)

relata melhor ajuste de dados ao modelo de Langmuir, mas também se ajustaram bem ao modelo de Freundlich.

Após metalização e cobertura com fina camada de ouro, imagens de MEV-FEG obtidas de amostras de biocarvão A7, pré e pós-adsorção, revelaram superfícies porosas, irregulares e heterogêneas (Figuras 14 e 15).

Figura 14: Imagens MEV-FEG de amostras de biocarvão A7 antes da adsorção.

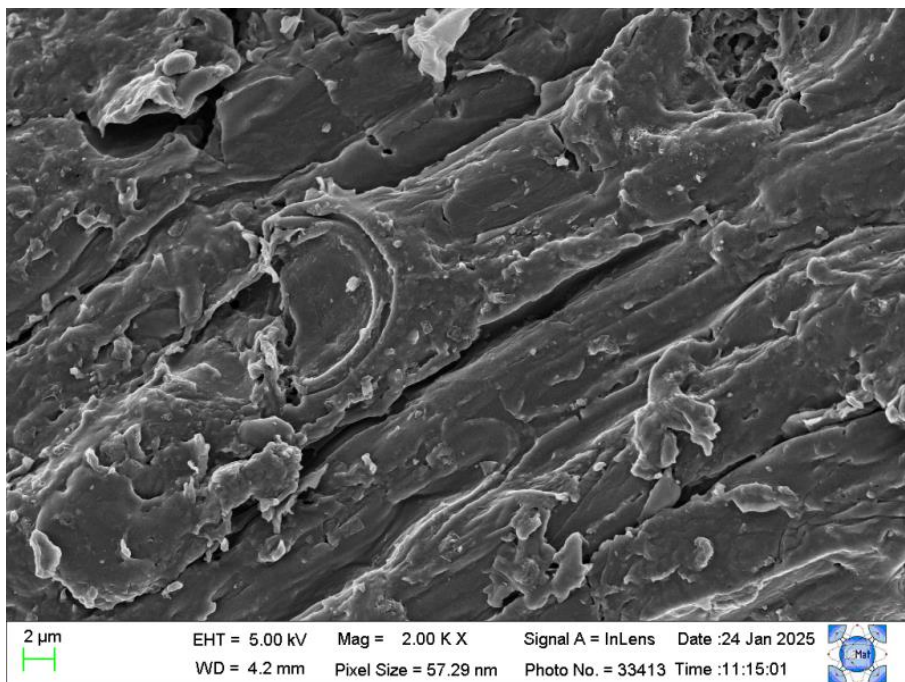
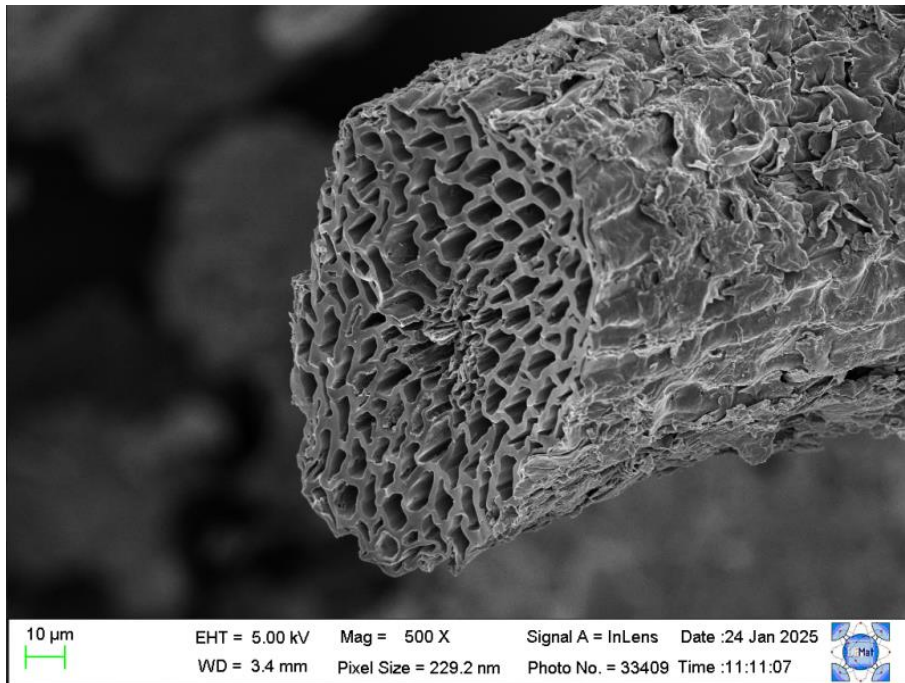
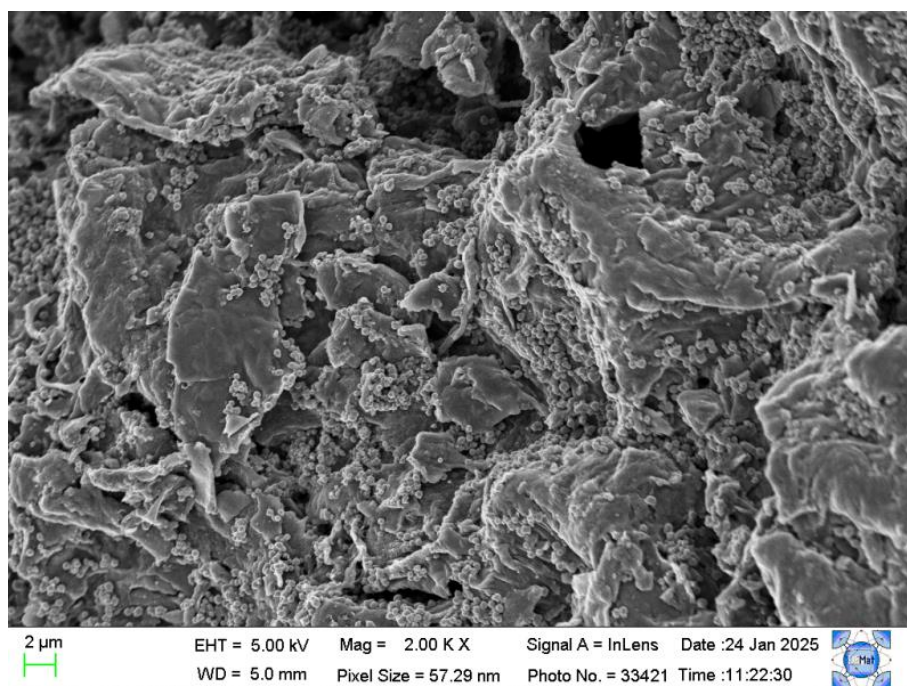
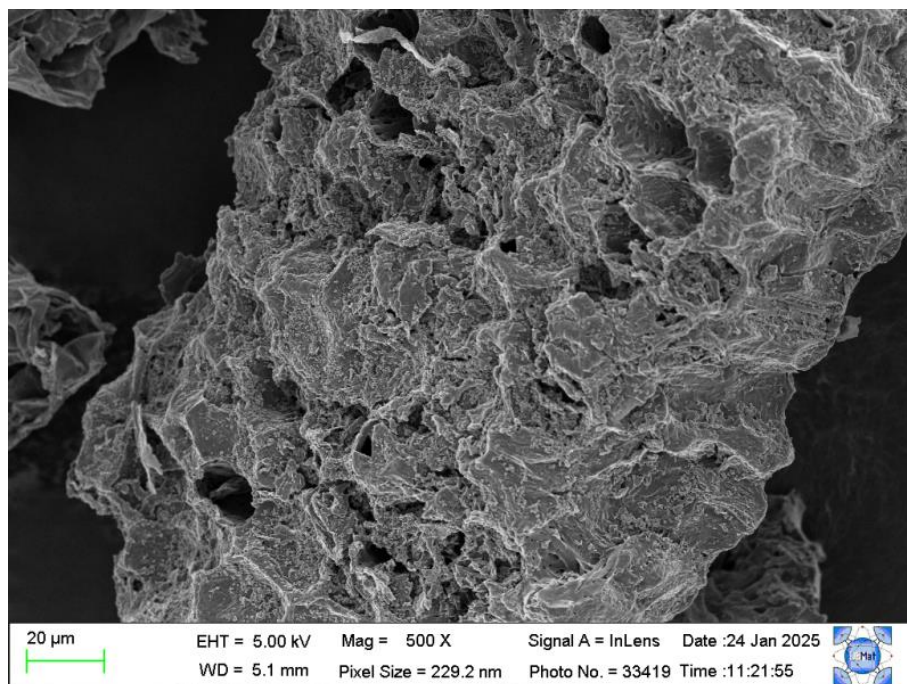


