

# CONVERSÃO DE ÁCIDO GRAXO DESTILADO DE PALMA EM BIODIESEL UTILIZANDO CATALISADOR SULFONADO SINTETIZADO A PARTIR DE REJEITO AGROINDUSTRIAL AMAZÔNICO

Thaissa S. Ribeiro<sup>1</sup>; Klemerson L. da Silva<sup>2</sup>; Beatriz S. Silva<sup>3</sup>; Deborah C. da Fonseca<sup>4</sup>; Vicente S. Lima<sup>4</sup>; Izadora A. Sobrinho<sup>2</sup>; Erica K. L. Mares<sup>5</sup>; Leyvison R. V. da Conceição<sup>2,4</sup>

<sup>1</sup> Laboratório de Catálise e Oleoquímica, Instituto de Ciências Exatas e Naturais, Universidade Federal do Pará – saraivathaissa@gmail.com.

<sup>2</sup> Laboratório de Catálise e Oleoquímica, Instituto de Ciências Exatas e Naturais, Universidade Federal do Pará.

<sup>3</sup> Laboratório de Catálise e Oleoquímica, Instituto de Tecnologia e Ciências, Universidade Federal do Pará.

Laboratório de Catálise e Oleoquímica, Instituto de Tecnologia e Ciências, Universidade Federal do Pará.

<sup>4</sup> Laboratório de Catálise e Oleoquímica, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Pará, Campus Belém.

<sup>5</sup> Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Pará, Campus Rural de Marabá.

**Palavras-Chave:** Biomassa residual, biocarvão, planejamento experimental.

## Introdução

A crescente emissão de gases agravadores do efeito e de poluentes prejudiciais à saúde humana, além disso, os eventuais riscos de esgotamento das reservas de petróleo têm estimulado a procura de uma alternativa ecologicamente amigável e renovável para os combustíveis (Saye et al., 2023). Nesse cenário o biodiesel se destaca como uma alternativa promissora ao uso de combustíveis de origem fóssil, dado que durante seu processo combustão há uma menor geração de fumaça e subprodutos (Ribeiro et al., 2023). Além disso, esse biocombustível apresenta características semelhantes ao diesel fóssil e pode ser misturado diretamente ou em proporções diferentes com o diesel derivado do petróleo, em motores de ignição a compressão diesel, sem necessidade de alterações mecânicas (Mares et al., 2021).

O biodiesel é uma mistura de alquil ésteres ácido graxos derivado de fontes renováveis como óleos vegetais ou gorduras animais. Pode ser obtido via reação de esterificação de ácidos graxos ou transesterificação de triglicerídeos com um álcool de cadeia curta e um catalisador adequado (Saey et al., 2023). Em escala industrial, a produção de biodiesel normalmente emprega catalisadores homogêneos básicos, contudo, esses apresentam grandes desvantagens como elevada geração de efluentes durante a purificação do biocombustível, impossibilidade de reutilização e formação de sabão quando em contato com matrizes oleaginosas com elevados teores de ácidos graxos livres (Rahmayanti et al., 2024). Por outro lado, a utilização de catalisadores heterogêneos ácidos pode ser uma alternativa viável e econômica, dado que são recuperáveis, reutilizáveis, não favorecem reações secundárias indesejáveis e são de fácil separação do meio reacional (Corrêa et al., 2023).

Nesse contexto, o aproveitamento de resíduos de biomassa na síntese de catalisadores baseados em biocarvão tem surgido como uma estratégia para reduzir os custos de produção do biodiesel. O biocarvão é um material carbonáceo que pode ser obtido a partir da degradação termoquímica de biomassas residuais, obtido mais comumente por meio da carbonização de biomassas residuais e detém características oriundas da biomassa utilizada, dos processos de obtenção e funcionalização (Ning e Niu, 2017). Além disso, a utilização de ácidos graxos destilados de óleos (DDOs), oriundos do processo de refino de óleos na indústria oleoquímica, contribui para essa redução de custos. Os DDOs são matérias-primas não comestíveis, de baixo custo e com elevado índice de acidez, em virtude de sua composição físico-química ser constituída de uma mistura de ácidos graxos livres e triglicerídeos, sendo assim ideais para a aplicação na produção de biodiesel via reação de esterificação (Yaakoubi et al., 2023).

