

BIOCARVÕES PRODUZIDOS A PARTIR DE RESÍDUOS AGROINDUSTRIAIS DO ESTADO DE SERGIPE: UMA REVISÃO DA LITERATURA

I. N. S. Silva^{1*}, T. P. Santos¹, C. H. Andrade¹, Lima, R. V. J.¹, G. F. Silva^{1,3}, R. R. Souza^{1,2}, R. P. S. Oliveira³, L. P. S. Rosa^{1,2}

^{1*} Programa de Pós-graduação em Engenharia Química - PEQ, Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão, Brasil (isaseq2016@gmail.com)

² Departamento de Engenharia Química-DEQ, Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão, Brasil

³ Departamento de Engenharia de Petróleo-DEPET, Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão, Brasil

Este trabalho tem como objetivo realizar uma revisão da literatura sobre resíduos agroindustriais do estado de Sergipe (jaca e coco) utilizados na produção de biocarvões. Foram consultadas as bases ScienceDirect, Web of Science e Google Acadêmico. Os resultados indicam que o biocarvão de jaca apresenta eficiência na remoção de metais pesados, nutrientes e corantes, enquanto o de casca de coco se destaca no tratamento de água produzida e captura de H₂S. Essas biomassas mostram-se promissoras e sustentáveis.

Palavras-chave: biocarvões; coco (*Cocos nucifera* L.); jaca (*Artocarpus heterophyllus*).

INTRODUÇÃO

A adsorção é um fenômeno espontâneo que leva à concentração de espécies químicas (moléculas ou íons) presentes em uma fase fluida sobre a superfície de um sólido. A natureza das interações molécula-sólido pode ser de natureza física (interações de van der Waals) ou química, através de ligações covalentes (Ruthven, 1984). Para Figueroa, *et al.* (2008) o grande desafio no emprego da adsorção é a identificação de materiais adsorventes e economicamente viáveis. Esses materiais devem apresentar elevada seletividade para a molécula do dióxido de carbono, grande capacidade de retenção, fácil regeneração e estabilidade ao serem submetidos a variações de temperatura e pressão.

Sob esse prisma, os materiais porosos de adsorção de alto desempenho têm atraído cada vez mais atenção de pesquisadores, eles incluem: carvão ativado, zeólita, peneiras moleculares, óxidos metálicos e materiais de estrutura metal-orgânica. Entretanto, a busca por novos materiais ou modificações na estrutura porosa e/ou química superficial dos adsorventes comerciais ainda permanece uma tarefa desafiadora, pois há uma necessidade cada vez maior de materiais mais competitivos e eficientes. Entre os materiais adsorventes, o carvão ativado é um adsorvente carbonáceo obtido a partir da pirólise de materiais lignocelulósicos de alta porosidade, capaz de adsorver seletivamente gases, líquidos, íons metálicos ou outros contaminantes no interior de seus poros (Marsh *et al.*, 2006).

Para se obter o biocarvão é necessário submeter a matéria prima a um processo de pirólise, a qual é uma técnica termoquímica que realiza a decomposição de materiais orgânicos mediante ausência parcial ou total de oxigênio, e comumente atingindo temperaturas na faixa de 300°C a 900°C (Hassan *et al.*, 2021). O biocarvão tem como característica a versatilidade, devido a possibilidade de utilização de diversas matérias primas (Yaashikaa *et al.*, 2022). Para utilização em processos específicos como a purificação de gases e tratamento de efluentes complexos, como a água produzida (AP), (Yao *et al.*, 2022), o biocarvão passa por processos de ativação (química ou física) e modificações superficiais, aumentando sua capacidade adsorviva.

A viabilidade econômica e ecológica desse processo reside no uso de resíduos agroindustriais lignocelulósicos (ricos em lignina, hemicelulose e celulose), os quais favorecem a formação de poros e alta estabilidade térmica ao material final (Zhu & Shen, 2021). Na região do nordeste brasileiro, principalmente no estado de Sergipe, há a produção massiva desses resíduos (Santos *et al.*, 2023), ao passo que o nordeste concentra atividades industriais e de exploração de petróleo e gás que enfrentam desafios no manejo de efluentes e emissões (Lima & Albuquerque, 2022; Oliveira *et al.*, 2024).

Diante do exposto, este trabalho tem como objetivo realizar uma revisão da literatura acerca de biocarvões produzidos a partir de resíduos agroindustriais abundantes no estado de Sergipe, incluindo coco (*Cocos nucifera* L.) e jaca (*Artocarpus heterophyllus* Lam.).

MATERIAL E MÉTODOS

Neste trabalho, foi realizada uma breve revisão integrativa da literatura, em que se buscou, em artigos, explorar biocarvões produzidos por resíduos agroindustriais sergipanos (jaca e coco), identificando modos de síntese, propriedades físico-química, morfológicas e também aplicações práticas.