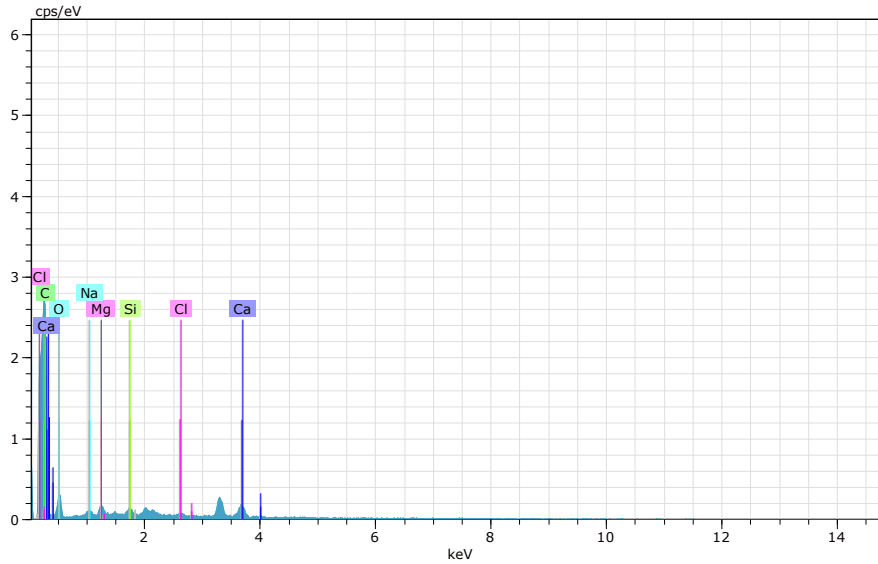
Figura 15: Imagens MEV-FEG de amostras de biocarvão A7 depois da adsorção.



Por fim, análises de EDS das amostras de biocarvão A7, pré e pós-adsorção, apresentaram as composições dos adsorventes, com alteração no percentual de carbono e oxigênio (Figuras 16 e 17). Os resultados comparados indicam a redução da quantidade de carbono e oxigênio e aparecimento de fósforo (e possíveis contaminantes encontrados no glifosato comercial) na amostra de biocarvão A7 analisada pós-adsorção. A variação

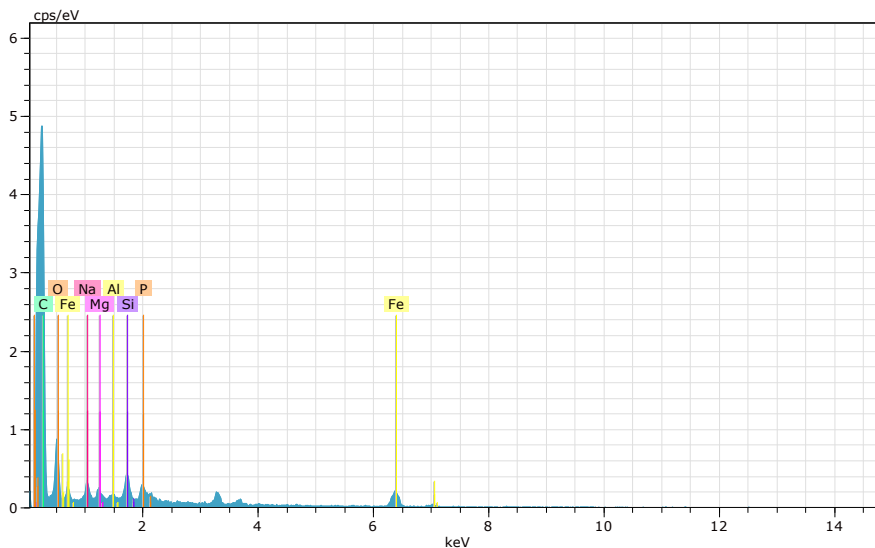
observada nas composições percentuais atesta alterações no biocarvão, provavelmente devido ao processo de adsorção.

Figura 16: Análises EDS de amostras de biocarvão A7 antes da adsorção.