Dado o exposto, o caroço de muruci se mostra uma potencial biomassa para a síntese de catalisadores. O muruci (*Byrsonima crassifolia*) é uma árvore de pequeno porte nativa da América do Sul e amplamente difundida em toda a região amazônica. O fruto é arredondado, com cerca de 2,0 cm de diâmetro e é constituído por 70,9% de polpa, a qual apresenta coloração amarelada com aroma e sabor característicos. Enquanto, que o caroço possui forma arredondada com elevada rigidez. A frutificação ocorre geralmente entre os meses de novembro a maio, com produtividade de 12 kg por árvore (Pires et al., 2019). O processamento dos frutos, para a obtenção da polpa por parte das indústrias alimentícias, proporciona a geração de grandes quantidades de resíduos constituídos principalmente por caroços, os quais são frequentemente descartados de forma inadequada e resultam em problemas ambientais. Assim, o presente trabalho tem por objetivo sintetizar e avaliar a aplicação de um catalisador à base de carbono sulfonado na esterificação metílica do destilado da desodorização do óleo de palma, visando a produção de biodiesel.

## Material e Métodos

### *Caracterização físico-química do destilado da desodorização do óleo de palma (DDOP)*

As características físico-químicas do destilado da desodorização do óleo de palma (DDOP), fornecido pela Companhia Refinadora da Amazônia (Agropalma S/A, Brasil), foram analisadas conforme normas da American Oil Chemists' Society (AOCS). A composição de ácidos graxos e o índice de acidez foram determinados por meio dos métodos AOCS Ce 1-62 (cromatografia gasosa) e AOCS Cd 3d-63 (titulométrico), respectivamente.

### *Preparação dos catalisadores BC<sub>Sx-y</sub>*

Os frutos de muruci (*Byrsonima crassifolia*) foram despulpados para a obtenção dos caroços, os quais foram lavados, secos em estufa, triturados e carbonizados em forno tubular (taxa de aquecimento de 10 °C/min em atmosfera de N<sub>2</sub>). A fim de otimizar o processo de carbonização da biomassa para a obtenção do biocarvão, foram avaliadas três temperaturas (450, 600 e 750 °C) fixando o tempo em 1 h. Após a definição da temperatura ideal, avaliou-se três tempos de carbonização (0,5, 1,0 e 1,5 h). Os materiais obtidos foram denominados BC<sub>x-y</sub>, onde x e y representam a temperatura e o tempo de carbonização, respectivamente. O processo de sulfonação seguiu a metodologia de Corrêa et al. (2023), usando uma razão de 1:10 de sólido para ácido sulfúrico concentrado. Em um processo típico, 1 g de BC<sub>x-y</sub> foi dispersado em 10 mL de ácido sulfúrico em um balão de fundo chato, aquecido a 200 °C/4 h com agitação constante. O material foi então lavado até pH neutro e seco a 60 °C/12 h. Os catalisadores resultantes foram denominados biocarvões sulfonados (BCS<sub>x-y</sub>).

### *Síntese do biodiesel*

Os materiais sintetizados foram testados na esterificação metílica do DDOP em um reator PARR, variando os parâmetros reacionais. Após as reações, os produtos foram centrifugados para recuperar o catalisador, lavado com álcool etílico e hexano. O biodiesel foi separado, purificado com água destilada aquecida e seco a 50 °C/12 h. A conversão foi determinada pela comparação do índice de acidez do DDOP e dos biodieseis produzidos, conforme a norma AOCS Cd 3d-63.

### *Caracterização dos materiais*

Os materiais foram caracterizados por Espectroscopia no Infravermelho com Transformada de Fourier (FT-IR), utilizando um espectrômetro BRUKER modelo VERTEX 70v, utilizando ATR, faixa de 3000–400 cm<sup>-1</sup>, resolução de 4 cm<sup>-1</sup> e 32 acumulações. Microscopia eletrônica de varredura (MEV), empregando um microscópio Tescan, modelo VEJA 3 LMU operando com tensão de aceleração de 20 kV.

### *Análise estatística*

A otimização das variáveis reacionais e a avaliação dos efeitos causados por essas na reação de esterificação foi realizada por meio de um planejamento composto central de Box-Behnken (BBD), constituído por 27 experimentos reacionais. As variáveis independentes, suas codificações e valores foram: temperatura, tempo, concentração de catalisador e razão molar DDOP:MeOH:  $X_1$  (60–120 °C),  $X_2$  (1,0–3,0 h),  $X_3$  (10:1–24:1) e  $X_4$  (2–10%), respectivamente, já a variável dependente (resposta), conversão de ácidos graxos livres (AGL), recebeu a notação  $Y_1$ . Por fim, a análise das variáveis reacionais foi realizada por meio da metodologia de superfície de resposta (MSR), por meio do tratamento estatístico dos valores das conversões AGL (%) no software Statistica® (v.14.0), com 95% de confiança e 5% de significância.

