

Valorização de subprodutos da castanha-do-Brasil (*Bertholletia excelsa*) como novos materiais adsorptivos para remoção de contaminantes: Uma revisão

Valorization of Brazil nut (*Bertholletia excelsa*) by-products as new adsorvent materials for contaminant removal: A review

Aprovechamiento de los subproductos de la nuez de Brasil (*Betholletia excelsa*) como nuevos materiales adsorbentes para la eliminación de contaminantes: Una revisión

Recebido: 23/04/2026 | Aceito: 30/04/2026 | Publicado: 01/05/2026

Maria Lucidalva Ribeiro de Sousa

ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-9442-9583>
Universidade Federal do Amazonas, Brasil
E-mail: dalvabiologa@gmail.com

Camila Costa Prado

ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-7831-2402>
Universidade Federal do Amazonas, Brasil
E-mail: camilaprd02@gmail.com

Isabela Ribeiro de Albuquerque

ORCID: <https://orcid.org/009-004-2832-0855>
Universidade Federal do Amazonas, Brasil
E-mail: isabelaalbuquerque364@gmail.com

Ana Beatriz Costa Prado

ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-7113-6867>
Universidade Federal do Amazonas, Brasil
E-mail: anabeaprado@gmail.com

Ana Emilia Margarido de Freitas

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1936-1901>
Universidade Federal do Amazonas, Brasil
E-mail: emiliamargarido@gmail.com

Flavio Augusto de Freitas

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7940-4910>
Universidade Federal do Amazonas, Brasil
E-mail: freitas.flavio@yahoo.com.br

Ariane Mendonça Kluczkovski

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1785-3766>
Universidade Federal do Amazonas, Brasil
E-mail: ariane@ufam.edu.br

Resumo

A cadeia produtiva da castanha-do-Brasil (*Bertholletia excelsa* H.B.K.) gera volumes expressivos de resíduos lignocelulósicos, entre os quais casca, ouriço e película, cuja destinação permanece tecnicamente subutilizada. Esta revisão analisou criticamente a literatura científica publicada entre 2018 a 2025 sobre a conversão termoquímica dessas três frações em biochar e carvão ativado, avaliando seu desempenho como bioadsorventes na remoção de corantes orgânicos, fármacos e pesticidas em sistemas aquosos. A busca sistemática foi conduzida nas bases Scopus, Web of Science, Google Scholar e PubMed, com descritores combinados pelos operadores booleanos AND e OR, sendo selecionados artigos experimentais em português, espanhol e inglês. Os resultados demonstram que a casca é a fração mais investigada, com eficiências de remoção superiores a 90% para corantes catiônicos, fármacos e herbicidas. O ouriço, embora menos explorado, apresentou capacidade de remoção de azul de metileno de até 99%, equiparável a adsorventes comerciais. A película, apesar de gerada continuamente no processamento, permanece sem investigação sistemática quanto ao seu uso como material adsorvente, representando lacuna científica relevante. A diversidade de rotas de ativação empregadas, química e térmica, reflete um campo em consolidação, com avanços necessários em padronização metodológica, avaliação em efluentes reais e análise de regeneração dos materiais. Os subprodutos da castanha-do-Brasil constituem matéria-prima de amplo espectro para bioadsorventes de alto desempenho, com potencial estratégico para a bioeconomia circular amazônica.

Palavras-chave: Biomassa lignocelulósica; Estrutura porosa; Tratamento de efluentes; Remoção de corantes; Mecanismos de adsorção.

Abstract

The Brazil nut (*Bertholletia excelsa* H.B.K.) production chain generates significant volumes of lignocellulosic waste, including shells, husks, and skins, the utilization of which remains technically underdeveloped. This review critically analyzed the scientific literature published between 2018 and 2025 on the thermochemical conversion of these three fractions into biochar and activated carbon, evaluating their performance as bioadsorbents in the removal of organic dyes, pharmaceuticals, and pesticides in aqueous systems. The systematic search was conducted in the Scopus, Web of Science, Google Scholar, and PubMed databases, using search terms combined with the Boolean operators AND and OR, and experimental articles in Portuguese, Spanish, and English were selected. The results show that the peel is the most widely studied fraction, with removal efficiencies often exceeding 90% for cationic dyes such as methylene blue and crystal violet, as well as for drugs such as amoxicillin and paracetamol and the herbicide 2,4-D. The husk, although less explored, demonstrated adsorption performance equivalent to that of commercial adsorbents for the removal of methylene blue, with rates of up to 99%. The film, despite being continuously generated during processing, remains without systematic investigation regarding its use as an adsorbent material, representing a significant scientific gap. It is concluded that Brazil nut byproducts constitute a broad-spectrum raw material for low-cost, high-performance bioadsorbents, with potential for integration into water treatment systems aligned with the principles of the Amazonian circular bioeconomy.

Keywords: Lignocellulosic biomass, Porous structure; Wastewater treatment; Dye removal; Adsorption mechanisms.

Resumen

La cadena de producción de la nuez de Brasil (*Bertholletia excelsa* H.B.K.) genera importantes volúmenes de residuos lignocelulósicos, entre los que se encuentran la cáscara, el capullo y la película, cuyo aprovechamiento sigue estando técnicamente infrutilizado. Esta revisión analizó críticamente la literatura científica publicada entre 2018 y 2025 sobre la conversión termoquímica de estas tres fracciones en biochar y carbón activado, evaluando su rendimiento como bioadsorbentes en la eliminación de colorantes orgánicos, fármacos y pesticidas en sistemas acuosos. La búsqueda sistemática se llevó a cabo en las bases de datos Scopus, Web of Science, Google Scholar y PubMed, con descriptores combinados mediante los operadores booleanos AND y OR, seleccionándose artículos experimentales en portugués, español e inglés. Los resultados demuestran que la cáscara es la fracción más investigada, con eficiencias de eliminación superiores al 90 % para colorantes catiónicos, fármacos y herbicidas. El espino, aunque menos explorado, presentó una capacidad de eliminación del azul de metileno de hasta el 99 %, comparable a la de los adsorbentes comerciales. La película, a pesar de generarse continuamente durante el procesamiento, sigue sin ser objeto de una investigación sistemática en cuanto a su uso como material adsorbente, lo que supone una importante laguna científica. La diversidad de vías de activación empleadas, tanto químicas como térmicas, refleja un campo en consolidación, con avances necesarios en la estandarización metodológica, la evaluación en efluentes reales y el análisis de la regeneración de los materiales. Los subproductos de la nuez de Brasil constituyen una materia prima de amplio espectro para bioadsorbentes de alto rendimiento, con potencial estratégico para la bioeconomía circular amazónica.

Palabras clave: Biomasa lignocelulósica; Estructura porosa; Tratamiento de efluentes; Eliminación de colorantes; Mecanismos de adsorción.

1. Introdução

A castanha-do-Brasil (*Bertholletia excelsa*) ocupa posição estratégica na bioeconomia amazônica, articulando conservação florestal, geração de renda e inserção em mercados internacionais de alto valor agregado. Sua cadeia produtiva envolve extrativistas, cooperativas e agroindústrias, configurando-se como importante fonte de renda para populações que vivem em áreas de floresta contínua (Esperança *et al.*, 2024). Entretanto, a expansão dessa cadeia tem sido acompanhada pela geração expressiva de resíduos lignocelulósicos, como ouriços, cascas e películas, cuja destinação ainda ocorre de forma pouco eficiente, evidenciando lacunas no aproveitamento desses materiais.

Entre 2021 e 2024, o Amazonas manteve-se como principal produtor de castanha-do-Brasil, com produção variando entre 11,291 e 14,303 mil toneladas, das quais cerca de 90% correspondem a resíduos e apenas 10% à fração comercializada (IBGE, 2025). Esse padrão, evidencia-se a predominância de biomassa residual. Esses dados reforçam o potencial dos resíduos como matéria-prima abundante para bioadsorventes.

Durante o processamento das sementes, frações não destinadas ao consumo acumulam-se em diferentes etapas do beneficiamento e, frequentemente, são descartadas, o que pode gerar impactos ambientais e perda de valor agregado (Alves;

Souza, 2022). Esse cenário reforça a necessidade de estratégias alinhadas aos princípios da economia circular, nas quais resíduos agroindustriais são reinseridos em cadeias produtivas como matérias-primas para novos materiais funcionais.

