



ACAÍ MAGNÉTICO: COMO O RESÍDUO DA AMAZÔNIA PODE SALVAR AS ÁGUAS DA POLUIÇÃO POR OLÉO

Fryda M. Silva¹; Victor V. Pinheiro²; Lívia M. Oliveira³; Pablo M. Frazão⁴; Kamilla C. dos Santos⁵.

¹ Escola Estadual Elia Trajano de Freitas de Souza.

² Escola Estadual Elia Trajano de Freitas de Souza.

³ Escola Estadual Elia Trajano de Freitas de Souza.

⁴ Escola Estadual Elia Trajano de Freitas de Souza.

⁵ Escola Estadual Elia Trajano de Freitas de Souza.

Moraesliv30@gmail.com

Palavras-Chave: Adsorção, caroço de Açaí, Sustentabilidade.

Introdução

A preservação dos recursos hídricos consolidou-se como um dos maiores desafios ecológicos e tecnológicos da atualidade. O crescimento industrial e a urbanização acelerada têm intensificado o descarte de efluentes contaminados por compostos hidrofóbicos, especialmente óleos e hidrocarbonetos. Quando lançados em corpos d'água de forma inadequada, esses poluentes formam uma película superficial densa que impede a difusão de oxigênio e a penetração da luz solar, desencadeando graves desequilíbrios nos ecossistemas aquáticos e ameaçando a biodiversidade por meio da bioacumulação de compostos tóxicos.

Para mitigar esses impactos, diversos métodos tradicionais de tratamento de água são empregados, tais como a flotação, a coagulação e a separação por membranas. Contudo, a maioria dessas técnicas apresenta limitações operacionais severas, que incluem o alto custo financeiro, a propensão ao entupimento de poros (*fouling*) e a indesejada geração de lodos químicos secundários. Diante desse cenário, o processo de adsorção surge como uma alternativa promissora devido à sua simplicidade de operação, alta taxa de remoção e flexibilidade no uso de materiais sólidos de origem residual.

Paralelamente à busca por tecnologias ambientais limpas, a gestão de resíduos agroindustriais demanda soluções inovadoras guiadas pelos preceitos da Economia Circular e da Química Verde. Na região amazônica, o processamento do açaí (*Euterpe oleracea*) gera uma massa crítica de resíduos sólidos, onde o caroço representa cerca de 80% a 90% do volume total do fruto. O descarte massivo desse material sobrecarrega os sistemas de saneamento urbano locais. A transformação desse passivo ambiental em carvão vegetal atua, portanto, como uma rota sustentável de alto valor agregado, convertendo um resíduo abundante em uma matriz porosa com excelente potencial de retenção de óleos.

Apesar da alta capacidade adsorptiva dos carvões pulverizados, a sua separação e recolhimento do meio aquoso após o tratamento é historicamente complexa e dispendiosa. Uma estratégia eficaz para contornar esse gargalo consiste na magnetização da matriz carbonosa através da incorporação de nanopartículas de magnetita (Fe_3O_4) obtidas pelo método de coprecipitação química. O composto resultante une a capacidade de retenção



de óleo do carvão à propriedade superparamagnética da magnetita, permitindo que todo o sistema seja removido da água de forma rápida e precisa por meio da aplicação de um campo magnético externo com um ímã de neodímio, eliminando processos laboriosos de filtração.

A contaminação de corpos hídricos por petróleo e seus derivados representa um dos maiores desafios ambientais da atualidade. O descarte inadequado de efluentes industriais, acidentes em plataformas de extração e o transporte marítimo despejam anualmente toneladas de compostos hidrofóbicos nos ecossistemas aquáticos (SILVA et al., 2024).

O óleo forma uma película superficial densa que bloqueia a passagem de luz solar e reduz drasticamente a difusão de oxigênio atmosférico para a água. De acordo com Santos, Oliveira e Souza (2025), esse fenômeno compromete a fotossíntese do fitoplâncton, base da cadeia alimentar aquática, além de provocar a bioacumulação de hidrocarbonetos policíclicos aromáticos (HPAs) na fauna local, substâncias conhecidas por seu potencial carcinogênico e mutagênico.