## Resultados e Discussão

### *Composição em ácidos graxos e propriedades físico-química do DDOP*

A qualidade do biodiesel é fortemente influenciada pela matéria-prima lipídica utilizada (Brito et al., 2023). Por isso, as características físico-químicas do DDOP foram analisadas para avaliar sua viabilidade na reação de esterificação para produção de biodiesel.

**Tabela 1** – Propriedades físico-químicas do (DDOP).

Propriedades	Valor
Composição em ácidos graxos livres (%)	
Láurico C12:0	1,0
Mirístico C14:0	1,0
Palmítico C16:0	42,0
Esteárico C18:0	5,0
Oleico C18:1	41,0
Linoleico C18:2	10,0
Mono-, di-, triglicerídeos	12,0
Índice de acidez (mg KOH g <sup>-1</sup> )	176,70

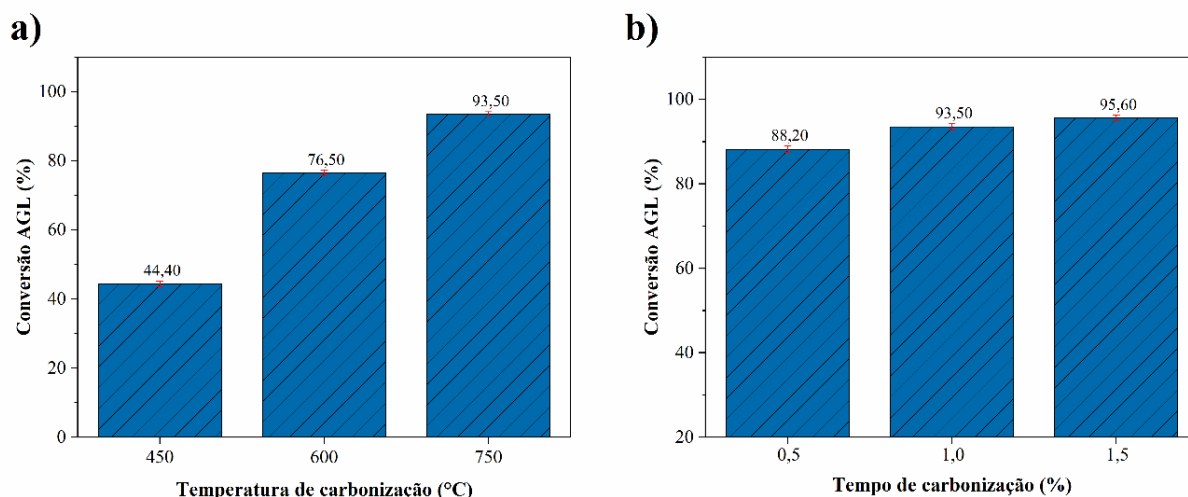
Fonte: Autora.

Os resultados mostraram que o DDOP é composto majoritariamente por ácidos graxos insaturados: palmítico (42,0%), oleico (41,0%) e linoleico (10,0%), valores condizentes com os relatados na literatura para o óleo de palma (Yaakoubyet al., 2023). Ademais, o elevado índice de acidez (176,70 mgKOH/g) confirma sua adequação para a reação de esterificação, que utiliza catalisadores ácidos (Gonçalves et al., 2024), demonstrando a viabilidade do DDOP como matéria-prima para a produção de biodiesel.

### *Influência do processo de carbonização no desempenho do catalisador BCS<sub>x-y</sub>*

A influência das variáveis temperatura e tempo de carbonização no desempenho dos catalisadores foi avaliada em relação a conversão de ácidos graxos livres (AGL) em condições reacionais fixadas (80 °C, 2 h, 18:1 e 6%) e os resultados são ilustrados na Figura 1.

**Figura 1.** Influência da temperatura e tempo de carbonização na atividade catalítica dos materiais.



Fonte: Autora.