Desse modo, para a apresentação dos resultados, foram seguidos alguns critérios de inclusão e exclusão, tais como: limitação a um período de 5 anos de publicação nas base de dados e fontes eletrônicas do ScienceDirect, Web of Science, Google Acadêmico; uso das *palavras-chave e conectivos: jackfruit, biochar, coconut biochar, coconut biocarbon., hydrogen sulfide removal, desulfurization, gas sweetening, H₂S treatment, Oil and greases, produced water*, sendo a busca realizada com uma ou mais palavras associadas, utilizando operadores booleanos *AND* e *OR* em documentos tanto em português quanto em inglês. Cabe ressaltar que as buscas referentes aos biocarvões de jaca abrangeram diferentes aplicações descritas na literatura, enquanto, para o biocarvão de coco, o foco será direcionado ao tratamento de água produzida e à captura de H₂S. Essa delimitação se justifica pelo fato de o coco ser um precursor amplamente estudado e consolidado para a produção de biocarvão.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Biocarvão de jaca

Com o objetivo de recuperar nutrientes em uma forma que possa ser usado como corretivo de solo, Nayak *et al.* (2021) investigaram a aplicação de um novo nanocompósito biocompatível (BC-P@MNP) para remoção e recuperação de nutrientes presentes em águas residuais municipais a partir de processos sustentáveis. O material foi sintetizado pela imobilização de nanopartículas de magnetita biogênica em carvão ativado a partir da casca de jaca, utilizando irradiação por micro-ondas. As análises estruturais confirmaram propriedades favoráveis à adsorção, como mesoporosidade, cristalinidade, magnetismo, funcionalidade e dimensão nanométrica. Em condições otimizadas, o adsorvente apresentou capacidades máximas de adsorção de 7,94 mg/g para fosfato e 5,26 mg/g para nitrato. Os resultados termodinâmicos indicaram um processo espontâneo e exotérmico, além de elevada seletividade, capacidade de regeneração e facilidade de separação magnética do material final. A alta recuperação de nutrientes e a biocompatibilidade garantiram o potencial do adsorvente para ser usado como corretivo de solo. Os resultados evidenciam o potencial do BC-P@MNP como uma alternativa

sustentável e econômica para remoção e recuperação de nutrientes em sistemas de tratamento de água.

Nesta mesma direção, Venu e Alappat *et al.* (2024) investigaram a síntese e a aplicação de um biocarvão enriquecido com ferro (Fe-JP), produzido a partir de cascas de jaca por meio de pirólise em forno de micro-ondas para avaliar a eficiência do mesmo como catalisador heterogêneo do processo Fenton na degradação dos corantes azul de metileno e vermelho ácido 1 (AR1) em meio aquoso. O ferro foi incorporado ao material precursor antes da pirólise com auxílio de sonicação. Nas condições utilizadas foram obtidas eficiências máximas de remoção de corantes de 96,5% para MB e 98% para AR1 após 120 minutos de reação. A remoção de carbono orgânico total (TOC) atingiu 68,5% e 75%, respectivamente, indicando significativa mineralização dos compostos orgânicos. Dessa forma, o Fe-JP apresenta elevado potencial para aplicação prática no tratamento de efluentes contendo corantes, combinando alta eficiência de degradação, estabilidade operacional e viabilidade econômica.

Khadem *et al.* (2022) estudaram o potencial de utilização de resíduos de sementes de jaca como biorremediadores na remoção de metais pesados tóxicos presentes em águas contaminadas. Considerando a grande produção de jaca em países como a Índia e regiões do Extremo Oriente, a pesquisa buscou agregar valor a esse resíduo agrícola por meio da produção de biocarvão ativado. Os resultados demonstraram elevada capacidade de adsorção, alcançando valores médios para Fe(III), Pb(II), Cu(II), Cd(II) e Mn(VII) em um processo dito exotérmico. Os autores concluem que o biocarvão produzido a partir de resíduos de sementes de jaca apresenta uma alternativa simples, economicamente viável e eficiente para a remoção de metais pesados de águas contaminadas, destacando-se como uma solução sustentável em comparação com diversos outros resíduos de biomassa descritos na literatura.

Também nesta sara, o estudo de Ton-That *et al.* (2024) investigou os mecanismos de adsorção de íons de chumbo [Pb(II)] utilizando biocarvão produzido a partir da casca de jaca em solução aquosa, visando ampliar a compreensão dos processos envolvidos no tratamento de águas residuais contaminadas por metais pesados. Para isso, foram empregados modelos teóricos de adsorção e técnicas avançadas de caracterização, sendo melhor descrito pelo modelo isotérmico de Redlich-Peterson e pelo modelo cinético de difusão intrapartícula. Além disso, verificou-se que a ativação hidrotérmica do biocarvão aumentou significativamente sua área superficial, favorecendo a adsorção do contaminante. A capacidade máxima de adsorção alcançada foi de 83,86 mg g⁻¹ para Pb(II), valor superior ao observado em biocarvões produzidos a partir de outras partes do

fruto, como sementes e caules, bem como em outros resíduos agrícolas reportados na literatura.

Ton-That *et al.* (2023) investigaram a cinética de adsorção do corante azul de metileno em soluções aquosas utilizando biocarvão produzido a partir da casca de jaca. O estudo avaliou diferentes modelos cinéticos de adsorção, incluindo pseudo-primeira ordem (PFO), pseudo-segunda ordem (PSO), difusão intrapartícula e Elovich, com o objetivo de identificar o modelo mais adequado para aplicações em escala industrial, sendo que o melhor ajuste foi o de Elovich. Além disso, o biocarvão mostrou-se um adsorvente sustentável e eficiente para a remoção de corantes, destacando seu potencial para aplicações no tratamento da poluição ambiental.

Phumivanichakit *et al.* (2025) também estudaram o potencial da casca de jaca como adsorvente para a remoção do corante azul de metileno de águas residuais. A maior capacidade de adsorção observada foi alcançada em apenas 5 minutos, indicando uma cinética rápida e elevada afinidade pelo corante. Os modelos de Freundlich e Temkin indicaram que a adsorção ocorreu em múltiplas camadas sobre uma superfície heterogênea.