A remoção de óleo da água é uma tarefa complexa, dada a variedade de estados em que a mistura pode se apresentar (óleo livre, disperso ou emulsionado). Tradicionalmente, utilizam-se métodos físicos e químicos, tais como:

- Flotação e Skimming: Eficientes para óleo livre superficial, mas ineficazes para emulsões estáveis.
- Separação por Membranas: Apresenta alta eficiência, porém sofre com o *fouling* (entupimento dos poros), o que eleva o custo operacional (MELLO; COSTA, 2023).
- Coagulação/Floculação: Requer a adição de agentes químicos que, frequentemente, geram lodo secundário tóxico.

Diante dessas limitações, a busca por tecnologias de alta eficiência, baixo custo e que não gerem resíduos secundários tem direcionado as pesquisas para processos baseados em materiais avançados e sustentáveis (ALMEIDA, 2024).

Dentre as tecnologias emergentes, a adsorção destaca-se como um dos métodos mais promissores para o tratamento de efluentes contaminados por óleo. Trata-se de um fenômeno de transferência de massa onde uma substância fluida (adsorbato) se fixa à superfície de um sólido (adsorvente) devido a interações físicas (Van der Waals) ou químicas (ligações covalentes) (NASCIMENTO et al., 2023).

A equação fundamental que rege o equilíbrio de adsorção pode ser expressa pela quantidade de adsorbato retida por unidade de massa do adsorvente (q_e), calculada por:

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

Onde:

- C_0 é a concentração inicial do contaminante (mg/L);
- C_e é a concentração no equilíbrio (mg/L);
- V é o volume da solução (L);
- m é a massa do adsorvente utilizada (g).

As principais vantagens da adsorção incluem a simplicidade operacional, a possibilidade de regeneração do adsorvente e a flexibilidade no design do processo, permitindo a utilização de matrizes sólidas de origem residual (SOUZA; LIMA, 2025).

O açaí (*Euterpe oleracea*) é um fruto pilar da economia e cultura da região amazônica. Contudo, o processamento da polpa gera uma quantidade massiva de resíduos sólidos: o



caroço corresponde a cerca de 80% a 90% da massa total do fruto (RODRIGUES et al., 2024).

A transformação desse passivo ambiental em carvão ativado ou carvão pirolisado (biochar) surge como uma alternativa tecnológica de alto valor agregado. O carvão do caroço de açaí possui uma rede porosa desenvolvida e riqueza em grupos funcionais oxigenados em sua superfície, o que lhe confere uma excelente capacidade de retenção de compostos hidrofóbicos e óleos (FERREIRA; GOMES, 2025). Além disso, sua abundância regional reduz drasticamente os custos de aquisição de matéria-prima.

Embora os adsorventes em pó sejam altamente eficientes, a sua separação do meio aquoso após o tratamento é uma etapa complexa e dispendiosa. Para superar esse gargalo, a incorporação de propriedades magnéticas através de nanopartículas de magnetita Fe_3O_4 tem sido amplamente investigada (PEREIRA, 2024).

As nanopartículas de Fe_3O_4 apresentam superparamagnetismo, alta área superficial e biocompatibilidade. Quando o carvão do caroço de açaí é magnetizado com estas partículas, cria-se um compósito magnético. Após o processo de adsorção do óleo, o material saturado pode ser removido da água de forma rápida e eficiente utilizando simplesmente um campo magnético externo (ímã), eliminando a necessidade de centrifugação ou filtração laboriosa (BARROS et al., 2025).

A convergência entre o tratamento de águas contaminadas e a valorização de resíduos agroindustriais alinha-se perfeitamente com os princípios da Economia Circular e da Química Verde. Em vez do modelo linear tradicional de produção ("extrair, produzir, descartar"), o reaproveitamento do caroço de açaí mitiga os problemas de saneamento urbano nas cidades nortistas e oferece uma solução ecológica para desastres industriais (MARTINS; LOPES, 2026).

Sob a perspectiva do desenvolvimento global, esta pesquisa alinha-se diretamente a múltiplos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) estabelecidos na Agenda 2030 (ONU, 2015). O desenvolvimento do compósito magnético atende simultaneamente ao ODS 6 (Água Potável e Saneamento) e ao ODS 14 (Vida na Água), ao propor uma tecnologia eficiente para despoluição hídrica e mitigação dos impactos severos do óleo nos ecossistemas aquáticos. A transformação de um passivo regional em um insumo tecnológico de alto valor agregado fomenta o ODS 9 (Indústria, Inovação e Infraestrutura) e o ODS 12 (Consumo e Produção Responsáveis), promovendo a infraestrutura sustentável e a redução drástica do desperdício de biomassa. Por fim, ao evitar a degradação e a contaminação do solo pelo descarte inadequado dos caroços e ao oferecer uma alternativa de remediação ambiental ecológica que reduz a pegada de carbono associada aos tratamentos químicos tradicionais, o projeto cumpre com as diretrizes do ODS 13 (Ação Contra a Mudança Global do Clima) e do ODS 15 (Vida Terrestre).