Os resultados obtidos durante o estudo mostraram uma relação direta entre a elevação da temperatura de carbonização e a conversão AGL (%), dado que as temperaturas de 450, 600 e 750 °C, proporcionaram amostras com conversões AGL (%) de  $44,40\% \pm 0,80$ ,  $76,50\% \pm 0,75$  e  $93,50\% \pm 0,65$ , respectivamente. Esse fato pode ser relacionado a uma maior formação de estruturas de hidrocarbonetos aromáticos policíclicos, proporcionada por meio da elevação da temperatura de carbonização, a qual favorece a ancoragem dos grupos  $-\text{SO}_3\text{H}$  durante o processo de sulfonação (Yadav et al., 2023). A temperatura de 750 °C foi escolhida para a carbonização por proporcionar o melhor desempenho catalítico dentre todos os biocarvões sulfonados.

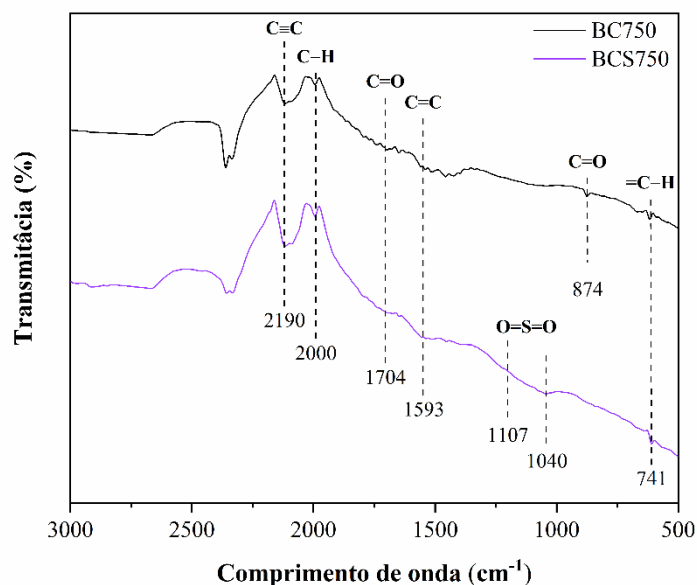
Os resultados obtidos para a influência da variável tempo de carbonização na conversão AGL (%), indicaram que os maiores valores de conversão AGL foram obtidos com catalisadores feitos a partir de biocarvões carbonizados por 1 e 1,5 h a 750 °C, alcançando conversões de  $93,50\% \pm 0,65$  e  $95,60\% \pm 0,75$ , respectivamente. Isso pode ser relacionado ao fato de maiores tempos de carbonização favorecerem a formação das estruturas de carbono aromático policíclico, cruciais para a estabilidade do biocarvão e a incorporação dos grupos  $-\text{SO}_3\text{H}$  (Ning e Niu, 2017). Assim, o catalisador sintetizado a partir do biocarvão de 1 h foi escolhido por ser menos oneroso e não apresentar diferença significativa na conversão AGL em relação aos outros. Por fim, todos os biocarvões sintetizados mostraram baixa atividade catalítica (conversões de  $8,50\% \pm 0,45$ ) devido à baixa densidade de grupos sulfônicos (Corrêa et al., 2023).

## Caracterização dos materiais

### *Espectroscopia no infravermelho com transformada de Fourier (FT-IR)*

A Figura 2 apresenta os espectros FT-IR para o biocarvão BC750-1 e para o catalisador BCS750-1. No espectro referente ao biocarvão BC750-1 (linha preta), observa-se a ocorrência de bandas vibracionais em: 2190, 2000, 1704, 1593, 741  $\text{cm}^{-1}$ , as quais são atribuídas aos modos de vibração normal (MVN) dos estiramentos das ligações  $\text{C}\equiv\text{C}$ ,  $\text{C}-\text{H}$ ,  $\text{C}=\text{O}$ ,  $\text{C}=\text{C}$  e à deformação angular fora do plano da ligação  $=\text{C}-\text{H}$ , respectivamente, características de matrizes lignocelulósicas carbonizadas (Sapkota et al., 2024, Ning e Niu, 2017, Corrêa et al., 2023). Além disso, o espectro do biocarvão BC750-1 mostra a presença de uma banda vibracional em 873  $\text{cm}^{-1}$ , referente ao MVN fora do plano da ligação  $\text{C}=\text{O}$  e é atribuída ao grupo carbonato  $\text{CO}_3^{2-}$  (Ribeiro et al., 2023), reforçando a presença de estruturas de  $\text{CaCO}_3$  no biocarvão BC750-1, conforme indicado pela análise de DRX.