Do ponto de vista estrutural, esses resíduos são ricos em celulose, hemicelulose e lignina (Sousa *et al.*, 2025), características que os tornam adequados para processos de conversão termoquímica, como a pirólise. Esses processos permitem a obtenção de materiais carbonáceos, como biochar e carvão ativado, com propriedades físico-químicas ajustáveis, incluindo elevada área superficial, porosidade desenvolvida e diversidade de grupos funcionais superficiais (Duarte *et al.*, 2022;). Tais características são determinantes para o desempenho desses materiais em processos de adsorção de contaminantes.

A eficiência desses bioadsorventes está associada a mecanismos físico-químicos complexos, que dependem tanto da natureza do adsorvente quanto do contaminante (Dong *et al.*, 2023; Castro *et al.*, 2025). Além disso, a composição química influenciam diretamente a capacidade de adsorção, tornando os materiais derivados de biomassa alternativas promissoras aos adsorventes convencionais (Yang *et al.*, 2022; Zheng *et al.*, 2021).

Dentre as aplicações ambientais, destaca-se a remoção de corantes orgânicos de efluentes aquosos (Zhang *et al.*, 2025; Katyar *et al.*, 2022), especialmente aqueles provenientes de indústrias têxteis, alimentícias e farmacêuticas. Esses compostos apresentam elevada estabilidade química e resistência à degradação, dificultando sua remoção por métodos convencionais. Nesse contexto, biochars e carvões ativados derivados de biomassa lignocelulósica têm demonstrado elevada eficiência na remoção de corantes, com capacidades adsorptivas significativas e comportamento frequentemente descrito por modelos como Langmuir e pseudo-segunda ordem (Ali *et al.*, 2023).

Adicionalmente, esses materiais têm sido investigados quanto à remoção de outros contaminantes orgânicos e inorgânicos, ampliando sua aplicabilidade em processos de remediação ambiental (Hassan *et al.*, 2024). Em menor escala, estudos também apontam seu potencial na adsorção de micotoxinas, como as aflatoxinas, compostos altamente tóxicos associados a condições inadequadas de secagem e armazenamento de produtos agrícolas (Vázquez-Durán *et al.*, 2022). Embora essa aplicação ainda demande maior aprofundamento, evidencia-se a versatilidade desses materiais em diferentes matrizes.

Apesar dos avanços observados na literatura, ainda há limitada padronização nos processos de produção e ativação de biochars derivados de resíduos específicos, como os da castanha-do-Brasil, o que dificulta a comparação entre estudos e a reprodutibilidade dos resultados, além de restringir sua aplicação em escala industrial. Adicionalmente, persistem lacunas quanto à compreensão integrada das relações entre condições de processamento, propriedades estruturais dos materiais e desempenho adsorptivo frente a diferentes classes de contaminantes.

Diante desse contexto, esta revisão tem como objetivo analisar criticamente a literatura científica publicada entre 2018 a 2025 sobre a valorização das três principais frações residuais da castanha-do-Brasil, casca, ouriço e película, com foco em sua conversão termoquímica dessas três frações em biochar e carvão ativado, avaliando seu desempenho como bioadsorventes na remoção de corantes orgânicos, fármacos e pesticidas em sistemas aquosos.

2. Metodologia

O presente estudo caracteriza-se como uma revisão de literatura sistemática de abordagem quantitativa em relação aos 17 (dezessete artigos) selecionados para compor o corpus da pesquisa (Tabela 1) e em relação à quantidade da capacidade de adsorção apresentada na Figura 3 e na eficiência máxima de remoção em porcentagens na Figura 4 (Snyder, 2019; Risemberg *et al.*, 2026).

Esta revisão foi conduzida de forma sistemática nas bases de dados Scopus, Web of Science, Google Scholar e PubMed, utilizando combinações dos descritores "*resíduos de castanha-do-Brasil*", "*resíduos de castanha-do-Pará*",

"adsorção", "carvão ativado", "biochar", "bioadsorvente" e "corantes", associados pelos operadores booleanos AND e OR. Foram incluídos 17 artigos experimentais, nacionais e internacionais, publicados entre 2018 a 2025, redigidos em português, espanhol ou inglês, com aderência temática direta ao uso de subprodutos da castanha-do-Brasil como bioadsorventes para remoção de contaminantes orgânicos em sistemas aquosos. Foram excluídos 65 estudos de revisão, teses, dissertações e trabalhos sem dados experimentais de adsorção e publicações que utilizaram biomassas não relacionadas ao escopo definido. Após aplicação dos critérios de elegibilidade, os artigos selecionados foram analisados criticamente quanto às frações residuais empregadas, rotas de processamento, contaminantes-alvo, eficiências de remoção e mecanismos de adsorção reportados, sendo os dados sintetizados na Tabela 1.

3. Resíduos da Cadeia Produtiva da Castanha-do-Brasil

O processamento da castanha-do-Brasil compreende etapas sucessivas de coleta, transporte, secagem, quebra e armazenamento, ao longo das quais são gerados resíduos de natureza lignocelulósica em diferentes pontos da cadeia. Frequentemente descartados sem aproveitamento adequado, esses materiais representam uma parcela expressiva da biomassa total produzida e configuram um passivo ambiental quando submetidos a manejo inadequado (Alves *et al.*, 2022).

Dentre os resíduos mais representativos, sobressaem-se o ouriço, a casca externa e a película da semente (Figura 1). Tais materiais apresentam distinções quanto à granulometria, densidade e teor de umidade, variáveis que condicionam seu comportamento durante o armazenamento e sua reatividade em processos de conversão termoquímica. Em termos de composição química, são constituídos majoritariamente por celulose, hemicelulose e lignina, o que os caracteriza como biomassas lignocelulósicas com aptidão para a produção de materiais carbonáceos de elevado valor agregado (Duarte, 2022; Sousa *et al.*, 2025).

Figura 1 - Ouriço e seus componentes. (a) Fruto, (b) Castanhas com casca, (c) Castanhas sem casca, (d) Casca, (e) Película da casta.



Fonte: Acervo dos Autores (2026).

3.1 Ouriço

Dentre os subprodutos resultantes do processamento da castanha-do-Brasil, o ouriço constitui o resíduo de maior proporção em massa (Figura 1-a). Botanicamente classificado como pixídio lenhoso, essa estrutura apresenta consistência

rígida e dimensões generosas, desempenhando a função de proteção das sementes durante seu desenvolvimento e dispersão natural (Kluczkovski & Scussel, 2006). Sua morfologia é de forma globosa, com diâmetro situado entre 9 e 12 cm e massa média oscilando entre 0,565 e 1,022 kg.

Do ponto de vista operacional, o ouriço é habitualmente aberto nos denominados 'pontos de quebra', localizados na floresta ou em áreas ribeirinhas adjacentes, permanecendo acumulado nesses locais após a extração das sementes (Rubem; Vinhote; Kluczkovski, 2025). Em diversas regiões produtoras, grandes quantidades desse resíduo são abandonadas sobre o solo sem gerenciamento adequado, sendo frequentemente deslocadas para as margens das clareiras ou submetidas à queima como forma de liberação de espaço (Mendes, 2023).

3.2 Casca

Na etapa industrial ou semi-industrial, surge o segundo tipo de resíduo: a casca que envolve a semente. Esse material é gerado em centrais de beneficiamento, galpões de quebra mecanizada e pequenas agroindústrias (Figura 1-d). A casca apresenta estrutura rígida, textura fibrosa e composição típica de biomassa lignocelulósica, com teores expressivos de celulose, hemicelulose e lignina (Sousa *et al.*, 2024). Estudos de prospecção indicam que essas cascas, podem ser usadas como matéria-prima para embalagens de alimentos e outros materiais de base biológica, o que reforça seu potencial de reuso produtivo (Sousa *et al.*, 2025).