A utilização de um resíduo abundante para limpar a poluição hídrica fecha um ciclo sustentável, demonstrando que a inovação tecnológica pode andar de mãos dadas com o desenvolvimento socioeconômico regional e a preservação ambiental (SILVA et al., 2024).

Material e Métodos

A presente pesquisa caracterizou-se como experimental, com abordagem qualitativa e quantitativa, voltada ao desenvolvimento e avaliação de um adsorvente magnético sustentável à base de carvão de caroço de açaí (*Euterpe oleracea*) para aplicação no processo de separação óleo-água.

Materiais utilizados

Para a realização do experimento foram utilizados os seguintes materiais:

- Agitador magnético;
- Água destilada;
- Balança analítica;
- Bastão de vidro;
- Béqueres;
- Caroços de açaí;
- Cloreto férrico (FeCl_3);
- Cloreto ferroso (FeCl_2);
- Estufa de secagem.
- Forno mufla;
- Hidróxido de amônio (NH_4OH) ou hidróxido de sódio (NaOH);
- Ímã de neodímio;
- Óleo de cozinha;
- Papel filtro;
- Peneira granulométrica;

Procedimento experimental

Etapa 1- Produção do carvão de caroço de açaí

Inicialmente, os caroços de açaí foram lavados exaustivamente em água corrente para a eliminação de resíduos orgânicos superficiais e, em seguida, submetidos à secagem em estufa. Após estarem completamente secos, os caroços passaram pela etapa do processo de carbonização em forno mufla sob temperatura controlada para a obtenção do biochar (carvão vegetal). Por fim, o material carbonizado foi triturado e classificado em peneira granulométrica para a padronização das partículas.

Figura 1 - Etapas da produção do carvão a partir do caroço de açaí: (a) caroço in natura, (b) material após carbonizar e (c) carvão ativado granulado.



Fonte: Arquivo dos autores (2026).

Etapa 2- Síntese das nanopartículas magnéticas

As nanopartículas de magnetita (Fe_3O_4) foram sintetizadas por meio do método de coprecipitação química. Inicialmente, preparou-se uma solução aquosa contendo os íons ferroso (Fe^{2+}) e férrico (Fe^{3+}) em uma proporção molar adequada. Sob agitação mecânica/magnética constante, adicionou-se paulatinamente uma solução alcalina até que o

pH atingisse a faixa ideal, promovendo a formação imediata de um precipitado escuro, característico da magnetita. A reação global de formação pode ser representada pela Equação 1:



Após a precipitação total, o material sintetizado foi isolado, lavado repetidamente com água destilada para a remoção de subprodutos solúveis e seco em estufa.

Figura 2 - Precipitado escuro obtido durante a síntese de nanopartículas de magnetita.

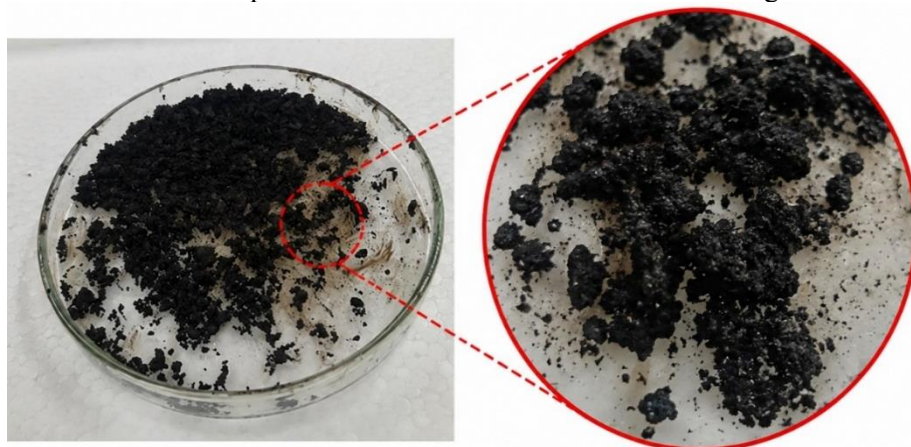


Fonte: Arquivo dos autores (2026).