Figura 2. Espectros FT-IR para biocarvão BC750-1 e catalisador BCS750-1.



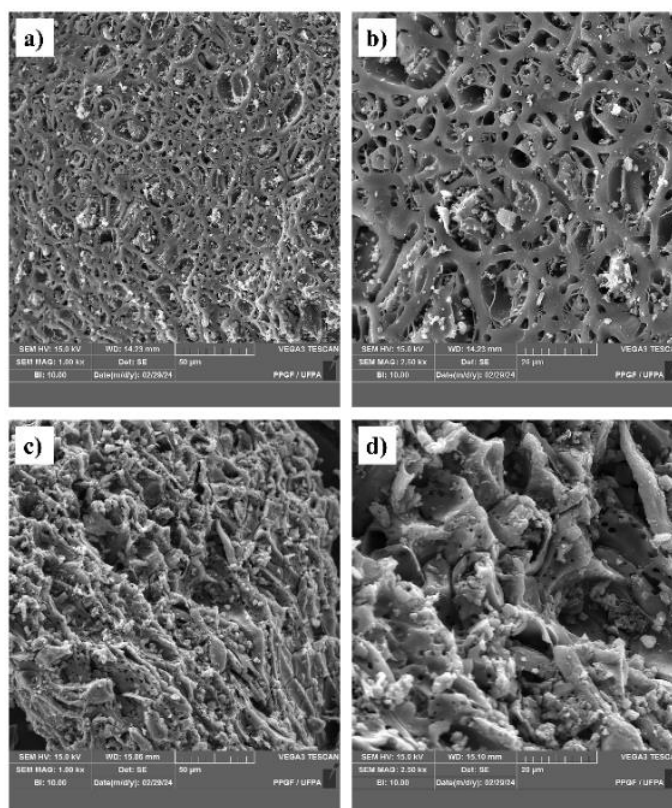
Fonte: Autora.

Por fim, o espectro referente ao catalisador BCS750-1 exibe a presença de bandas vibracionais típicas de material carbonizado, oriundas do biocarvão BC750-1, bem como, o aparecimento de novas bandas vibracionais nas regiões de 1107 e 1040  $\text{cm}^{-1}$ , atribuídas aos MNV dos estiramentos simétrico e assimétrico da ligação O=S=O, característicos de grupos sulfônicos e indicam o êxito do processo de síntese do catalisador (Saey et al., 2023).

#### *Microscopia eletrônica de varredura (MEV)*

A morfologia superficial do biocarvão BC750-1 e ao catalisador BCS750-1 são mostradas na Figuras 3. As micrografias referentes ao biocarvão BC750-1 (Figuras 3a e 3b), evidenciam uma morfologia superficial irregular, com ampla estrutura de poros dispersa homogeneamente em sua superfície, característicos de biomassas carbonizadas (Corrêa et al., 2023). Ao se analisar as micrografias referentes ao catalisador BCS750-1 (Figuras 3c e 3d), nota-se uma alteração na morfologia proporcionada por meio do processo de sulfonação, dado que a porosidade do material diminui acentuadamente quando comparado a observada no biocarvão BC750-1. Isto pode ser atribuído à corrosão e à oxidação proporcionada por meio do processo de funcionalização com ácido sulfúrico concentrado (Yaakoub et al., 2023).

**Figura 3.** Micrografias para biocarvão BC750-1 e catalisador BCS750-1.



Fonte: Autora.

## Otimização das variáveis reacionais utilizando a MSR

### *Análise estatística dos testes catalíticos*

A Tabela 2 apresenta os resultados obtidos experimentalmente para o delineamento BBD, constituído de 27 experimentos executados de forma aleatória para minimizar os erros sistemáticos.