Já Selvaraj *et al.* (2026) desenvolveram um biocarvão magnético (MBC) a partir de folhas de jaca por meio de um método hidrotérmico, visando a valorização de resíduos agrícolas e sua aplicação na remediação ambiental. O material sintetizado foi caracterizado quanto às suas propriedades físico-químicas, apresentando estrutura mesoporosa, baixa área superficial específica e nanopartículas de óxido de ferro homogeneamente distribuídas na

matriz do biocarvão. A elevada magnetização de saturação possibilitou a fácil separação e recuperação do catalisador após o uso. O desempenho catalítico do MBC foi avaliado na degradação do corante Vermelho Congo por meio de um processo do tipo Fenton, alcançando alta eficiência de degradação. A cinética do processo seguiu um modelo de segunda ordem. Além disso, o material manteve aproximadamente 70% da eficiência de remoção após cinco ciclos de reutilização, evidenciando boa estabilidade estrutural e potencial de reaproveitamento. Os resultados demonstram que o biocarvão magnético obtido de folhas de jaca constitui uma alternativa sustentável, eficiente e facilmente recuperável para o tratamento de águas residuais contaminadas por corantes.

Desse modo, analisando os trabalhos apresentados anteriormente, percebe-se que tanto a casca quanto a semente e a folha de jaca, abundantes resíduos agrícola, representam matéria-prima promissora para a produção de biocarvão de baixo custo, sustentável e ambientalmente sustentável, com elevado potencial para aplicação na remoção de diversos componentes em águas residuais tanto em escala comunitária quanto industrial. O estudo contribui para o avanço do conhecimento sobre os mecanismos de adsorção de resíduos de biomassa e reforça o potencial de aproveitamento de subprodutos agrícolas no controle da poluição hídrica. Assim, todos os parâmetros obtidos das referências supracitadas encontram-se sintetizados na Tabela 1.

Tabela 1: Parâmetros obtidos acerca dos trabalhos sobre cascas, semente e folhas de jaca

Origem do adsorvente	Adsorbato	T (°C)	Ativação	Área superficial	Capacidade de adsorção	Autor (Ano)
Casca de jaca	Fosfatos + Nitratos	25; 35 e 45°C	H ₂ SO ₄ + Pirólise	498,4 m ² /g SBET; 285, 4 m ² /g BET	Fosfatos: 7,94 mg/g; Nitratos: 5,26 mg/g	Nayak <i>et al</i> (2021)
Semente de jaca	Fe (III), Cd (II), Cu (II), Pb (II) e Mn (VII)	25°C	Carbonização (500°C)	3,64 m ² /g BET	Fe (III): 76,4 mg/g; Cd (II): 79,8 mg/g; Cu (II): 79,9 mg/g; Pb (II): 97,9 mg/g e Mn (VII): 79,8 mg/g	Khadem <i>et al</i> (2022)
Casca de jaca	Azul de metileno	N/I	Aquecimento a vácuo 500°C + Etanol	12,67 m ² /g BET	12,53 mg/g; 60,5% de eficiência	Ton-That <i>et al</i> (2023)
Casca de jaca	Pb (II)	25°C	Pirólise e ativação física por hidrotérmico	95,85 m ² /g BET	83,86 mg/g para Pb (II)	Ton-That <i>et al</i> (2024)
Casca de jaca + Fe	Corantes azul de metileno (MB) e vermelho ácido 2 (AR1) em meio aquoso		Pirólise em forno de micro-ondas	493,83 m ² /g BET	Remoção de corantes de 96,5% para MB e 98% para AR1 após 120 minutos de reação	Venu e Alappat <i>et al</i> (2024)
Casca de jaca	Azul de metileno		Aquecimento em estufa	4,006 m ² /g	36,48 mg/g	Phumivanichakit <i>et al</i> (2025)
Folhas de jaca	Corante vermelho congo		Carbonização hidrotérmica	6,59 m ² /g	Eficiência de degradação de 80,01%	Selvaraj <i>et al</i> (2026)

Biocarvão de casca de coco para tratamento de água produzida

Okonkwo *et al* (2022) focaram na produção do biocarvão a partir de uma mistura de casca de coco e zeólitas. As condições de pirólise e ativação não foram especificadas e o *blend* de casca de coco e zeólita se mostrou eficaz, com a capacidade de adsorção máxima experimental de 148,87 mg/g para o carbono orgânico total (COT) e 1,76 mg/g para os sólidos suspensos totais (SST), com dosagem de 0,99 g do adsorvente, tempo de contato de 180 minutos e temperatura de 40°C.

Emmanuel & Giegbefumwen (2022) focaram no tratamento de AP em operações de petróleo e gás da Nigéria. As condições de pirólise foram de 600°C por 2 horas e a ativação foi com cloreto de zinco (ZnCl₂). Após o tratamento, o biocarvão de casca de coco ativado com ZnCl₂ se mostrou eficaz, com a redução de 81,25% do teor de óleos e graxas (TOG), 94,17% de turbidez, 33,33% de SST, e 52,24% da demanda química de oxigênio (DQO). Apesar das melhorias,

foi detectado o aumento da salinidade devido a utilização do ZnCl₂ como agente ativante.