3.3 Película

O terceiro resíduo é a película fina e escura que reveste a semente, removida nas etapas de branqueamento, torrefação ou despeliculamento (Figura 1-e). Embora tenha menor volume em comparação ao ouriço e à casca, essa película aparece de forma constante na rotina das beneficiadoras e normalmente é tratada apenas como pó ou resto de limpeza. Trabalhos de caracterização química mostram que tanto a casca quanto a película mantêm a mesma base lignocelulósica presente em outras biomassas amazônicas, abrindo a possibilidade de uso que envolvem produção de biocarvões, compósitos ou adsorventes (Barros *et al.*, 2024).

A combinação entre elevado teor de carbono fixo e morfologia fibrosa intrínseca a esses resíduos os credencia como precursores de elevado potencial para a obtenção de biochar e carvão ativado (Nobre *et al.*, 2023). A conversão desses materiais por meio de rotas de pirólise e ativação química ou física promove a reorganização da matriz lignocelulósica, resultando em produtos com estrutura porosa pronunciada e propriedades superficiais adequadas a aplicações no campo da adsorção (Diel *et al.*, 2025). As características resultantes, como área superficial específica, distribuição de tamanho de poros e natureza dos grupos funcionais presentes na superfície, são determinadas pelas condições operacionais adotadas, incluindo temperatura de processamento, tempo de residência e agente ativante utilizado (Silva *et al.*, 2025).

A produção de resíduos ao longo da safra frequentemente supera a capacidade de reaproveitamento, destaque para as queima doméstica, em caldeiras ou aplicação agrícola em pequena escala. Em unidades de beneficiamento, o acúmulo desses materiais demanda estratégias de manejo adequadas, uma vez que a disposição a céu aberto pode desencadear a multiplicação de vetores biológicos, a migração de compostos orgânicos para o solo e para os lençóis freáticos, além da liberação de poluentes gasosos nos eventos de combustão não controlada (Alves & Souza, 2022; Esperança *et al.*, 2024).

Para além dos impactos sobre o meio ambiente, a destinação inadequada desses resíduos pode representar um risco sanitário indireto, sobretudo quando condições elevadas de umidade favorecem a colonização fúngica, com potencial ocorrência de espécies produtoras de micotoxinas (Vázquez-Durán *et al.*, 2022). Esse aspecto reforça a necessidade de uma

gestão integrada, que leve em conta tanto o tratamento dos resíduos quanto a manutenção da integridade sanitária ao longo de toda a cadeia.

A conversão desses resíduos em biochar e carvão ativado constitui uma das rotas mais coerentes para sua valorização, na medida em que transforma um passivo ambiental em insumo de aplicação tecnológica. A literatura científica tem documentado o potencial desses produtos como bioadsorventes para a remoção de contaminantes em diversas matrizes, com enfoque nos corantes orgânicos presentes em efluentes aquosos, cuja combinação de estabilidade química acentuada e resistência aos processos convencionais de mineralização os torna alvos prioritários de investigação (Georgin *et al.*, 2018).

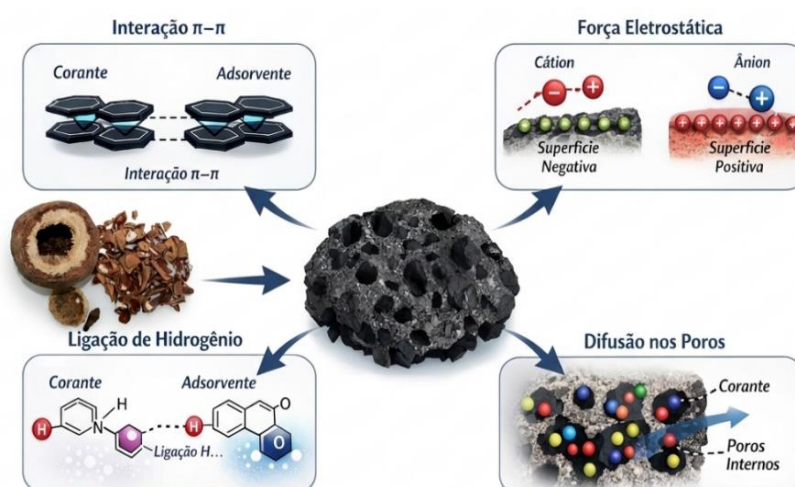
4. Adsorção dos Bioadsorventes

A adsorção é um processo interfacial no qual moléculas ou íons são retidos na superfície de um sólido, sendo amplamente aplicada na remoção de contaminantes em sistemas aquosos e, em menor escala, em matrizes oleosas e alimentares (Aguilar-Zúñiga *et al.*, 2021). Materiais com elevada área superficial, estrutura porosa desenvolvida e diversidade de grupos funcionais apresentam maior afinidade por diferentes classes de contaminantes, o que os torna relevantes em processos de tratamento ambiental (Silva *et al.*, 2023).

Resíduos lignocelulósicos, como os provenientes da castanha-do-Brasil, apresentam composição rica em celulose, hemicelulose e lignina, o que os torna adequados para a produção de materiais carbonáceos com propriedades adsorptivas (Appell *et al.*, 2023). A conversão desses resíduos permite explorar sua estrutura como matriz porosa, com aplicações na remoção de contaminantes orgânicos, em destaque os corantes.

Os mecanismos de adsorção (Figura 2) envolvem interações físico-químicas, incluindo forças de *van der Waals*, interações hidrofóbicas, ligações de hidrogênio e interações π - π entre superfícies carbonáceas e compostos aromáticos (Zhou *et al.*, 2023; Souza, 2024). Em sistemas contendo corantes orgânicos, que frequentemente apresentam estruturas aromáticas estáveis, essas interações são determinantes para o desempenho adsorptivo. A contribuição relativa de cada mecanismo depende das propriedades do adsorvente, como área superficial, distribuição de poros, carga elétrica e funcionalização química (Valverde *et al.*, 2024).

Figura 2 - Mecanismo de adsorção em bioadsorventes.



Fonte: Acervo dos Autores (2026).

A preparação de bioadsorventes a partir de biomassa envolve etapas preliminares de secagem, redução de tamanho e padronização granulométrica, que influenciam diretamente a difusão de massa e a acessibilidade aos poros (Duarte *et al.*, 2022). Em seguida, processos termoquímicos, como a pirólise, promovem a decomposição controlada da biomassa em atmosfera com baixo teor de oxigênio, resultando na formação de uma matriz carbonácea (Ibrahim, 2023). Parâmetros como temperatura, taxa de aquecimento e tempo de residência afetam significativamente o rendimento e as propriedades estruturais do material obtido (Nobre *et al.*, 2025).

A maximização do desempenho adsorptivo dos carvões ativados é frequentemente alcançada pela associação da pirólise a etapas de ativação física ou química. No caso da ativação química, o emprego de agentes como H₃PO₄, KOH ou NaOH favorece o desenvolvimento de estrutura porosa e a incorporação de grupos funcionais na superfície do material, elevando sua afinidade por contaminantes presentes em solução aquosa (Lin *et al.*, 2020; Souza, 2024). Esses tratamentos possibilitam o controle de atributos como área superficial BET, volume total de poros e caráter ácido-base superficial, parâmetros determinantes para a eficiência de remoção de corantes.

A capacidade adsorptiva dos materiais carbonáceos decorre da interação entre suas propriedades estruturais e as características físico-químicas do contaminante, sendo que, para corantes, atributos como tamanho molecular, carga elétrica e arranjo estrutural condicionam diretamente os mecanismos de difusão e retenção nos sítios porosos (Silva *et al.*, 2025). A aplicação desses adsorventes na remoção de micotoxinas, como aflatoxinas, embora registrada na literatura, constitui abordagem ainda em consolidação, com efetividade dependente das condições matriciais, especialmente em sistemas lipídicos (Vázquez-Durán *et al.*, 2022).

A caracterização dos adsorventes sintetizados é etapa indispensável para correlacionar propriedades texturais e desempenho adsorptivo, sendo conduzida por meio de técnicas complementares. A adsorção de N₂ (BET) e a espectroscopia FTIR fornecem, respectivamente, dados sobre área superficial, distribuição de poros e grupos funcionais superficiais (Santos *et al.*, 2022), enquanto a MEV e a DRX revelam a morfologia e o grau de ordenamento estrutural do material (Lima *et al.*, 2019). A determinação do pH_{zpc} complementa esse conjunto analítico ao elucidar o comportamento eletrostático da superfície em diferentes condições de pH (Miljanić *et al.*, 2024).