El	AN	Series	unn. [wt.%]	norm. [wt.%]	Atom. [at.%]	Error (1 Sigma) [wt.%]
C	6	K-series	72.70	72.70	80.21	10.17
O	8	K-series	20.85	20.85	17.27	4.52
Ca	20	K-series	4.37	4.37	1.45	0.23
Mg	12	K-series	0.87	0.87	0.48	0.10
Si	14	K-series	0.53	0.53	0.25	0.07
Na	11	K-series	0.47	0.47	0.27	0.08
Cl	17	K-series	0.20	0.20	0.07	0.05
Total:			100.00	100.00	100.00	

Figura 17: Análises EDS de amostras de biocarvão A7 depois da adsorção.



El	AN	Series	unn. C [wt.%]	norm. C [wt.%]	Atom. C [at.%]	Error (1 Sigma) [wt.%]
C	6	K-series	52.68	66.50	77.70	6.83
O	8	K-series	15.90	20.06	17.60	2.69
Fe	26	K-series	6.92	8.74	2.20	0.30
Si	14	K-series	1.11	1.40	0.70	0.08
Na	11	K-series	1.09	1.38	0.84	0.11
P	15	K-series	0.81	1.02	0.46	0.07
Mg	12	K-series	0.50	0.63	0.36	0.06
Al	13	K-series	0.22	0.27	0.14	0.04
Total:			79.23	100.00	100.00	

7. CONCLUSÃO

Os resultados obtidos indicam que o biocarvão apresenta potencial para ser aplicado como adsorvente na remoção do herbicida glifosato de meio aquoso.

A elevada eficiência de adsorção observada em pequena massa de adsorvente sugere que não devem ser necessárias grandes quantidades de biocarvão para o tratamento de águas contaminadas com o herbicida.

É razoável considerar que este trabalho contribuirá para as pesquisas futuras envolvendo a remoção de glifosato de meio aquoso pelo processo de adsorção, sugere-se ainda, a continuidade de pesquisas sobre a capacidade de regeneração do adsorvente para a redução de custos e sustentabilidade, além das diversas possibilidades de se modificar a superfície do biocarvão para potencializar o processo de adsorção e aplicabilidade comercial.

REFERÊNCIAS

ANIALI, G.; HERATH, D.; POH, L.S.; JERN, W. Statistical optimization of glyphosate adsorption by biochar and activated carbon with response surface methodology. **Chemosphere**, [s. l.], v. 227, p. 533-540, 2019.

AMARANTE JUNIOR, O. P.; SANTOS, T. C. R.; BRITO, N. M.; RIBEIRO, M. L. Glifosato: Propriedades, toxicidade, usos e legislação. **Química Nova**, [s. l.], v. 25, n. 4, p. 589-593, 2002.

ARMBRUSTER, M. H.; AUSTIN, J. B. The Adsorption of Gases on Smooth Surfaces of Steel. **Journal of the American Chemical Society**, [s. l.], v. 66, n. 2, p. 159-171, 1944.

BEZERRA, W. F. P.; DOGNANI, G.; ALENCAR, L. N.; PARIZI, M. P. S.; BOINA, R. F.; CABRERA, F. C.; JOB, A. E. Tratamento químico do bagaço de cana-de-açúcar e sua influência na adsorção de glifosato. **Revista Matéria**, [s. l.], v. 27, n. 1, 2022.

CARDOSO, T. C.; HARTWIG, C. A. **Glifosato e meio ambiente: um panorama das principais pesquisas relacionadas ao tema**. [s. l.]: Editora Científica Digital, v. 3, 2022.

DONG, X.; CHU, Y.; TONG, Z.; SUN, M.; MENG, D.; YI, X.; GAO, T.; WANG, M.; DUAN, J. Mecanismos de adsorção e funcionalização de biochar para pesticidas: Uma revisão. **Ecotoxicologia e Segurança Ambiental**, [s. l.], v. 272, 2024.

GIACOMNI, F.; MENEGAZZO, M. A. B.; SILVA, M. G.; SILVA, A. B.; BARROS, M. A. D. Point of zero charge of protein fibers, an important characteristic for dyeing. **Matéria**, Rio de Janeiro, v. 22, n. 2, p. e11827, 2017.

HAAS, P.; HOEHNE, L.; KUHN, D. Revisão: Avaliação dos efeitos do Glifosato no ecossistema agrícola e sua toxicidade para a saúde humana. **Revista Destaques Acadêmicos**, [s. l.], v. 10, n. 4, 2018.

HO, D. C. **Principais agrotóxicos em uso no Brasil: toxicidade, risco e comparação com a União Europeia**. 2020. Universidade de São Paulo, São Paulo, 2020.