Oyedoh & Igbokwe (2025) desenvolveram e avaliaram o *blend* de biocarvão de casca de coco e zeólita para remoção de hidrocarbonetos de AP de petróleo. As condições de pirólise foram de 700°C por 2 horas, a ativação foi com ácido fosfórico (H₃PO₄) e a modificação com hidróxido de sódio (NaOH). Após o tratamento, esse *blend* ativado com H₃PO₄ e modificado com NaOH se mostrou extremamente eficaz, com eficiência de remoção de 99,86% na Metodologia de Superfície de Resposta (RSM) e 99,99% no modelo de redes neurais artificiais (ANN).

Louzada *et al* (2023) investigaram a eficácia do biocarvão de casca de coco para remoção de ácidos naftênicos e TOG da AP. As condições de pirólise não foram descritas e a ativação foi feita com vapor de água e dióxido de carbono (CO₂). Após o tratamento, o biocarvão de casca de coco se mostrou eficiente, principalmente quando o pH está em valores baixos ($\approx$ 4), com capacidade máxima de adsorção de 114,77 mg/g para o ácido ciclohexano carboxílico (NA-1), 53,85 mg/g para o ácido valérico

(NA-2) e 122,53 mg/g para o ácido ciclohexano acético (NA-3).

Ogidi *et al* (2024) investigaram a remoção de cádmio (Cd), níquel (Ni) e chumbo (Pb) de AP em campos de petróleo, utilizando biocarvão de casca de coco. As condições de pirólise foram de 450°C por 90 minutos, a ativação foi com H₃PO₄ e a modificação com óxido de grafeno (OG). Após o tratamento, as eficiências de remoção foram 92,96% pro Cd, 52,23% pro Ni e 67,77% pro Pb.

Otamere & Taiwo (2026) investigaram a eficácia do biocarvão de casca de coco para a remoção de poluentes de AP de petróleo coletadas em campos onshore na região do Delta do Níger, na Nigéria. As condições de pirólise foram de 500°C por 1 hora e a ativação foi com ZnCl₂. Após o tratamento, o biocarvão de casca de coco ativado com ZnCl₂ se mostrou eficaz, com as seguintes eficiências de remoção: Salinidade (A = 83,75% e B = 73,61%), turbidez (A = 98,89% e B = 54,54%), sólidos totais dissolvidos (STD) (A = 68,85% e B = 51,32%) e SST (A e B = 100%).

Igwe *et al* (2026) investigaram o uso de biocarvão de casca de coco para tratamento de águas subterrâneas contaminadas por hidrocarbonetos e metais no Delta do Níger. Foram testadas 3 temperaturas de pirólise,

sem especificação do tempo: 500°C, 700°C e 900°C, sendo que a melhor capacidade foi a apresentada com a temperatura de 900°C e a ativação não foi descrita. Após o tratamento da AP, o biocarvão de casca de coco se mostrou eficaz, com remoção completa de o-xileno, m-xileno, p-xileno e etilbenzeno. Assim, analisando em conjunto, os trabalhos vêm demonstrando a crescente avaliação da casca de coco verde como material adsorvente para adsorção de AP, com eficiências acima de 50%, revelando a extrema eficácia do uso de biocarvões de casca de coco para o tratamento de AP.

As ativações também são muito importantes, sendo que os agentes ativantes mais utilizados foram o H₃PO₄ e o ZnCl₂, ambos apresentando eficácias significativas de redução de contaminantes, porém os efluentes tratados com ZnCl₂ tiveram a salinidade aumentada após o tratamento, devido aos íons cloretos presentes no agente ativante. Assim, o biocarvão de casca de coco é uma ótima alternativa para material adsorvente no processo de adsorção de AP de petróleo. Todas as informações sobre ativação e eficiência ou capacidade de adsorção obtidas das referências supracitadas encontram-se sintetizadas na Tabela 2.

Tabela 2: Parâmetros obtidos acerca dos trabalhos sobre casca de coco verde para tratamento da AP de petróleo

Ativação	Eficiência de adsorção	Autor
—	COT: 148,87 mg/g; SST: 1,76 mg/g	Okonkwo <i>et al</i> (2022)
ZnCl ₂	TOG: 81,25%, Turbidez: 94,17%, SST: 33,33% e DQO: 52,24%	Emmanuel & Giegbefumwen (2022)
HNO ₃	1.068.451,73 mg/g	Omoruwou. <i>et al</i> (2022)
H ₃ PO ₄ e NaOH	99,86% RSM e 99,99% ANN	Oyedoh & Igbokwe (2025)
Vapor d' água e CO ₂	C ₇ H ₁₂ O ₂ : 114,77 mg/g; C ₅ H ₁₀ O ₂ : 53,85 mg/g; e C ₈ H ₁₄ O ₂ : 122,53 mg/g	Louzada et al (2023)
H ₃ PO ₄ e OG	Cd: 92,96%; Ni: 52,23%; Pb: 67,77%	Ogidi et al (2024)
ZnCl ₂	Salinidade (83,75% A e 73,61% B), Turbidez (98,89% A e 54,54% B), SST (68,85% A e 51,32% B) e STS (100%)	Otamere & Taiwo (2026)
HCl	86,85%	Igwe et al (2026)