5. Resíduos Utilizados como Bioadsorventes

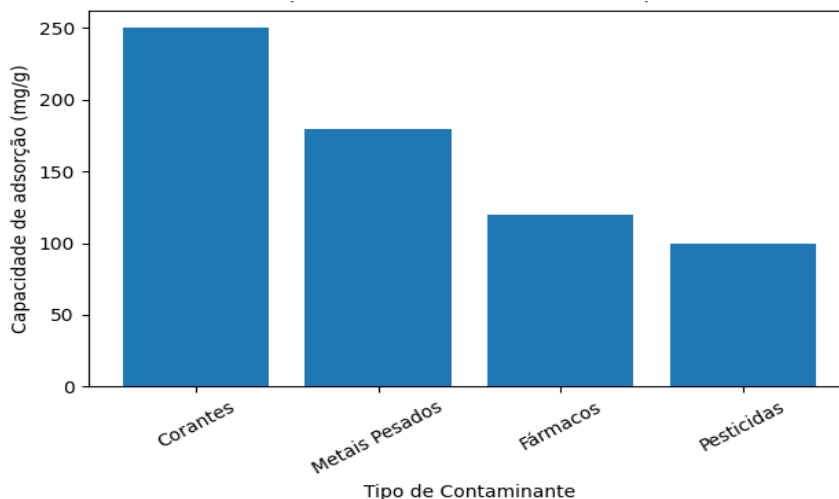
Ao longo das últimas décadas, a crescente demanda por alternativas adsorptivas economicamente viáveis e de menor pegada ambiental impulsionou a investigação de bioadsorventes derivados de resíduos vegetais, com ênfase naqueles de composição predominantemente lignocelulósica, como os resíduos provenientes da castanha-do-Brasil. Tais materiais se destacam por sua ampla disponibilidade, caráter renovável e diversidade estrutural intrínseca, qualidades que potencializam sua aplicação na retenção de contaminantes orgânicos e inorgânicos em matrizes aquosas (Kiran *et al.*, 2025).

A literatura registra uma diversidade de resíduos usados como precursores de bioadsorventes como bagaço de cana-de-açúcar (Andrade *et al.*, 2020), casca de arroz (Shamsollahi & Partovinia., 2019), casca de laranja (Souza *et al.*, 2020) e resíduos de madeira de bambu, eucalipto e pinus também vêm sendo avaliados na remoção de corantes (Porto, 2025). São exemplos que aparecem de forma recorrente em estudos dedicados à remoção de corantes, metais pesados e outros poluentes orgânicos. Em vários trabalhos, esses materiais são submetidos a secagem, moagem, carbonização e ativação, gerando estruturas porosas com bom desempenho adsorptivo (Piquet & Martelli, 2022).

Os subprodutos da castanha vêm se mostrando como materiais altamente eficientes para serem utilizados na adsorção de corantes, íons, entre outras moléculas químicas (Thomaz *et al.*, 2023). Destaca-se, que essas substâncias já estudadas nos subprodutos da castanha são moléculas pequenas e de difícil remoção. Em destaque está o maior número de estudos para

remoção de corantes de efluentes contaminados (Figura 3), os quais são um dos principais constituintes produzidos a partir de muitas indústrias relacionadas com a matéria têxtil, alimentícia, plásticos, etc.

Figura 3 - Materiais adsorvidos em subprodutos da castanha.



Fonte: Autores (2026).

A partir de dados encontrados na literatura, é possível afirmar que os tratamentos em bioadsorventes alternativos é um dos métodos mais populares que indicam que modificações químicas e físicas podem ampliar significativamente a capacidade adsorptiva desses biomateriais, promovendo aumento da área superficial, alteração da carga superficial e maior disponibilidade de sítios ativos (Patel *et al.*, 2025). No entanto, foi possível observar alguns subprodutos com eficiência em adsorção sem modificação química, entre eles a casca da castanha.

O aproveitamento de resíduos agroindustriais como bioadsorventes alia a busca por alternativas de baixo custo operacional à necessidade de redução da pegada ecológica em processos de remediação ambiental (Lima *et al.*, 2019). Embora amplamente explorada na literatura, essa abordagem ainda confere representatividade limitada aos subprodutos da castanha-do-Brasil, evidenciando uma lacuna científica relevante diante do expressivo volume de biomassa residual gerado nessa cadeia produtiva e do potencial adsorptivo ainda insuficientemente investigado desses materiais.

6. Corantes Sintéticos Industriais

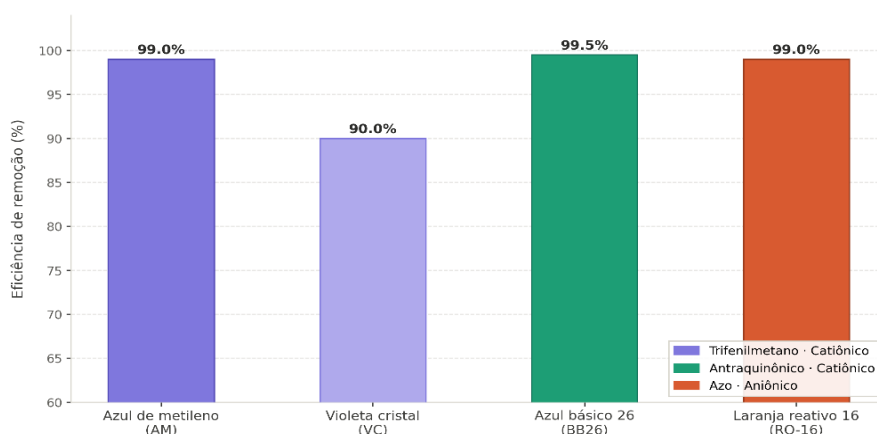
Os corantes sintéticos são compostos orgânicos amplamente utilizados nas indústrias têxtil, alimentícia e cosmética, caracterizados pelo baixo custo, elevada intensidade cromática e estabilidade química frente a agentes físicos e químicos (Yagub *et al.*, 2014). Classificam-se segundo sua estrutura molecular em grupos como azo, antraquinônicos e trifenilmetanos, categorias que concentram o maior volume de aplicações industriais e, simultaneamente, os maiores desafios de remoção ambiental (Affat, 2021). A alta solubilidade em água e a resistência à degradação por métodos convencionais tornam esses compostos contaminantes persistentes, exigindo alternativas adsorptivas eficientes para seu tratamento (Hassan & Carr, 2018).

Sob a perspectiva da carga iônica, os corantes subdividem-se em catiônicos, aniônicos e não iônicos, classificação que determina diretamente os mecanismos de interação com a superfície dos adsorventes (Shah, 2024). Corantes catiônicos, como os trifenilmetanos azul de metileno e violeta cristal, apresentam carga positiva em solução aquosa e interagem preferencialmente com superfícies de carga negativa por atração eletrostática. Corantes aniônicos, como os azo-reativos,

requerem mecanismos complementares como interações π - π e hidrofóbicas para sua remoção eficiente (Zhou *et al.*, 2023). A compreensão dessas diferenças é determinante para a seleção e o desenvolvimento de bioadsorventes com desempenho seletivo frente a diferentes classes de efluentes.

Os corantes investigados nos estudos com bioadsorventes de castanha-do-Brasil pertencem predominantemente à classe dos catiônicos (Figura 4), com destaque para os trifenilmetanos azul de metileno e violeta cristal e o antraquinônico azul básico 26, cujas eficiências de remoção atingiram até 99,51% (Georgin *et al.*, 2018; Souza *et al.*, 2019; Melo *et al.*, 2018; Diel *et al.*, 2025). O único corante aniônico investigado, o laranja reativo 16, também apresentou remoção de 99% por carbonização da casca (Santos *et al.*, 2022), evidenciando que a capacidade adsorptiva dos materiais derivados da castanha envolve mecanismos complementares além das interações eletrostáticas (Zhou *et al.*, 2023). A predominância de corantes catiônicos nos estudos é coerente com a carga superficial negativa dos carvões ativados em pH neutro, condição que favorece a atração eletrostática com moléculas de carga positiva, conforme ilustrado na Figura 2.