HOLLER, F. J.; SKOOG, D. A.; CROUCH, S. R. **Princípios de análise instrumental**. 6. ed. Porto Alegre: Bookman, 2009.

JAMES, A.; YADAV, D. Valorization of coconut waste for facile treatment of contaminated water: a comprehensive review. **Environmental Technology & Innovation**, [s. l.], 2021.

LANGMUIR, I. The adsorption of gases on plane surfaces of glass, mica and platinum. **Journal of American Chemical Society**, [s. l.], v. 40, n. 9, p. 1361-1403, 1918.

LOPES, C. V. A.; ALBUQUERQUE, G. S. C. Agrotóxicos e seus impactos na saúde humana e ambiental: uma revisão sistemática. **Saúde em Debate**, Rio de Janeiro, v. 42, n. 117, p. 518-534, 2018.

MANZATTO, C. V.; FREITAS JUNIOR, E.; PERES, J. R. R. **Uso agrícola dos solos brasileiros**. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2002.

MARLENA, G.; MALGORZATA, W.; PIOTR, N. Biochars and activated carbons as adsorbents of inorganic and organic compounds from multicomponent systems – A review. **Advances in Colloid and Interface Science**, [s. l.], v. 305, 2022.

MARQUES, J. G. C.; VERÍSSIMO, K. J. S.; FERNANDES, B. S. Glifosato: Uma revisão sobre os impactos ambientais atuais sob uma perspectiva brasileira. **Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology**, [s. l.], v. 107, p. 385-397, 2021.

MAYAKADUWA, S. S.; KUMARATHILAKA, P.; HERATH, I.; AHMAD, M.; AL-WABEL, M.; OK, Y. S.; USMAN, A.; ABDULJABBAR, A.; VITHANAGE, M.

Equilibrium and kinetic mechanisms of woody biochar on aqueous glyphosate removal. **Chemosphere**, [s. l.], v. 144, p. 2516-2521, 2016.

MIOLA, B.; FROTA, M. M. M.; OLIVEIRA, A. G.; UCHÔA, K. M.; LEANDRO FILHO, F. A. Aproveitamento energético dos resíduos de cascas de coco verde para produção de briquetes. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, [s. l.], v. 25, n. 4, p. 627-634, 2020.

NASCIMENTO, R. F.; LIMA, A. C. A.; VIDAL, C. B.; MELO, D. Q.; RAULINO, G. S. C. **Adsorção: aspectos teóricos e aplicações ambientais**. [Fortaleza]: Editorial UFC, 2014. Disponível em: <https://repositorio.ufc.br/handle/riufc/10267>. Acesso em: 14 fev. 2024.

NAGIREDDI, J.; BARANIDHARAN, S. Adsorption of Pollutants from Wastewater by Biochar: A Review. **Journal of Hazardous Materials Advances**, [s. l.], v. 9, 2023.

PETRICIC, F. S. C.; VAITSMAN, D. S. **Análise instrumental**. Rio de Janeiro: Interciência, 2000.

RALLET, D.; TSAMO, C.; LOURA, B. Synthesis of clay-biochar composite for glyphosate removal from aqueous solution. **Heliyon**, [s. l.], v. 8, 2022.

RATHI, B. S.; KUMAR, P. S. Application of adsorption process for effective removal of emerging contaminants from water and wastewater. **Environmental Pollution**, [s. l.], 2021.

SOUSA, F. W.; MOREIRA, S. A.; OLIVEIRA, A. G.; CAVALCANTE, R. M.; NASCIMENTO, R. F.; ROSA, M. F. Uso da casca de coco verde como adsorvente na remoção de metais tóxicos. **Química Nova**, [s. l.], 2007.

SULTANA, S.; ISLAM, K.; HASAN, A.; KHAN, J.; AZIZUR, M.; DEB, K.; RAIHAN, A.; RAHMAN, W. Adsorption of crystal violet dye by coconut husk powder: Isotherm, kinetics and thermodynamics perspectives. **Environmental Nanotechnology, Monitoring & Management**, [s. l.], v. 17, 2022.

VALADÃO, G. E. S.; ARAÚJO, A. C. **Introdução ao Tratamento de Minérios**. Belo Horizonte: UFMG, 2007.

YAAH, V. B.; AHMADI, S.; QUIMBAYO, J.; TORRES, S. M.; OJALA, S. Recent technologies for glyphosate removal from aqueous environment: A critical review. **Environmental Research**, [s. l.], 2023.