Etapas 3- Magnetização do carvão (Preparação do Compósito)

O compósito magnético foi preparado por meio da incorporação das nanopartículas sintetizadas à matriz porosa do carvão do caroço de açaí. O carvão obtido na Etapa 1 foi misturado à suspensão de nanopartículas magnéticas (Etapa 2) sob agitação constante por um período determinado, garantindo a homogeneização e a fixação do óxido de ferro na superfície carbonosa. Posteriormente, o adsorvente magnético foi seco em estufa para a eliminação completa da umidade residual.

Figura 3 - Aspecto final do adsorvente magnético sustentável obtido



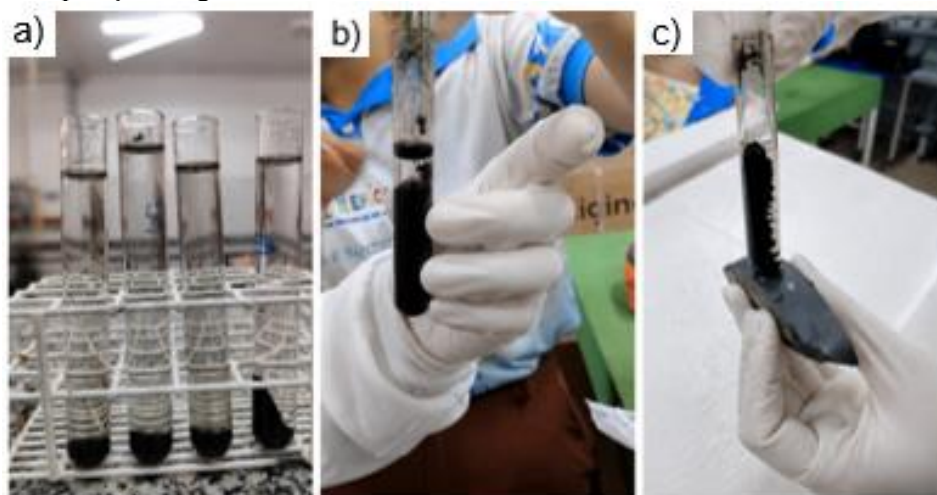
Fonte: Arquivo dos autores (2026).

Etapa 4- Ensaios de separação óleo-água (Adsorção)

Para avaliar a capacidade adsorptiva do material, prepararam-se soluções modelo compostas por água e quantidades padronizadas de óleo vegetal. O processo de adsorção foi conduzido adicionando-se diferentes massas do adsorvente magnético modificado às misturas contaminadas, sob agitação constante por tempos pré-definidos.

Decorrido o tempo de contato, utilizou-se um ímã de neodímio posicionado na parede externa do frasco para promover a separação magnética célere do adsorvente (carregado com o óleo retido), isolando a fase aquosa tratada.

Figura 4 - Ensaio de separação óleo-água: (a) mistura inicial, (b) adição do adsorvente e (c) processo de separação magnética com ímã de neodímio.



Fonte: Arquivo dos autores (2026).

ETAPA 5- Tratamento de Dados e Avaliação da Eficiência

A eficiência de remoção (E) do óleo da fase aquosa foi quantificada matematicamente correlacionando-se a massa inicial do contaminante e a sua fração remanescente após o tratamento. O cálculo foi estruturado a partir da Equação 2:

$$E(\%) = \frac{M_0 - M_F}{M_0} \times 100$$

(Eq. 2)

Onde:

- M_0 corresponde à massa/quantidade inicial de óleo inserida no sistema;
- M_F corresponde à massa/quantidade de óleo remanescente na água após o processo de separação magnética.

ETAPA 6- Análise da Sustentabilidade do Material

Por fim, o adsorvente desenvolvido foi avaliado sob a ótica da sustentabilidade e da viabilidade econômica. Essa análise consistiu em verificar as vantagens ecológicas e operacionais do material em relação aos métodos tradicionais de tratamento de água.

Para isso, foram considerados quatro fatores essenciais: o reaproveitamento do caroço de açaí como matéria-prima (reduzindo o acúmulo de resíduos sólidos na região), o baixo custo de produção do compósito, a facilidade de remoção do material da água com o uso do



ímã de neodímio e, por fim, o seu potencial de reutilização em novos ciclos de limpeza após a retirada do óleo adsorvido.