Figura 4 – Eficiência máxima de remoção por classe de corante em bioadsorventes de castanha-do-Brasil.



Fonte: Autores (2026).

7. Resultados

A pesquisa teve como resultado um levantamento sistemático da literatura recente, priorizando trabalhos publicados nos últimos anos e relacionados à aplicação de bioadsorventes na descontaminação ambiental. Após a remoção de duplicatas e a exclusão de estudos fora do escopo, foram selecionados os artigos que atendiam aos critérios estabelecidos, os quais foram analisados criticamente e sintetizados na Tabela 1.

Observa-se que, entre os subprodutos da cadeia produtiva da castanha-do-Brasil, a casca tem sido mais frequentemente empregada na produção de adsorventes, enquanto o ouriço aparece em menor número de estudos, ambos já investigados como precursores de bioadsorventes na literatura como investigados por Ali *et al.*, 2021 e Diel *et al.*, 2025. Em contraste, a película, embora gerada no processamento, ainda é pouco explorada quanto ao seu uso como material adsorvente, indicando uma lacuna relevante para futuras investigações.

Tabela 1 - Identificação de artigos proveniente de biomassa e bioadsorventes da castanha-do-Brasil

Subprodutos da castanha-do-Brasil	Poluente adsorvido	Capacidade de remoção (%)	Resultados/conclusões	Referência
Carvão ativado de casca	2,4-D (herbicida)	92,51	O carvão ativado de cascas de castanha-do-Brasil demonstrou potencial significativo para remover o herbicida 2,4-D da água, com a ativação por vapor d'água proporcionando um equilíbrio mais rápido e maior eficiência de remoção em comparação com a ativação por CO ₂ .	(Castro <i>et al.</i> , 2025)
Carvão ativado de casca	Violeta cristal (VC) e azul de metileno (AM)	70 e 90	Este trabalho estabelece o carvão ativado da casca como um material altamente eficaz para o tratamento de águas residuais, destacando seu potencial como uma solução sustentável e de baixo custo. Sua consonância com os princípios da bioeconomia circular.	(Diel <i>et al.</i> , 2025)
Ativação química da casca	Ibuprofeno sódico e diclofenaco sódico	Eficazes para a remoção de fármacos	O carvão ativado da casca foi eficaz, resultando em um material microporoso e reutilizável. O CA pode ser avaliado como um material promissor para a remoção de anti-inflamatórios não esteroides (AINEs) (ibuprofeno e diclofenaco) de meio aquoso.	(Silva <i>et al.</i> , 2025)
Ativação química da casca e ouriço	Azul de metileno (AM)	Eficazes e favoráveis para adsorção de AM	A avaliação dos adsorventes quanto ao processo de adsorção do corante azul de metileno mostrou-se eficiente, sendo que o carvão ativado produzido a partir das cascas apresentou maior capacidade adsorptiva quando comparado ao adsorvente produzido a partir de ouriços.	(Souza, 2021)
Carbonização da casca	Laranja reativo 16 (RO-16)	99	O carvão ativado da casca de castanha-do-Pará é um adsorvente altamente eficaz e economicamente viável para a remoção do corante laranja 16 reativo, tornando-o uma solução promissora para o tratamento de efluentes industriais.	(Santos <i>et al.</i> , 2022)
Ativação química da casca	Azul básico 26 (BB26)	Eficazes para a remoção do corante BB26	O estudo demonstrou que os carvões ativados produzidos a partir de cascas de castanha-do-Brasil e açaí são materiais promissores para a remoção do corante azul 26 básico, exibindo características cinéticas e termodinâmicas favoráveis.	(Souza, 2019)
Ativação térmica da casca	Azul básico 26 (AZB26)	99,51	O estudo concluiu que o carvão derivado de cascas de castanha-do-Brasil é um adsorvente eficaz para corante azul básico 26. Isso destaca o potencial de uso de resíduos agroindustriais para aplicações ambientais.	(Melo <i>et al.</i> , 2018)
Carvão ativado de casca	Violeta Cristal (VC) e Azul de Metileno (AM)	83,3 e 83,8 e 90	A casca da castanha-do-pará, um resíduo agroindustrial amplamente gerado no Brasil, foi empregada como um biossorvente de baixo custo e eficiente para a remoção dos corantes catiônicos VC e AM, demonstrou características cinéticas e termodinâmicas favoráveis.	(Georgin <i>et al.</i> , 2018)

Carvão ativado da casca	Azul de metileno (AM)	92,51	Foi desenvolvido um adsorvente, a partir da casca usando apenas a carbonização do material, apresentando excelentes resultados, sendo promissor para utilização no tratamento de efluentes para remoção do corante AM.	(Almeida <i>et al.</i> , 2021)
Carbonização da casca e ouriço	Remediação de águas	Eficazes para a remoção de corantes	O carvão ativado produzido a partir de resíduos de biomassa por diferentes métodos e condições de processamento está emergindo como um adsorvente promissor para a remediação de ecossistemas.	(Alves <i>et al.</i> , 2022)
Carvão ativado da casca	Fenol	Tem potencial para remoção de fenol	Portanto, com base nos resultados de adsorção, o carvão ativado da casca mostrou-se eficiente na remoção de fenol e representa uma alternativa promissora para o tratamento de águas residuais contendo esse contaminante.	(Silva <i>et al.</i> , 2022)
Carvão ativado da casca	Fenol	83 e 99	Os parâmetros termodinâmicos estimados, a adsorção foi espontânea, favorável, endotérmica e governada por interações físicas. Portanto, a casca da castanha-do-pará mostrou ser um bom material precursor para a preparação de carvão ativado eficiente para a remoção de fenol.	(Silva <i>et al.</i> , 2023)
Carvão ativado da casca	Amoxicilina em efluentes	98,6	O uso dos adsorventes para o tratamento de efluentes hospitalares simulados, contendo diferentes compostos orgânicos e inorgânicos, demonstrou excelentes remoções	(Lima <i>et al.</i> , 2019)
Carvão ativado da casca	Paracetamol em efluentes	98,83	Esses resultados, é possível afirmar que a casca da castanha-do-pará é uma excelente matéria-prima para a preparação de carvões ativados eficientes, que podem ser utilizados com sucesso no tratamento de efluentes hospitalares reais.	(Lima <i>et al.</i> , 2019)
Carvão ativado do ouriço	Viabilidade de uso	Tem potencial para adsorção em contaminantes	A produção de carvão ativado, a partir dos resíduos do ouriço da castanha-do-Brasil, pode proporcionar novas oportunidades de negócio, gerando emprego e renda para agricultores em mão-de-obra de plantas fabris,	(Alves <i>et al.</i> , 2024)
Carbonização e ativação da casca	Azul de metileno (AM)	93	O resíduo da castanha-do-pará possui alto potencial como precursor de carvão ativado, destacando-se entre as biomassas avaliadas. O material resultante apresenta grande área superficial e excelente capacidade de adsorção de contaminantes, como azul de metileno e fenol.	(Nobre <i>et al.</i> , 2023)
Carvão ativado do ouriço	Azul de metileno (AM)	99	Portanto, o ouriço da castanha-do-pará apresenta excelente potencial para o desenvolvimento de carvão ativado, que pode ser utilizado eficazmente para remediar a contaminação ambiental em meio aquoso.	(Lima Duarte <i>et al.</i> , 2021)

Fonte: Autores (2026).

8. Discussão

No tópico seguinte, apresenta-se uma análise integrada dos estudos selecionados, organizados conforme os diferentes materiais investigados.

8.1 Análise dos resultados encontrados para os bioadsorventes da castanha-do-Brasil

A obtenção de adsorventes a partir de precursores lignocelulósicos tem se consolidado como estratégia tecnicamente relevante para a valorização de biomassas residuais e a otimização econômica de sistemas de remediação ambiental. Nessa perspectiva, resíduos gerados ao longo da cadeia produtiva da castanha-do-Brasil, especificamente ouriço e casca, apresentam atributos favoráveis à produção de biochar e carvão ativado de elevado desempenho, destacando-se pela disponibilidade regional expressiva, baixo valor de mercado e rica composição em carbono elementar (Souza *et al.*, 2019; Almeida *et al.*, 2021).