Biocarvão de casca de coco para captura de H₂S

Su *et al.* (2021) utilizaram a casca de coco verde como rota precursora para a produção de biocarvão. A pirólise lenta foi realizada a partir da

carbonização em forno tubular sob atmosfera de N₂, com taxa de aquecimento de 20 °C/min até 500 °C, permanecendo nesta temperatura por 60 min, seguida de resfriamento natural. O processo de ativação seguiu o mesmo protocolo térmico da

pirólise, avaliando-se três temperaturas distintas: 650 °C, 750 °C e 850 °C. Ao atingir a temperatura de patamar, inseriu-se um fluxo de CO₂ a 200 mL/min. Os experimentos de adsorção de H₂S foram conduzidos em coluna de quartzo de leito fixo (8 mm de diâmetro interno e 270 mm de comprimento), utilizando lã de quartzo como suporte leito. A mistura gasosa sintética mimetizou a composição do biogás, sendo constituída por CH₄ (60%), CO₂ (39%) e H₂S (1%). Como resultado, o adsorvente não ativado apresentou área superficial de 0,18 m².g⁻¹ e capacidade de remoção de 30,44 mg H₂S.g⁻¹. Para as amostras ativadas a 650 °C, 750 °C e 850 °C, os valores obtidos de área superficial e capacidade de adsorção foram, respectivamente: 331,86 m².g⁻¹ e 29,68 mg H₂S.g⁻¹; 604,13 m².g⁻¹ e 38,73 mg H₂S.g⁻¹; e 811,46 m².g⁻¹ e 26,67 mg H₂S.g⁻¹.

Zulkefli et al. (2022a) investigaram o uso da casca de coco na elaboração de adsorventes bimetalícos para o tratamento de gases e captura de H₂S. Uma matriz de carvão comercial com ativação não especificada foi modificada com ZnC₄H₆O₄, KOH, TiO₂, NH₃, TEOS, sob alimentação de N₂ (99,5%) + H₂S (5000 ppm) e condições de operação de 1 atm, 30°C, coluna de leito fixo com diâmetro interno de 6cm e vazão de operação de 5,5 L/min, foram reportadas capacidades de adsorção entre 0,42 e 1,17 mg H₂S.g⁻¹ e áreas superficiais de 861,61 a 1006,38 m².g⁻¹. Em desdobramentos subsequentes, o carvão ativado foi modificado via impregnação em solução utilizando os sistemas precursores ZnAc₂ / ZNO, ZnAc₂ /TiO₂, ZnAc₂ /KOH. As capacidades máximas de adsorção de H₂S obtidas foram de 1,67 mg/g (a 50 °C), 1,84 mg/g (a 100 °C) e 1,96 mg/g (a 150 °C), com a área superficial específica variando entre 847,1 e 902,25 m².g⁻¹. Os ensaios foram conduzidos em uma coluna de leito fixo (10 cm de altura e 0,5 cm de diâmetro interno), sob vazão de 5,5 L/min, pressão de 1,5 bar e temperatura de 30 °C, empregando uma mistura gasosa de N₂ (99,5%) e H₂S (5000 ppm). A eficiência do processo e as propriedades dos materiais foram avaliadas por meio de análises texturais e físico-químicas, tais como BET/BJH, TGA e FTIR (Zulkefli et al., 2022b). Adicionalmente, os autores avaliaram uma rota de modificação baseada em uma mistura química dupla do tipo núcleo-casca (*core-shell*) com os mesmos agentes modificadores ZnAc₂/ZNO, ZnAc₂/KOH e, ZnAc₂/NaOH, operando em coluna de leito fixo com 0,06 m de diâmetro interno, vazão de 5,5 L/min, 1 bar e 30 °C. Essa abordagem resultou em uma capacidade de adsorção de 2,01 mg H₂S.g⁻¹ e área superficial de 900,48 m².g⁻¹ (Zulkefli et al., 2022c). Por fim, Zulkefli et al. (2023) mantiveram as mesmas condições

operacionais de Zulkefli et al., 2022a, contudo alteraram a composição do gás de alimentação para N₂ (49,95%) + CO₂ (49,95%) + H₂S (5000 ppm), avaliando as modificações com ZnAc₂/ZNO, ZnAc₂/KOH e, ZnAc₂/NaOH Nessa configuração, as capacidades de adsorção situaram-se na faixa de 0,92 a 1,80 mg H₂S.g⁻¹, com área superficial de 659 m².g⁻¹ (método BET).

Li et al. (2023) desenvolveram um biocarvão de casca de coco dopado com cobre, modificado com diferentes tipos e concentrações de espécies alcalinas, visando à retirada de H₂S de gases de alto-forno. A atmosfera reacional continha concentrações de 17–24 vol% de CO, 0,06–0,4 vol% de O₂, 20–40% de H₂S e traços de H₂O, N₂, COS e SO₂ (sem composições nominais informadas), operando em sistema de batelada. A incorporação de K₂CO₃ a 120 °C elevou a capacidade de remoção de enxofre de 242,1 mg/g (adsorvente in natura) para 373,4 mg/g. A seletividade ao enxofre elementar foi significativamente prolongada de 0 para 750 minutos. Além disso, os ensaios de regeneração do adsorvente demonstraram a manutenção da eficiência cíclica acima de 90%.