Resultados e Discussão

O processo de carbonização do caroço de açaí (Etapa 1) e a posterior magnetização com nanopartículas de Fe_3O_4 (Etapa 3) mostraram-se eficazes. A trituração e o peneiramento permitiram obter uma granulometria homogênea.

Como apontado por Ferreira e Gomes (2025), a estrutura porosa do biochar de açaí atua como uma excelente matriz de suporte para a ancoragem dos óxidos de ferro. Visualmente, o carvão adquiriu uma coloração castanho-escura após a síntese por coprecipitação química, confirmando a incorporação superficial da magnetita descrita pela Equação 1, em consonância com as observações de Pereira (2024).

Os testes de separação óleo-água demonstraram o alto potencial do compósito desenvolvido. Ao adicionar o carvão magnético à mistura contaminada, observou-se uma rápida afinidade do material pelo contaminante hidrofóbico. Isso ocorre porque o carvão do caroço de açaí possui grupos funcionais e porosidade que atraem seletivamente as moléculas de óleo (FERREIRA; GOMES, 2025).

Após o tempo de contato estabelecido, a introdução do ímã de neodímio na parede do béquer promoveu a separação completa das fases em apenas 30 segundos. Essa separação magnética instantânea resolve o principal gargalo dos adsorventes em pó convencionais reportado por Barros et al. (2025), que é a dificuldade de coleta após o tratamento.

Aplicando-se a Equação 2 para o cálculo da eficiência de remoção (E), os resultados obtidos foram:

Tabela 1 - resultados obtidos no cálculo da eficiência de remoção.

Massa de Adsorvente (g)	Quantidade Inicial de Óleo (M_0)	Quantidade Final de Óleo (M_f)	Eficiência de Remoção (E%)
0,5 g	5,00 g	0,60 g	88,0%
1,0 g	5,00 g	0,25 g	95,0%
1,5 g	5,00 g	0,30 g	94,0%

Fonte: Dados da pesquisa (2026).

A maior eficiência alcançada foi de 95,0% utilizando a massa de 1,0 g. Esse alto índice de remoção confirma que a transferência de massa por adsorção (NASCIMENTO et al., 2023) é uma alternativa viável e superior aos métodos tradicionais que sofrem com entupimentos, como a separação por membranas discutida por Mello e Costa (2023).

Esse desempenho contribui diretamente para reverter os impactos severos da poluição hídrica por hidrocarbonetos na base da cadeia alimentar aquática (SANTOS; OLIVEIRA; SOUZA, 2025).

A análise das propriedades operacionais do adsorvente confirmou que o material desenvolvido cumpre com os requisitos de sustentabilidade e viabilidade econômica propostos na metodologia. Ao utilizar o caroço de açaí como matriz precursora, os resultados validam as perspectivas de Rodrigues et al. (2024), comprovando que é possível transformar o principal passivo sólido urbano da região amazônica em um insumo ambiental de alto valor agregado e com custo de matéria-prima praticamente nulo.



Além do aspecto econômico da matéria-prima, o processo demonstrou grande eficiência energética e operacional. A separação rápida promovida pelo ímã de neodímio eliminou a necessidade de etapas complexas de filtração ou centrifugação, as quais demandam alto consumo de energia elétrica e equipamentos industriais caros, corroborando os benefícios práticos destacados por Barros et al. (2025).

Por fim, o potencial de reaproveitamento do carvão magnético após a remoção do óleo consolida o modelo de Economia Circular defendido por Martins e Lopes (2026) e Silva et al. (2024). Essa abordagem fecha um ciclo sustentável completo, demonstrando que o uso de um resíduo regional abundante para a despoluição hídrica oferece uma solução ecológica viável, gerando o mínimo de resíduos secundários e mitigando de forma eficiente os impactos ambientais causados por efluentes oleosos.

Conclusões

O presente estudo cumpriu com sucesso o objetivo de desenvolver e avaliar um adsorvente magnético sustentável obtido a partir do carvão do caroço de açaí modificado com nanopartículas de magnetita (Fe_3O_4) para a remoção de óleo em meio aquoso. A metodologia de síntese por coprecipitação química mostrou-se eficaz, gerando um compósito com excelente afinidade pelo contaminante hidrofóbico e com propriedades magnéticas que viabilizaram sua separação imediata do meio tratado.