A contaminação de recursos hídricos por micropoluentes como corantes sintéticos, fármacos e pesticidas, tem impulsionado a busca por adsorventes de baixo custo e alta eficiência (Castro *et al.*, 2025). Os subprodutos da castanha-do-Brasil destacam-se como matéria-prima promissora da Amazônia, dada sua abundância regional e potencial técnico crescentes. A análise integrada dos estudos da Tabela 1 permite reconhecer o estado da arte e identificar padrões, convergências e lacunas relevantes no campo.

As pesquisas utilizam diferentes frações da castanha-do-Brasil, com destaque para casca e ouriço, submetidas a carbonização simples, ativação térmica (vapor d'água ou CO₂) ou ativação química com KOH, NaOH ou H₃PO₄. Essa diversidade metodológica, embora dificulte comparações diretas, reflete um campo em consolidação onde cada grupo adapta as rotas de processamento aos contaminantes-alvo de interesse.

Os corantes catiônicos, especialmente o azul de metileno (AM) e o violeta cristal (VC), figuram entre os contaminantes mais investigados. Georjina *et al.* (2018) demonstraram que a casca bruta da castanha-do-pará, sem ativação química, remove o AM com eficiência de 83,8% e características cinéticas e termodinâmicas favoráveis, sinalizando que o resíduo *in natura* já possui potencial considerável para investigações mais aprofundadas.

A produção de carvões ativados supera significativamente o desempenho dos biossorventes não ativados. Nobre *et al.* (2023) obtiveram remoção de AM de 93% com carvão ativado de casca, destacando-o entre as biomassas amazônicas avaliadas. Lima Duarte *et al.* (2021) alcançaram 99% de remoção utilizando o ouriço como precursor, equiparando o material aos melhores adsorventes comerciais. Independentemente da fração precursora utilizada, casca ou ouriço, os resultados demonstram elevado potencial para a obtenção de carvão ativado com propriedades adsorptivas superiores.

Diel *et al.* (2025) reforçaram a eficiência para corantes catiônicos ao investigar a remoção simultânea de VC e AM com carvão ativado de casca, obtendo remoções de 70% e 90%, respectivamente. Os autores alinham seus resultados aos princípios da bioeconomia circular, conectando a pesquisa laboratorial às demandas de políticas públicas de gestão de resíduos na Amazônia. A publicação no periódico Environmental Science and Pollution Research sinaliza o amadurecimento e o reconhecimento internacional do campo.

A remoção de corantes aniônicos, também apresenta resultados expressivos. Santos *et al.* (2022) reportaram remoção de 99% do corante laranja reativo 16 por carbonização simples da casca, sugerindo que o mecanismo de adsorção envolve contribuições além das eletrostáticas. Souza *et al.* (2019) e Melo *et al.* (2018) corroboram esse potencial ao reportar eficiências de remoção do azul básico 26 com características cinéticas e termodinâmicas favoráveis, este último alcançando 99,51% por ativação térmica.

Lima *et al.* (2019) avaliaram carvões ativados de casca de castanha-do-pará no tratamento de efluentes hospitalares simulados, obtendo remoções de 98,6% para amoxicilina e 98,83% para paracetamol. Esses resultados têm relevância

ambiental direta, dado o impacto crescente dos resíduos farmacêuticos em mananciais hídricos de regiões com saneamento limitado. Silva *et al.* (2025) avançaram ao demonstrar remoção simultânea de ibuprofeno e diclofenaco com material microporoso e reutilizável, reforçando o potencial dos carvões ativados da castanha para contaminantes emergentes.

Castro *et al.* (2025) investigaram a adsorção do herbicida 2,4-D por carvão ativado de casca, alcançando remoção de 92,51%. Os autores demonstraram que a ativação por vapor d'água proporciona equilíbrio mais rápido e maior eficiência em comparação à ativação por CO₂, orientando metodologicamente a escolha do processo em função do contaminante-alvo. O 2,4-D é amplamente detectado em corpos d'água de regiões agrícolas, conferindo ao estudo urgência ambiental evidente.

Alves *et al.* (2022; 2024) avaliaram a viabilidade econômica da produção de carvão ativado a partir de resíduos de casca e ouriço, concluindo que o processo pode gerar oportunidades de negócio e renda para agricultores e trabalhadores na região amazônica. Silva *et al.* (2022) complementam esse panorama ao demonstrar remoção de fenol de 83 a 99% com carvão ativado com KOH da casca da castanha, ampliando o escopo de aplicações documentadas e reforçando a relevância econômica e ambiental do aproveitamento desses resíduos.

A literatura analisada demonstra que os subprodutos da castanha-do-Brasil constituem matéria-prima de amplo espectro para bioadsorventes aplicados ao tratamento de águas, com eficiências frequentemente superiores a 90%. Contudo, estudos futuros devem avançar na padronização das metodologias de caracterização, na avaliação de desempenho em matrizes de água reais e na análise de ciclo de vida completa dos processos. A escalabilidade das rotas de síntese e a regeneração dos materiais são lacunas essenciais a serem preenchidas para que esses bioadsorventes alcancem aplicação tecnológica efetiva.

9. Considerações Finais

Os subprodutos da castanha-do-Brasil, em particular a casca e o ouriço, demonstraram desempenho adsorptivo expressivo frente a diferentes classes de contaminantes, consolidando-se como alternativas tecnicamente viáveis e economicamente promissoras aos adsorventes convencionais. O ouriço, historicamente descartado nas áreas de coleta ou queimado sem aproveitamento, revelou capacidade de remoção de azul de metileno de até 99%, resultado que evidencia o potencial científico e econômico de uma fração abundante e ainda subutilizada. A película permanece sem investigação sistemática na literatura de adsorção: gerada continuamente nas etapas de beneficiamento, compartilha a mesma base lignocelulósica das demais frações e seu potencial como precursor de bioadsorvente segue inexplorado, configurando lacuna científica relevante. Estudos futuros devem priorizar a padronização metodológica, a avaliação em matrizes aquosas reais e a análise de ciclo de vida dos processos, além de investigar a regeneração e o reúso dos materiais como requisitos para escalonamento industrial. A valorização integrada dessas três frações representa uma oportunidade concreta de fortalecer a bioeconomia amazônica, gerar renda nas comunidades extrativistas e transformar resíduos agroindustriais em solução para o saneamento regional.

Agradecimentos

Os autores agradecem à Universidade Federal do Amazonas (UFAM) pelo suporte institucional e à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Amazonas (FAPEAM) pelo apoio financeiro que viabilizou o desenvolvimento desta pesquisa. Agradecem ainda às comunidades extrativistas da Amazônia, cuja relação com a castanha-do-Brasil fundamentou as questões científicas aqui investigadas.

Referências

Affat, S. S. (2021). Classifications, advantages, disadvantages, toxicity effects of natural and synthetic dyes: a review. *University of Thi-Qar Journal of Science*, 8(1), 130–135.