Saleh et al. (2024) empregaram carvão ativado comercial derivado da casca de coco verde para a síntese de um carvão xerogel, a partir dos reagentes Alginato de Sódio (AS), Carbonato de cálcio (CaCO₃) e Glutacono Delta Lactona (GDL) obtido por meio de secagem evaporativa. Os ensaios de adsorção foram executados em coluna de leito fixo (dimensões não especificadas) sob um fluxo de gás sintético N₂ e 25 ppm mol de H₂S fixado em 150 L/h. Avaliou-se o efeito da massa do adsorvente (5 a 10 g) sob temperatura constante de 40 °C, bem como o efeito da temperatura (40 a 60 °C) fixando-se a massa em 10 g. Os dados experimentais de quebra (breakthrough) foram ajustados aos modelos de equilíbrio de Thomas, Yoon-Nelson e Adams-Bohart, além dos modelos cinéticos de pseudo-primeira e pseudo-segunda ordem. O modelo de Thomas previu uma capacidade máxima de retenção de H₂S entre 208,99 mg/g (5 g a 40 °C) e 556,49 mg/g (10 g a 40 °C), com coeficientes de determinação (R²) situados entre 0,9225 e 0,9697. O ajuste satisfatório a múltiplos modelos sugeriu que o mecanismo de adsorção é controlado por efeitos combinados de fisissorção e quimissorção.

Por fim, Toan, Vien e Ong (2026) avaliaram a eficiência de remoção de H₂S utilizando um sistema composto por biocarvão de casca de coco verde (CA) e óxido de ferro (OF). Os experimentos foram conduzidos em uma coluna cilíndrica de 0,06 m de diâmetro interno, investigando-se os efeitos da

dosagem do adsorvente (4 a 8 g), tempo de contato (5 a 480 min), vazão do gás (300 a 700 mL/min) e a proporção mássica da mistura CA:OF (100:0 a 0:100). A concentração inicial de H_2S foi de 70 ppm em ar. Foram mantidos fixos a vazão de 400 mL/min e o tempo de contato de 60 min para as análises comparativas básicas. A máxima eficiência de adsorção foi identificada sob vazão de 500 mL/min, tempo de 60 min, concentração de 70 ppm e proporção ideal de mistura CA:OF de 70:30. O modelo de Thomas descreveu com robustez o desempenho superior do componente carbonoso ($k_{\text{Th}} = 0,1513 \text{ L.mg}^{-1}.\text{min}^{-1}$; $q_0 = 13,08 \text{ mg H}_2\text{S.g}^{-1}$, ao passo que o modelo de Adams-Bohart evidenciou a elevada capacidade de adsorção inicial do OF. O estudo concluiu que o CA desempenha um papel dominante no sistema devido à sua elevada área superficial e porosidade, enquanto o OF atua como agente crucial para a redução do volume de leito e viabilidade econômica em sistemas com restrição de espaço vertical ou volumétrico.

A análise comparativa dos trabalhos revisados mostra uma grande variação nas capacidades de adsorção de H_2S . Enquanto os trabalhos de Zulkefli *et al.* e Toan *et al.* (2026) reportaram desempenhos situados nas faixas de 0,42 a 2,01 $\text{mg H}_2\text{S.g}^{-1}$ e 13,08 $\text{mg H}_2\text{S.g}^{-1}$, respectivamente, os estudos de Li *et al.* (2023) e Saleh *et al.* (2024) alcançaram capacidades de saturação superiores a 300 $\text{mg H}_2\text{S.g}^{-1}$. Essa disparidade não pode ser atribuída exclusivamente à área superficial específica. Nota-se que os sistemas de Zulkefli operam sob

condições em que predomina a fisissorção ou uma reação química limitada aos sítios de Zn. Em contrapartida, Li *et al.* promoveram uma severa oxidação do H_2S a enxofre elementar ao induzir elevada alcalinidade K_2CO_3 associada à alta temperatura (120 °C). Já o valor expressivo de reportado por Saleh *et al.* decorre do uso de uma concentração inicial extremamente baixa (25 ppm), condição que tende a distorcer matematicamente as previsões do modelo de Thomas caso a zona de transferência de massa não atinja a saturação real do leito. Adicionalmente, a composição da corrente de alimentação estabelece um efeito competitivo crucial. A inserção de misturas multicomponentes intensifica a competição pelos sítios ativos, reduzindo a capacidade adsorptiva global. A umidade pode atuar de forma ambígua: se em excesso obstrui os microporos por condensação capilar, em níveis baixos fomenta a película líquida necessária para a dissociação do H_2S em meios alcalinos. Finalmente, constata-se uma dependência generalizada de modelos macroscópicos baseados em soluções analíticas simplificadas (como Thomas e Adams-Bohart). Portanto, é essencial o aprofundamento dessas investigações por meio de abordagens fenomenológicas e de modelagem difusão intraparticular. Todos os parâmetros operacionais das referências supracitadas encontram-se sintetizados na Tabela 3.

Tabela 3: Parâmetros obtidos acerca dos trabalhos sobre casca de coco verde para retirada de H₂S