**Tabela 2** – Matriz experimental e conversões AGL para o planejamento BBD.

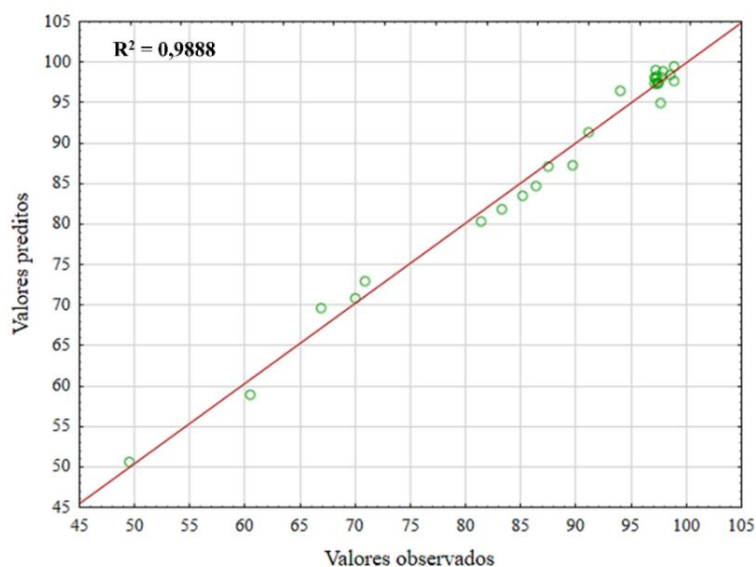
Experimento	Ordem de execução	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	X <sub>4</sub>	Conversão AGL (%)	
						Observada	Predita
1	16	60	1	6	18	60,55	58,89
2	17	120	1	6	18	97,89	98,89
3	20	60	3	6	18	85,14	83,42
4	25	120	3	6	18	97,19	98,13
5	2	90	2	2	12	81,43	80,35
6	5	90	2	10	12	97,20	97,93
7	8	90	2	2	24	83,31	81,86
8	12	90	2	10	24	97,77	98,13
9	22	60	2	6	12	69,97	70,74
10	24	120	2	6	12	98,89	99,37
11	21	60	2	6	24	70,86	72,86
12	26	120	2	6	24	97,24	98,95
13	3	90	1	2	18	66,91	69,57
14	11	90	3	2	18	91,18	91,35
15	1	90	1	10	18	94,09	96,39
16	14	90	3	10	18	98,57	98,38
17	4	90	1	6	12	86,42	84,68
18	18	90	3	6	12	97,40	98,21
19	6	90	1	6	24	89,77	87,18
20	10	90	3	6	24	97,47	97,42
21	15	60	2	2	18	49,54	50,56
22	27	120	2	2	18	98,92	97,57
23	23	60	2	10	18	87,56	87,13
24	19	120	2	10	18	97,65	94,85
25	7	90	2	6	18	97,18	97,35
26	13	90	2	6	18	97,46	97,35
27	9	90	2	6	18	97,42	97,35

**Legenda:** X<sub>1</sub> – temperatura (°C), X<sub>2</sub> – tempo (h), X<sub>3</sub> – concentração de catalisador (%) e X<sub>4</sub> – razão molar DDOP:MeOH.

#### *Correlação entre valores previstos x observados*

Os resultados obtidos para a correlação dos valores previstos vs. valores observados para a variável resposta conversão em AGL (Figura 4), indicam elevada correlação entre os valores preditos e observados, dado que o valor do coeficiente de determinação  $R^2$  é de 0,9888, demonstrando boa precisão na predição da conversão em AGL dentro dos níveis estudados. Ademais, o valor indica que o modelo criado neste estudo explica 98,88% dos valores obtidos.

**Figura 4.** Valores preditos vs. observados para a conversão AGL.

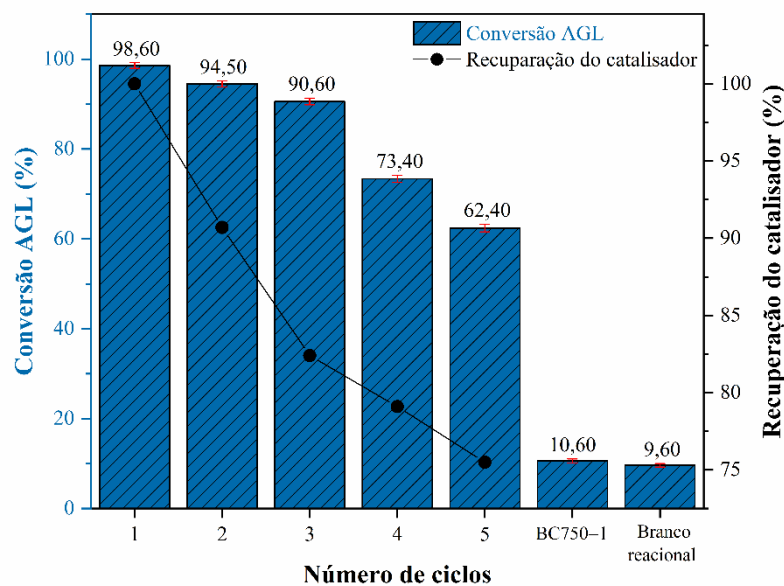


Fonte: Autora.