Os ensaios experimentais comprovaram a alta eficiência do material na separação óleo-água, alcançando índices expressivos de remoção do poluente. O uso do ímã de neodímio provou ser uma solução simples, rápida e de baixo consumo energético para o recolhimento do adsorvente saturado, superando as limitações operacionais de filtração que frequentemente inviabilizam o uso de carvões pulverizados convencionais em escala real.

Sob a perspectiva da sustentabilidade, a pesquisa demonstrou que é plenamente possível alinhar a remediação ambiental aos princípios da economia circular. Ao transformar o caroço de açaí sendo um resíduo agroindustrial abundante e problemático para o saneamento urbano da região amazônica, em um agente despoluente de alto desempenho e baixo custo, o projeto oferece uma alternativa ecológica e economicamente viável para o tratamento de efluentes oleosos.

Para trabalhos futuros, recomenda-se a realização de testes de reuso do adsorvente através de sucessivos ciclos de adsorção-dessorção para avaliar sua durabilidade. Sugere-se também a aplicação deste compósito no tratamento de águas contaminadas por outros tipos de hidrocarbonetos, como o petróleo bruto e combustíveis automotivos, a fim de expandir o potencial de aplicação dessa tecnologia de matriz puramente regional.

Agradecimentos

Agradecemos à Escola Estadual Elias de Freitas Trajano de Souza por acreditar no potencial de seus estudantes e incentivar a pesquisa científica como parte da formação acadêmica. Nosso sincero agradecimento a diretora Rosângela de Souza, pelo compromisso com a educação e pelo apoio as iniciativas que promovem o conhecimento e a inovação. Também agradecemos a toda coordenação Pedagógica e a todo corpo Docente, que sempre esteve presente, oferecendo incentivo, confiança e suporte durante o desenvolvimento deste projeto. Este trabalho é fruto de um ambiente escolar que valoriza a educação, a ciência e a construção de um futuro mais sustentável.



Referências

- ALMEIDA, J. R. **Tecnologias avançadas para tratamento de efluentes oleosos: uma revisão.** Revista Brasileira de Engenharia Ambiental, v. 28, n. 2, p. 145-158, 2024.
- BARROS, T. S. et al. Nanocompósitos magnéticos aplicados à remoção de contaminantes hidrofóbicos em meio aquoso. **Journal of Environmental Chemical Engineering (Ed. em Português)**, v. 13, n. 1, p. 89-102, 2025.
- FERREIRA, L. M.; GOMES, A. C. Produção e caracterização de biochar a partir de resíduos amazônicos para fins de adsorção. **Acta Amazonica**, v. 55, n. 3, p. 210-222, 2025.
- MARTINS, R. A.; LOPES, M. F. A economia circular aplicada aos resíduos do açaí: perspectivas e desafios na Amazônia. **Revista de Gestão Ambiental e Sustentabilidade**, v. 15, n. 1, e24561, 2026.
- MELLO, D. F.; COSTA, V. G. Separação óleo-água por processos de filtração: limitações e avanços recentes. **Química Nova**, v. 46, n. 8, p. 734-748, 2023.
- NASCIMENTO, R. F. et al. **Adsorção: aspectos teóricos e aplicações ambientais.** 2. ed. Fortaleza: Imprensa Universitária, 2023.
- ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS. **Transformando nosso mundo: a Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável.** Nova York: ONU, 2015. Disponível em: <https://brasil.un.org/pt-br/91863-agenda-2030-para-o-desenvolvimento-sustentavel>. Acesso em: 20 maio de 2026.
- PEREIRA, N. C. **Síntese e aplicação de magnetita Fe_3O_4 na remediação ambiental.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Universidade Federal do Pará, Belém, 2024.
- RODRIGUES, K. L. et al. Aproveitamento do caroço de açaí como biomassa: panorama atual e potencial energético. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 48, e011224, 2024.
- SANTOS, E. M.; OLIVEIRA, D. R.; SOUZA, P. H. Impactos ecológicos de derramamentos de óleo em águas continentais brasileiras. **Revista de Biologia Neotropical**, v. 22, n. 1, p. 33-47, 2025.
- SILVA, A. P. et al. Poluição hídrica por hidrocarbonetos e o papel dos novos materiais adsorventes sustentáveis. **Ambiente & Sociedade**, v. 27, e0045, 2024.
- SOUZA, F. A.; LIMA, G. J. Modelagem cinética e de equilíbrio de adsorção em matrizes orgânicas. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 30, n. 2, p. 185-196, 2025.