- Aguilar-Zuniga, K., Laurie, V. F., Moore-Carrasco, R., Ortiz-Villeda, B., & Carrasco-Sánchez, V. (2021). Agro-industrial waste products as mycotoxin biosorbents: a review of in vitro and in vivo studies. *Food Reviews International*, 39(17), 2914–2930. <https://doi.org/10.1080/87559129.2021.2001653>
- Ali, K., Javaid, M. U., Ali, Z., & Zaghum, M. J. (2021). Biomass-derived adsorbents for dye and heavy metal removal from wastewater. *Adsorption Science & Technology*, 2021, 9357509. <https://doi.org/10.1177/02637241211054447>
- Almeida, F. A., de Vilhena, A. E. G., da Cruz Schwartz, R. L., Cruz, D. C. P., Nascimento, A. L. M. D., de Carvalho, M. E. F., & Martelli, M. C. (2021). Aproveitamento de resíduo industrial da castanha do Brasil (*Bertholletia excelsa* HBK) em processo de adsorção de corante têxtil. In *Engenharia de Produtos Naturais: Planejamento, Experimentação, Obtenção de Produtos e Purificação* (pp. 310–325). Editora Científica Digital.
- Alves, A. T., Miranda, I. P. de A., Lasmar, D. J., Reis, J. dos S., Machado, F. de S., Rabelo, D. D. M., & Chaar, J. da S. (2022). Produção de carvão ativado através de resíduos da Castanha-do-Brasil (*Bertholletia excelsa* Bonpl.) voltados na solução para o tratamento de águas. *Res. Soc. Dev.*, 11(12), e394111234482. <https://doi.org/10.33448/rsd-v11i12.34482>
- Alves, A. T., Lasmar, D. J., & Costa, A. (2024). Viabilidade econômica do carvão ativado obtido do ouriço da castanha-do-Brasil (*Bertholletia excelsa*). *Future Studies Research Journal: Trends and Strategies*, 16(1), e765. <https://doi.org/10.24023/FutureJournal/2175-5825/2024.v16i1.765>
- Alves, C. M. S., & Sousa, W. R. (2020). Occurrence of aflatoxins in Brazil nuts commercialized in the northeast of Brazil. *Brazilian Journal of Health Review*, 3(4), 8129–8145. <https://doi.org/10.34119/bjhrv3n4-073>
- Andrade Siqueira, T. C., Zanette da Silva, I., Rubio, A. J., Bergamasco, R., Gasparotto, F., Aparecida de Souza Paccola, E., & Ueda Yamaguchi, N. (2020). Sugarcane bagasse as an efficient biosorbent for methylene blue removal: kinetics, isotherms and thermodynamics. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17(2), 526. <https://doi.org/10.3390/ijerph17020526>
- Appell, M., Wegener, E. C., Sharma, B. K., Eller, F. J., Evans, K. O., & Compton, D. L. (2023). In vitro evaluation of the adsorption efficacy of biochar materials on aflatoxin B1, ochratoxin A, and zearalenone. *Animals*, 13(21), 3311. <https://doi.org/10.3390/ani13213311>
- Barros, H. L., Kluczkovski, A. M., Junior, A. K., & Pinto, S. D. C. B. (2024). Avaliação de risco da ocorrência de aflatoxina M1 em leite materno de grupo populacional da região amazônica brasileira. *Brazilian Journal of Health Review*, 7(5), e73834. <https://doi.org/10.34119/bjhrv7n5-391>
- Castro, P. M. D., Ferrarini, S. R., Rimoli, M. D. S. F., Merlo, A. A., Nogueira, R. M., & Pires, E. M. (2025). Adsorption of 2,4-dichlorophenoxyacetic acid (2,4-D) herbicide on activated carbon of Brazil nut shell. *Revista Árvore*, 49, e4902. <https://doi.org/10.1590/1806-908820250049000e4902>
- Diel, J. C., Netto, M. S., dos Santos Nunes, I., Silva, L. F. O., Crissien, T. J., Dos Reis, G. S., & Dotto, G. L. (2025). Remoção dos corantes violeta cristal e azul de metileno de efluentes aquosos utilizando resíduos de castanha-do-pará (*Bertholletia excelsa*) como um potente biossorbente da Amazônia. *Environmental Science and Pollution Research*, 32(50), 28745–28765. <https://doi.org/10.1007/s11356-025-36292-9>
- Dong, M., He, L., Jiang, M., Zhu, Y., Wang, J., Gustave, W., & Wang, Z. (2023). Biochar for the removal of emerging pollutants from aquatic systems: a review. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 20(3), 1679. <https://doi.org/10.3390/ijerph20031679>
- Duarte, R. V. L., Rodrigues, L. A., Moraes, N. P., & Couceiro, P. R. C. (2022). Brazil nut mesocarp (*Bertholletia excelsa*) as a biomass source for activated carbon production: correlation between thermal treatment and adsorption performance. *Biointerface Research in Applied Chemistry*, 12(4), 4584–4596. <https://doi.org/10.33263/BRIAC124.45844596>
- Esperança, V. J. R., Moreira, P. I. O., Chávez, D. W. H., & Freitas-Silva, O. (2024). Evaluation of the safety and quality of Brazil nuts (*Bertholletia excelsa*) using the tools of DNA sequencing technology and aflatoxin profile. *Frontiers in Nutrition*, 11, 1357778. <https://doi.org/10.3389/fnut.2024.1357778>
- Georgin, J., Marques, B. S., Peres, E. C., Allasia, D., & Dotto, G. L. (2018). Biossorção de corantes catiônicos pela casca da castanha-do-pará (*Bertholletia excelsa*). *Water Science and Technology*, 77(6), 1612–1621. <https://doi.org/10.2166/wst.2018.038>
- Gomes, I. S., & De Oliveira Caminha, I. (2014). Guia para estudos de revisão sistemática: uma opção metodológica para as Ciências do Movimento Humano. *Movimento*, 20(1), 395–411. <https://doi.org/10.22456/1982-8918.41542>
- Hassan, M. M., & Carr, C. M. (2018). A critical review on recent advancements of the removal of reactive dyes from dyehouse effluent by ion-exchange adsorbents. *Chemosphere*, 209, 201–219. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2018.06.043>
- Hassan, N. S., Jalil, A. A., Khusnun, N. F., Bahari, M. B., & Kamaruddin, M. J. (2024). Recent advances in lignocellulosic biomass-derived biochar-based photocatalyst for wastewater remediation. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 163, 105670. <https://doi.org/10.1016/j.jtice.2024.105670>
- Ibrahim, H. A. (2023). Pyrolysis in the chemical industry and its major industrial applications. *Innovation in Science and Technology*, 2(2), 1–11. <https://doi.org/10.55494/ist.2023.22.1>
- Isenmann, A. F. (2013). *Corantes* (1a ed.). Editora própria.
- Katiyar, R., Chen, C. W., Singhanian, R. R., Tsai, M. L., Saratale, G. D., Pandey, A., & Patel, A. K. (2022). Efficient remediation of antibiotic pollutants from the environment through innovative biochar: current updates and prospects. *Bioengineered*, 13(6), 14730–14748. <https://doi.org/10.1080/21655979.2022.2085987>
- Kluczkovski, A. M. (2006). *Castanha-do-Brasil da floresta tropical ao consumidor* (Vol. 1, 176 p.). Rditograf.
- Lima Duarte, R. V., Rodrigues, L. A., de Moraes, N. P., & da Costa Couceiro, P. R. (2021). Mesocarpo da castanha-do-Brasil (*Bertholletia excelsa*) como fonte de biomassa para produção de carvão ativado: correlação entre tratamento térmico e desempenho de adsorção. *Biointerface Research in Applied Chemistry*, 12(4), 4584–4596. <https://doi.org/10.33263/BRIAC124.45844596>