ZAPAROLI, M.; IGANSI, A. V.; SILVEIRA, J. T.; MORAIS, M. G.; COSTA, J. A. V. Biochar como alternativa sustentável para aproveitamento de resíduos do processamento do açaí e remoção do glifosato. **Revista de Engenharia Química Ambiental**, [s. l.], v. 11, n. 6, 2023.

APÊNDICE A – Produto tecnológico

O documento, intitulado "Manual de Elaboração do Biocarvão de Coco", é uma publicação técnica-científica elaborada por Thiphanie Karolinne Medeiros Albuquerque Silva e Roberto Rodrigue Cunha Lima, parte de um Mestrado Profissional no Instituto Federal de Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte (IFRN), com data de 2025. Este manual foca na metodologia de produção de biocarvão de coco como um produto tecnológico, detalhando os processos para sua criação e avaliação.

A metodologia, que descreve a elaboração deste produto tecnológico, foi desenvolvida nos laboratórios do IFRN em Natal, RN. O processo de obtenção do biocarvão iniciou-se com a pirólise de cascas de coco previamente tratadas e secas, as quais foram reaproveitadas da produção de coco verde e água de coco. Para otimizar a confecção dos biocarvões, um delineamento experimental foi realizado utilizando o software Protimiza Experimental Design, que empregou a metodologia de delineamento de composto central para definir as variáveis de tempo e temperatura de pirólise. As temperaturas exploradas variaram entre 400°C e 600°C, e os tempos entre 120 e 180 minutos, resultando em sete amostras de biocarvão. A pirólise lenta das amostras de cascas de coco foi conduzida em um forno tubular horizontal Jung.

Posteriormente, para a determinação das curvas de Potenciais de Carga Zero (PCZ) das amostras de biocarvão, mensurou-se o potencial hidrogeniônico (pH) após a agitação magnética das amostras (0,2g) em soluções de NaCl 0,1 mol/L por 24 horas, com pH ajustado de 1 a 13. As curvas de PCZ das sete amostras foram obtidas, com o ponto de carga zero variando de 7,5 a 9,5. Observou-se maior equilíbrio nas amostras confeccionadas a 150° por 150 minutos (possivelmente um erro de digitação no texto, a Tabela 1 indica 550°C).

Para a elaboração da curva de calibração de Glifosato, uma varredura espectrofotométrica foi realizada em uma solução-mãe de Glifosato (9,6g/L ajustada a pH 11) para determinar o comprimento de onda de máxima absorção, que foi ajustado em 225nm. Quatro misturas diluídas (R1, R2, R3 e R4) foram preparadas a partir da solução-mãe e suas absorbâncias foram determinadas (0,477nm, 0,663nm, 0,849nm e 1,080nm, respectivamente), permitindo o cálculo de diluição e a confecção da curva de calibração por regressão linear.

A determinação do tempo de equilíbrio de adsorção foi realizada com biocarvão (preparado a 150° por 150 minutos), que foi lavado, agitado em água destilada, filtrado e

seco, e então 0,25g foi agitado em 25mL da solução R4 por diferentes tempos (de 0,3 a 45 minutos). O tempo de equilíbrio para a adsorção do Glifosato pelo biocarvão de casca de coco foi determinado em 40 minutos. Com o tempo de equilíbrio estabelecido, ensaios de adsorção em triplicata foram conduzidos utilizando 0,2g da amostra de biocarvão (150° por 150 minutos), agitada em 20mL da solução-mãe e das alíquotas R1 a R4, para a obtenção das absorbâncias. Os dados gerados por esses ensaios foram plotados e ajustados para a determinação das isotermas de adsorção, fornecendo indicações sobre o mecanismo de adsorção e os parâmetros termodinâmicos.

Essas análises detalhadas visam aprofundar o entendimento das propriedades e da estrutura do biocarvão, consolidando-o como um produto tecnológico eficaz na remediação ambiental.

APÊNDICE B – Artigo submetido

Foi submetido no dia 08 de agosto de 2025, o artigo com título “Utilização de biocarvão para adsorção de Glifosato em meio aquoso” na revista Observatório de La Economía Latinoamericana e aceite no dia 12 de agosto de 2025, com o objetivo de cumprir a pontuação requerida pelo programa de mestrado.

NATAL, RN
2025