### Estudo de reutilização

Após o processo de otimização dos parâmetros reacionais da reação de esterificação, o catalisador BCS750-1 foi submetido a testes catalíticos a fim de avaliar sua estabilidade catalítica quando empregado em sucessivos ciclos reacionais em condições reacionais otimizadas (120 °C, 1,7 h, 6% e 15:1). A Figura 5 mostra o estudo de reutilização do catalisador.

Figura 5. Estudo de reutilização do catalisador BCS750-1.



Fonte: Autora.

Durante o estudo, foi observado que o catalisador BCS750-1, nas condições otimizadas de reação, alcançou uma conversão máxima de AGL de 98,6% ± 0,63 no 1º ciclo reacional. Ademais, o catalisador manteve conversões acima de 90% até o 3º ciclo, demonstrando sua eficiência na esterificação. No entanto, após o 3º ciclo, houve uma queda no desempenho catalítico, com as conversões de AGL caindo para 73,4% ± 0,75 no 4º ciclo e 62,3% ± 0,83 no 5º ciclo. Essa redução pode estar relacionada ao bloqueio dos sítios ativos por matéria orgânica, devido à ineficácia na lavagem ou à lixiviação dos grupos sulfônicos durante a reutilização do catalisador (Corrêa et al., 2023). Apesar disso, o catalisador apresentou alta taxa de recuperação (>75,0%) e desempenho superior na esterificação, em comparação ao



biocarvão BC750-1 e a reação em branco, que mostraram conversões de  $10,6\% \pm 0,45$  e  $9,6\% \pm 0,40$ , respectivamente, representando um aumento de mais de 88% com o uso do catalisador BCS750-1.

### Conclusões

O presente trabalho propôs estudar a síntese de um catalisador heterogêneo ácido baseado em biocarvão, oriundo da biomassa residual de muruci, para aplicação na síntese de biodiesel via esterificação metálica do destilado da desodorização do óleo de palma. Os resultados mostram que o biocarvão BC750-1, obtido por meio da carbonização da biomassa residual de muruci a  $750\text{ }^\circ\text{C}$  por 1 h, apresenta melhor custo operacional e maior adequação ao processo de sulfonação. O catalisador BCS750-1, obtido por meio do processo de sulfonação do biocarvão BC750-1, exibiu desempenho catalítico superior, com conversão de ácidos graxos livres de  $93,5\% \pm 0,65$ . As caracterizações realizadas FT-IR e MEV confirmam a adequação dos processos de síntese. Os valores de otimização obtidos durante o estudo foram temperatura de  $120\text{ }^\circ\text{C}$ , tempo reacional 1,7 h, concentração de catalisador de 6% m/m e razão molar DDOP:MeOH de 15:1. O catalisador BCS750-1 quando empregado em condições reacionais otimizadas, proporcionou um biodiesel com conversão em ácidos graxos livres de 98,6% e manteve sua atividade catalítica acima de 60,0% por 5 ciclos. Além disso, o modelo matemático apresentou uma elevada qualidade de ajuste ( $R^2 = 0,9888$ ) e um erro relativo inferior a 5% durante a validação. As reações sem catalisador e com o biocarvão BC750-1 resultaram em conversões de  $9,6\% \pm 0,40$  e  $10,6\% \pm 0,45$ , respectivamente, destacando a eficiência do catalisador sulfonado. Os resultados sugerem uma promissora aplicação do DDOP na produção de biodiesel e do biocarvão de muruci na síntese de catalisadores heterogêneos ácidos de baixo custo.

### Agradecimentos

À Universidade Federal do Pará (UFPA), à Pró-Reitoria de Pesquisa e Pós-Graduação (PROPEP/UFPA), ao Laboratório de Catálise e Oleoquímica (LCO), Laboratório de Pesquisa e Análise de Combustíveis (LAPAC) e ao Laboratório de Espectroscopia Vibracional e Altas Pressões da UFPA (LEVAP/UFPA).