- Lima, D. R., Lima, E. C., Umpierres, C. S., Thue, P. S., El-Chaghaby, G. A., Da Silva, R. S., & Biron, C. (2019). Removal of amoxicillin from simulated hospital effluents by adsorption using activated carbons prepared from capsules of cashew of Pará. *Environmental Science and Pollution Research*, 26(16), 16396–16408. <https://doi.org/10.1007/s11356-019-04949-1>
- Lin, H., Liu, Y., Chang, Z., Yan, S., Liu, S., & Han, S. (2020). A new method of synthesizing hemicellulose-derived porous activated carbon for high-performance supercapacitors. *Microporous and Mesoporous Materials*, 292, 109707. <https://doi.org/10.1016/j.micromeso.2019.109707>
- Melo, I. S., Souza, T. N. V., Carvalho, S. M. L., & Vieira, M. G. A. (2018). Adsorção de corante azul básico 26 por material carbonáceo sintetizado de resíduo agroindustrial. In *Anais do COBEQ 2018*. Editora Blucher. <https://doi.org/10.5151/cobeq2018-pt.0103>
- Miljanić, J., Krstović, S., Perović, L., Kojić, J., Travičić, V., & Bajac, B. (2024). Assessment of the nutritional benefits and aflatoxin B1 adsorption properties of blackberry seed cold-pressed oil by-product. *Foods*, 13(19), 3140. <https://doi.org/10.3390/foods13193140>
- Nobre, J. R. C., Queiroz, L. S., Castro, J. P., Pego, M. F. F., Huguen, L. N., Da Costa, C. E. F., & Bianchi, M. L. (2023). Potencial de resíduos agroindustriais da região amazônica para produção de carvão ativado. *Heliyon*, 9(7), e17152. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e17152>
- Patel, V. H., Gani, A., & Paul, A. (2025). Método verde de síntese em etapa única de carvão ativado a partir de resíduos de biomassa lignocelulósica de Jacaranda mimosifolia para purificação sustentável de água. *Nature Environment & Pollution Technology*, 24(3). <https://doi.org/10.46488/NEPT.2025.v24i03.009>
- Petrenchen, G. P., Arduin, M., & Ambrósio, J. D. (2019). Morphological characterization of Brazil nut tree (*Bertholletia excelsa*) fruit pericarp. *Journal of Renewable Materials*, 7(7), 678–687. <https://doi.org/10.32604/jrm.2019.07047>
- Piquet, A. B. M., & Martelli, M. C. (2022). Bioadsorventes produzidos a partir de resíduos orgânicos para remoção de corantes: uma revisão. *Res. Soc. Dev.*, 11(3), e27311326506. <https://doi.org/10.33448/rsd-v11i3.26506>
- Qiu, B., Shao, Q., Shi, J., Yang, C., & Chu, H. (2022). Application of biochar for the adsorption of organic pollutants from wastewater: modification strategies, mechanisms and challenges. *Separation and Purification Technology*, 300, 121925. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2022.121925>
- Rubem, É. G., Vinhote, M. L. A., & Kluczkovski, A. M. (2025). O processo de extração e comercialização da castanha-do-Brasil (*Bertholletia excelsa*) no município de Amaturá–Amazonas. *Caderno Pedagógico*, 22(5), e15075. <https://doi.org/10.54033/cadpedv22n5-317>
- Risemberg, R. I. C., Wakin, M. & Shitsuka, R. (2026). A importância da metodologia científica no desenvolvimento de artigos científicos. *Revista E-Acadêmica*. 7(1), e0171675. <https://doi.org/10.52076/eacadv7i1.675>. <https://eacademica.org/eacademica/article/view/675>.
- Santos, L. O., Oliveira, D. L., Nascimento, E. D., de Alencar, W. S., Siqueira, J. L. P., Vieira, D. A., & de Oliveira Carvalho, F. A. (2022). Low-cost activated carbon from the husk of Pará nuts for dye removal from aqueous solution: kinetic and thermodynamic mechanism study. *Scientia Plena*, 18(9). <https://doi.org/10.14808/sci.plena.2022.094201>.
- Shah, J., Sun, H., Qiao, Z., Sharif, T., & Gul, M. (2024). Enhanced degradation of methylene blue dye using hydrothermally synthesized nickel-doped strontium oxide catalysts. *Brazilian Journal of Science*, 3(12), 13–27. <https://doi.org/10.14295/bjs.v3i12.588>
- Shamsollahi, Z., & Partovinia, A. (2019). Recent advances on pollutants removal by rice husk as a bio-based adsorbent: a critical review. *Journal of Environmental Management*, 246, 314–323. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.05.145>
- Shenoy, A., Bansal, V., & Shukla, B. K. (2022). Treatability of effluent from small scale dye shop using water hyacinth. *Materials Today: Proceedings*. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.03.031>
- Silva, J. P. S., Silva, M. G. C., Vieira, M. G. A., & De Carvalho, S. M. L. (2025). Valorization of agro-industrial waste (Brazil nut shells) for porous carbon synthesis: single and simultaneous adsorption of ibuprofen and diclofenac from aqueous solutions. *Environmental Science and Pollution Research*, 32(47), 27015–27036. <https://doi.org/10.1007/s11356-025-37115-7>
- Silva, M. C. F., Schnorr, C., Lütke, S. F., Knani, S., Nascimento, V. X., Lima, É. C., & Dotto, G. L. (2022). Carvões ativados com KOH a partir da casca da castanha-do-pará: preparação, caracterização e sua aplicação na adsorção de fenol. *Chemical Engineering Research and Design*, 187, 387–396. <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2022.09.002>
- Silva, J. P. S., Silva, M. G. C., Vieira, M. G. A., & De Carvalho, S. M. L. (2025). Valorization of agro-industrial waste (Brazil nut shells) for porous carbon synthesis: single and simultaneous adsorption of ibuprofen and diclofenac from aqueous solutions. *Environmental Science and Pollution Research*, 32(47), 27015–27036. <https://doi.org/10.1007/s11356-025-37115-7>
- Snyder, H. (2019). Literature review as a research methodology: An overview and guidelines. *Journal of Business Research, Elsevier*. 104(C), 333-9. Doi: 10.1016/j.jbusres.2019.07.039.
- Sousa, M. L. R., De Albuquerque, I. R., De Azevedo Ruffo, R., Prado, C. C., Prado, A. B. C., De Freitas, F. A., & Kluczkovski, A. M. (2025). Prospecção de fibras da casca de castanha-do-Brasil como insumo para embalagens de alimentos. *Observatório de la Economía Latinoamericana*, 23(8), e11086. <https://doi.org/10.55905/oe1v23n8-106>
- Souza, C. D. R., & Da Silva, K. de C. (2021). Potencial energético dos resíduos da castanha do Brasil (*Bertholletia excelsa* HBK) para produção de carvão ativado. *Res. Soc. Dev.*, 10(2), e53310212698. <https://doi.org/10.33448/rsd-v10i2.12698>
- Souza, T. N. V., Carvalho, S. M. L., Vieira, M. G. A., Da Silva, M. G. C., & Beppu, M. M. (2019). Carvões ativados com H3PO4 produzidos a partir de caroços de açaí e cascas de castanha-do-pará: remoção do corante azul básico 26 de soluções aquosas por adsorção. *Environmental Science and Pollution Research*, 26(28), 28533–28547. <https://doi.org/10.1007/s11356-019-05197-z>

Souza, T. F. de, & Ferreira, G. M. D. (2024). Biochars as adsorbents of pesticides: laboratory-scale performances and real-world contexts, challenges, and prospects. *ACS ES&T Water*, 4(10), 4264–4282. <https://doi.org/10.1021/acsestwater.4c00399>

Thomaz, K. T. C., Queiroz, L. S., Do Carmo, F. F. K., Zamian, J. R., Do Nascimento, L. A. S., Rocha Filho, G. N., & Da Costa, C. E. (2023). Remoção de íons de Fe e Mn da água subterrânea usando carvão ativado obtido de resíduos do cultivo de castanha-do-pará e andiroba na região amazônica. *Sustainable Materials and Technologies*, 38, e00737. <https://doi.org/10.1016/j.susmat.2023.e00737>

Valverde, A., Cabrera-Codony, A., Calvo-Schwarzwalder, M., & Myers, T. G. (2024). Investigating the impact of adsorbent particle size on column adsorption kinetics through a mathematical model. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 218, 124724. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2023.124724>

Vázquez-Durán, A., Nava-Ramírez, M. de J., Téllez-Isaías, G., & Méndez-Albores, A. (2022). Removal of aflatoxins using agro-waste-based materials and current characterization techniques used for biosorption assessment. *Frontiers in Veterinary Science*, 9, 897302. <https://doi.org/10.3389/fvets.2022.897302>

Yang, L., Wang, J., Lv, H., Ji, X. M., Liu, J. M., & Wang, S. (2022). Hollow-structured microporous organic networks adsorbents enabled specific and sensitive identification and determination of aflatoxins. *Toxins*, 14(2), 137. <https://doi.org/10.3390/toxins14020137>

Zhang, L., Yang, W., Chen, Y., & Yang, L. (2025). Removal of tetracycline from water by biochar: mechanisms, challenges, and future perspectives. *Water*, 17(13), 1960. <https://doi.org/10.3390/w17131960>

Zheng, C., Kang, K., Xie, Y., Yang, X., Lan, L., Song, H., & Bai, S. (2024). Dynamic adsorption behavior of 1,1,1,2-tetrafluoroethane (R134a) on activated carbon beds under different humidity and moisture levels. *Separation and Purification Technology*, 329, 124851. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2023.124851>

Zhou, J., Yang, P., Kots, P. A., Cohen, M., Chen, Y., Quinn, C. M., & Vlachos, D. G. (2023). Tuning the reactivity of carbon surfaces with oxygen-containing functional groups. *Nature Communications*, 14(1), 2293. <https://doi.org/10.1038/s41467-023-37962-3>