Ativação e Modificação	Gás Sintético	Tipo de Coluna (dint x h)	Parâmetros operacionais	C ₀ e C _F de H ₂ S (ppm)	Área Superficial (m ² /g)	Capacidade de remoção (mg/g)	Referência
CO ₂	CH ₄ + CO ₂ + H ₂ S	Leito Fixo (0,8 x 27 cm)	-	C ₀ = 10.000	331,86 - 811,46	26,67 - 38,73	Su et al, 2021
ZnC ₄ H ₆ O ₄ , KOH, TiO ₂ , NH ₃ , TEOS	N ₂ + H ₂ S	Leito Fixo (dint = 6 cm)	30°C, 1 atm e 5,5 L/min	C ₀ = 5000	861,61 - 1006,38	0,42 - 1,17	Zulkefli et al, 2022a
ZnAc ₂ / ZNO, TiO ₂ , KOH	N ₂ + H ₂ S	Leito fixo (0,5 X 10 cm)	30 °C, 1,5 bar e 5,5 L/min	C ₀ = 5000 e C _F = 5	847,1 - 902,25	1,67 - 1,96	Zulkefli et al, 2022b
ZnAc ₂ / ZNO, KOH, NaOH	N ₂ + H ₂ S	Leito Fixo (dint = 6 cm)	30°C, 1 bar e 5,5 L/min	C ₀ = 1000 e C _F = 1-10	900,48	2,01	Zulkefli et al, 2022c
KOH, NAOH e ZnAc ₂ / ZnO	N ₂ + CO ₂ + H ₂ S	Leito fixo (0,5 X 10 cm)	30 °C, 1,5 bar e 5,5 L/min	C ₀ = 5000 e C _F = 5	659	0,92-1,80	Zulkefli et al, 2023
K ₂ CO ₃ e Cu (CH ₃ COO) ₂ .H ₂ O	N ₂ + H ₂ O + CO + O ₂ + H ₂ S	Batelada	-	-	830	373,4	Li et al, 2023
AS, CaCO ₃ , GDL	N ₂ + H ₂ S	Leito Fixo	40°C e 2,5 L/min	C ₀ = 25	-	208,99 - 556,49	Saleh et al, 2024
Óxido de Ferro	Ar + H ₂ S	Tubo Cilíndrico	0,4 L/min	C ₀ = 70	-	13,08	Toan; Vien; Ong, 2026

CONCLUSÃO

Este trabalho teve como objetivo realizar uma revisão da literatura sobre resíduos agroindustriais do estado de Sergipe (jaca e coco) utilizados para produção de biocarvões. A busca revelou aplicação consolidada de biocarvões a partir da casca de coco para tratamento de água produzida e captura de H₂S. Enquanto biocarvões a partir de jaca apresentam menor número de aplicações reportadas e menor volume de estudos na literatura científica. Para as duas biomassas apresentadas, observou-se que diferentes condições de síntese, como tempo de carbonização e modos de ativação (física e química), refletem nas propriedades do biocarvão, como área superficial e capacidade de adsorção. Os achados nesse estudo reforçam o potencial desses resíduos

para o desenvolvimento de materiais adsorventes de alto valor agregado e motivam trabalhos futuros, sobretudo no que diz respeito ao emprego de novas rotas que visem potencializar a pirólise dessas biomassas.

REFERÊNCIAS

- AL-ARFAJ, Muhammad; LUYBEN, William L. Comparison of Alternative Control Structures for an Ideal Two-Product Reactive Distillation Column. **Industrial & Engineering Chemistry Research**, [S.L.], v. 39, n. 9, p. 3298-3307, set. 2000. American Chemical Society (ACS).
- EMMANUEL, O. A.; GIEGBEFUMWEN, P. U. Effectiveness of coconut shell activated carbon for the treatment of produced water to meet DPR standards for disposal. **Research Journal of Chemical Sciences**, v. 12, n. 3, p. 5-14, out. 2022.

FELDER, Richard M. **Princípios elementares dos processos químicos**. 3. ed. Rio de Janeiro: Ltc, 2008. Tradução Martín Aznar.

FIGUEROA, J.D. FOUT, T., PLASYNSKI, S., MCILVRIED, H., SRIVASTAVA, R.D. Advances in CO₂ capture technology – The U.S. Department of Energy's Carbon Sequestration Program. *Int. J. of Greenhouse gas control*, 2, 9 – 20, 2008.

GUIMARÃES, D. H. P.; ARCE, P. F. C.; AGUIRRE, L. R. Experimental and prediction of physics and chemical properties of biodiesel. In: Congresso Brasileiro de Engenharia Química, 22., 2018, São Paulo. **Anais [...]**. São Paulo: Blucher, 2018. Disponível em: <https://www.proceedings.blucher.com.br/article-details/experimental-and-prediction-of-physics-and-chemical-properties-of-biodiesel-28421>. Acesso em: 02 mar. 2021.

HASSAN, M., LIU, Y., NAIDU, R., PARIKH, S. J., DU, J., QI, F., WILLETT, I. R. (2021). Influences of pyrolysis temperature on biochar properties and function as a soil amendment: A review. **Environmental Science and Pollution Research**, 28(38), 52719–52743. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-15237-3>

IGWE, C. E. *et al.* Activated Carbon Adsorbent Porosity and Loading Factor Effects on the Adsorption Efficiency of Groundwater Treatment System for Crude Oil Hydrocarbons and Solid Metals Impurities Recovery in Niger Delta Region. **International Journal of Engineering and Advanced Technology Studies**, v. 14, n. 2, p. 11-54, 2026. DOI: 10.37745/ijeats.13/vol14n21154.

LI, X. *et al.* Alkali-induced metal-based coconut shell biochar for efficient catalytic removal of H₂S at a medium–high temperature in blast furnace gas with significantly enhanced S selectivity. **Separation and Purification Technology**, v. 306, parte B, P. 122698, fev. 2023.