### Referências

- ADHIKARI, S.; MOON, E.; PAZ-FERREIRO, J.; TIMMS, W. Comparative analysis of biochar carbon stability methods and implications for carbon credits. *Science of the Total Environment*, 914, 2024.
- American oil chemists' society - AOCS. *Official Methods and Recommended Practices of the AOCS*, 5th ed., Champaign: AOCS, 1999.
- BRITO, V. L.; GONÇALVES, M. A.; SANTOS, H. C. L.; ROCHA FILHO, G. N.; CONCEIÇÃO, L. R. V. Biodiesel production from waste frying oil using molybdenum over niobia as heterogeneous acid catalyst: Process optimization and kinetics study. *Renewable Energy*, 215, 2023.
- CORRÊA, A. P. L.; SILVA, P. M. M.; GONÇALVES, M. A.; BASTOS, R. R. C.; ROCHA FILHO, G. N.; CONCEIÇÃO, L. R. V. Study of the activity and stability of sulfonated carbon catalyst from agroindustrial waste in biodiesel production: Influence of pyrolysis temperature on functionalization. *Arabian Journal of Chemistry* 16, 2023.
- GONÇALVES, M. A.; SANTOS, H. C. L.; SILVA, P. M. M.; CORRÊA, A. P. L.; RIBEIRO, T. S.; SOBRINHO, I. A.; ROCHA FILHO G. N.; CONCEIÇÃO L. R.V. Catalytic conversion of residual raw material into biodiesel using a superior magnetic solid acid catalyst based on Zn-Fe ferrite: thermodynamic and kinetic studies. *RSC Advances*, 14, 20743, 2024.
- MAKOWSKA, M.; DZIOSA, K. Influence of different pyrolysis temperatures on chemical composition and graphite-like structure of biochar produced from biomass of green microalgae *Chlorella sp.* *Environmental Technology & Innovation*, 35, 2024.
- MARES, E. K. L.; GONÇALVES, M. A.; LUZ, P. T. S.; ROCHA FILHO, G. N.; ZAMIAN, J. R.; CONCEIÇÃO, L. R. V. Acai seed ash as a novel basic heterogeneous catalyst for biodiesel synthesis: Optimization of the biodiesel production process. *Fuel*, 299, 2021.
- NING, Y.; NIU S. Preparation and catalytic performance in esterification of a bamboo-based heterogeneous acid catalyst with microwave assistance. *Energy Conversion Management* 153, 446-454, 2017.



PIRES, F. C. S.; SILVA A. P. S.; SALAZAR, M. A. R.; COSTA, W. A.; COSTA, H. S. C.; LOPES, A. S.; ROGEZ, H.; JUNIOR, R. N. C. Determination of process parameters and bioactive properties of the murici pulp (*Byrsonima crassifolia*) extracts obtained by supercritical extraction. *The Journal of Supercritical Fluids*, 146, 128–135, 2019.

RAHMAYANTI, M.; FATIMAH, I.; IKHSANI, A.Y.; AZIZAH, D. N. The potential of calcium oxide nanocatalyst from chicken eggshells for biodiesel production using chicken fat waste. *Inorganic Chemistry Communications* 165, 2024.

RIBEIRO, T. S.; GONÇALVES, M. A.; ROCHA FILHO, G. N.; CONCEIÇÃO, L.R.V. Functionalized Biochar from the Amazonian Residual Biomass Murici Seed: An Effective and Low-Cost Basic Heterogeneous Catalyst for Biodiesel Synthesis. *Molecules*, 28, 7980, 2023.

SAEY, H. S. E.; NAGA, A. O. A.; SAIED, M. E.; SHABAN, S. A.; ABDEL-GAWAD, S. A.; SALIH, S.A.; Kinetic and thermodynamic studies on the esterification of oleic acid with methanol over sulfonated biochar catalyst derived from waste tea dregs. *Biomass and Bioenergy*, 176, 2023.

SAPKOTA, S.; GHIMIRE, R.; BISTA, P.; HARTMANN, D.; RAHMAN, T.; ADHIKARI, S. Greenhouse gas mitigation and soil carbon stabilization potential of forest biochar varied with biochar type and characteristics. *Science of the Total Environment*, 931, 2024.

YAAKOUBY, I. E.; RHRISSI, I.; ABOULIATIM, Y.; HLAIBI, M.; KAMIL, N. Moroccan sardine scales as a novel and renewable source of heterogeneous catalyst for biodiesel production using palm fatty acid distillate. *Renewable Energy*, 217, 2023.

YADAV, N.; YADAV, G.; AHMARUZZAMAN; M. Fabrication of surface-modified dual waste-derived biochar for biodiesel production by microwave-assisted esterification of oleic acid: Optimization, kinetics, and mechanistic studies. *Renewable Energy*, 218, 2023.