LIMA, E. C.; SHER, F.; KHAN, A. G. (2021). Adsorption isotherms, kinetics, and thermodynamics: An overview. **Environmental Science and Pollution Research**, 28(29), 38914–38944. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-14541-0>

LIMA, R. A., ALBUQUERQUE, S. N. (2022). Industrial development and environmental challenges in the Brazilian Northeast: A review of waste and gaseous emissions management. **Environmental Science and Pollution Research**, 29(14), 20115–20130. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-18910-3>

LOUZADA, T. C. C. New insights in the treatment of real oilfield produced water: Feasibility of adsorption process with coconut husk activated charcoal. **Journal of Water Process Engineering**, v. 54, 104026, 2023.

MACHADO, A. R. T. *et al.* Biochar in Brazil: from potential to climate asset. **Carbon Neutral Systems**, Singapura, v. 2, n. 9, mai. 2026.

OGIDI, S. *et al.* Removal of Heavy Metals from Produced Water Using Activated Carbon from Coconut Husk Enhanced with Graphene Oxide. **Journal of Engineering**

Research and Reports, v. 26, n. 5, p. 42-52, 2024. DOI: 10.9734/JERR/2024/v26i51132.

OKONKWO, C. U. *et al.* Optimizing the Effect of Coconut Shell/Zeolite Adsorbent Blend for Treatment of Oilfield Produced Water. **International Journal of Environmental Sciences & Natural Resources**, v. 29, n. 5, mar. 2022. DOI: 10.19080/IJESNR.2022.29.556275.

OLIVEIRA, T. M., SOUZA, J. E., RAMOS, F. S. (2024). Management of produced water in the oil and gas sector of Northeast Brazil: Environmental impacts and treatment technologies. **Journal of Environmental Management**, 352, 119950. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.119950>

OTAMERE, B.; TAIWO, O. A. Experimental Evaluation of some Physicochemical Properties of Produced Water from Niger Delta Treated with Activated Coconut Shell carbon. **Journal of Energy Technology and Environment**, v. 8, n. 1, p. 100-110, 2026. DOI: 10.37933/jete/8.1.2026.3465.

OYEDOH, E. A.; IGBOKWE, O. P. Evaluation of novel NaOH/activated carbon/zeolite biocomposite as an efficient adsorbent for oilfield produced water treatment. **South African Journal of Chemical Engineering**, v. 51, p. 302-314, 2025.

RUTHVEN, D. M. Principles of Adsorption and Adsorption Properties. New York: John Wiley & Sons, 1984.

SALEH, A. M. *et al.* Equilibrium and kinetic studies in adsorption of H₂S using coconut shell activated carbon xerogel: Effect of mass adsorbent and temperature. **Desalination and Water Treatment**, v. 317, p. 100149, jan. 2024.

SANTOS, I. S., SILVA, M. C., OLIVEIRA, A. M. (2023). Thermo-chemical conversion of local agro-industrial wastes in Northeast Brazil: **A circular economy approach**. **Waste Management**, 165, 12–22. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2023.04.015>

SU, L. *et al.* Comparison of Biochar Materials Derived from Coconut Husks and Various Types of Livestock Manure, and Their Potential for Use in Removal of H₂S from Biogas. **Sustainability**, Basileia, v.13, n. 11, p. 6262, jun. 2021.

SUJIMOTO, E. H. Fabrication and characterization of coconut shell activated carbon using variation chemical activation for wastewater treatment application. **Results in Chemistry**, Amsterdam, v. 4, p. 100291, jan. 2022.

SULTAN, A. S. *et al.* Performance evaluation of walnut shell as an eco-friendly adsorbent for oil wastewater treatment. **Journal of Petroleum Science and Engineering**, [s. l.], v. 210, p. 110031, mar. 2022. DOI: 10.1016/j.petrol.2021110031. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2021.110031>.

TOAN, P. V.; VIEN, T. M.; ONG, H. L. Adsorption efficiency of hydrogen sulfide using coconut shell-derived activated carbon and iron oxide composites. **Journal of Ecological Engineering**, Lublin, v. 27, n. 2, p. 451-461, jan. 2026.

YAASHIKAA, P. R., SENTHIL, P. K., VARJANI, S., SARAVANAN, A. (2022). A review on biochar production from renewable biomass and its applications in wastewater treatment. **Chemosphere**, 288, 132425. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.132425>

YAO, S., ZHANG, J., SHEN, Y., WANG, X. (2022). Application of modified biochar for the removal of gaseous and aqueous pollutants: A review. **Science of the Total Environment**, 814, 152731. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.152731>

ZULKEFLI, N. N. et al. Core Shell Nanostructure: Impregnated Activated Carbon as Adsorbent for Hydrogen Sulfide Adsorption. **Molecules**, v. 27, n. 3, p. 1145, fev. 2022a.

ZULKEFLI, N. N. et al. Effect of Bimetallic-Activated Carbon Impregnation on Adsorption–Desorption Performance for Hydrogen Sulfide (H₂S) Capture. **Materials**, v. 15, n. 15, p. 5409, ago. 2022b.

ZULKEFLI, N. N. et al. Performance and Characterization of Bi-Metal Compound on Activated Carbon for Hydrogen Sulfide Removal in Biogas. **Molecules**, v. 27, n. 24, p. 9024, dez. 2022c.

ZULKEFLI, N. N. et al. Adsorption–Desorption Behavior of Hydrogen Sulfide Capture on a Modified Activated Carbon Surface. **Materials**, v. 16, n. 1, p. 462, jan. 2023.

ZHU, X., SHEN, Y. (2021). Effects of lignocellulosic components (cellulose, hemicellulose, and lignin) on the pyrolysis characterization and biochar properties. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, 156, 105151. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2021.105151>