



TRATAMENTO DE EFLUENTE HOSPITALAR POR ADSORÇÃO UTILIZANDO CARVÃO DE OSSO IMPREGNADO COM EXTRATO DE ALHO

Leidiane Silva Vasconcelos¹, Alexandre Diório², Pablo Ricardo Sanches de Oliveira³
Maria Angelica Simões Dornellas de Barros⁴, Benício Alves de Abreu Filho⁵, Daniel Tait Vareschini⁶

¹ Mestranda no curso Pós-graduação em Engenharia Química, Campus Maringá-PR, Universidade Estadual de Maringá- UEM. pg404717@uem.br

² Doutor, Docente de Pós-graduação em Engenharia Química, Campus Maringá-PR, Universidade Estadual de Maringá- UEM. adiorio2@uem.br

³ Mestre, Doutorando do Programa de Pós-graduação em Ciência de Alimentos da Universidade Estadual de Maringá - PPC/UEM pg55603@uem.br

⁴ Doutora, Docente de Pós-graduação em Engenharia Química, Campus Maringá-PR, Universidade Estadual de Maringá- UEM. masdbarros@uem.br

⁵ Doutor, Docente do Programa de Pós-Graduação em Ciência dos Alimentos, Campus Maringá-PR, Universidade Estadual de Maringá- UEM baafilho@uem.br

⁶ Orientador, Doutor, Docente de Pós-graduação em Engenharia Química, Campus Maringá-PR, Universidade Estadual de Maringá- UEM. dtvareschini@uem.br

RESUMO

As águas residuais hospitalares são fontes de contaminação microbiana, incluindo bactérias resistentes a antibióticos. Este estudo desenvolveu um material antimicrobiano a partir de carvão de osso bovino (BBC), modificado por funcionalização com ácido nítrico (BBC-F) e/ou impregnação com alicina (BBC-A/BBC-FA), para aplicação no tratamento de efluentes hospitalares. O estudo abrange a preparação e caracterização do BBC funcionalizado, extração de alicina do alho, impregnação do adsorvente e testes microbiológicos com *E. coli* em águas residuais hospitalares sintéticas (AHS). Caracterizações por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), análise de adsorção de nitrogênio por Brunauer–Emmett–Teller (BET), Espectroscopia de Infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR), espectroscopia Raman e ponto de carga zero (pHPZC) revelaram que a ativação ácida introduziu grupos oxigenados, aumentando a desordem estrutural, elevando a reatividade superficial. A alicina reduziu a área superficial e porosidade ao bloquear poros, mas adicionou grupos antimicrobianos com enxofre. O material BBC-FA preservou suas propriedades e incorporou grupos nitro e enxofre. Ensaios microbiológicos realizados em águas residuais hospitalares sintéticas (AHS) inoculadas com *E. coli*, o material funcionalizado e impregnado (BBC-FA) apresentou a melhor performance: redução de 5,31 Log₁₀ na contagem de *E. coli* e eficiência de remoção de 53% na dosagem de 400 mg. enquanto BBC-A inesperadamente favoreceu crescimento bacteriano, possivelmente devido à ausência de ativação superficial e resíduos orgânicos. Os resultados evidenciam que a funcionalização com ácido e alicina (BBC-FA) é essencial para a ação bactericida, contribuindo para o desenvolvimento de materiais sustentáveis no tratamento de águas residuais.

PALAVRAS-CHAVE: Adsorção; Alicina; Biocida; *Escherichia coli*; Materiais sustentáveis.

1 INTRODUÇÃO

A água é essencial para a vida e o equilíbrio dos ecossistemas, sendo usada em atividades domésticas, agrícolas e industriais. No entanto, sua qualidade vem sendo comprometida pelo descarte de resíduos tóxicos, o que afeta o meio ambiente e a saúde pública (Bezerra De Araujo *et al.*, 2023). Dentre os principais poluentes, destacam-se os efluentes hospitalares, que contêm microrganismos patogênicos, fármacos e metais pesados (Alvarino *et al.*, 2023; Han *et al.*, 2022).

No Brasil, com cerca de 7.190 hospitais, estima-se a geração de 750 litros de efluentes por leito ao dia (Brasil, 2022). Muitos desses resíduos são descartados sem tratamento adequado, e poucos hospitais utilizam sistemas eficazes, o que revela um



cenário de descumprimento das normas ambientais (Gautam *et al.*, 2007; Xue *et al.*, 2024; Vecchia *et al.*, 2009).

As águas residuais hospitalares (ARH) diferem das domésticas por conterem contaminantes emergentes, como antibióticos, hormônios e bactérias multirresistentes (De Araújo *et al.*, 2016; Xavier *et al.*, 2023). O tratamento convencional nem sempre é suficiente, sendo necessárias tecnologias complementares como adsorção, filtração e oxidação (Bhatnagar; Sillanpää, 2009).

A adsorção é uma alternativa promissora por sua simplicidade e eficácia (Dada *et al.*, 2023). O carvão ativado é amplamente utilizado, e sua eficiência pode ser aprimorada com compostos antimicrobianos (Mohammad-Khah; Ansari, 2009). A alicina, derivada do alho (*Allium sativum*), possui ação contra patógenos como *Escherichia coli*, além de propriedades antioxidantes (Borlinghaus *et al.*, 2014; Salehi *et al.*, 2019). *E. coli* é amplamente usada como indicador de contaminação (Guerra *et al.*, 2019; Zhou *et al.*, 2023).

Diante da crescente preocupação com a contaminação microbiana em ARH e das limitações dos tratamentos convencionais, este trabalho teve como objetivo desenvolver um material adsorvente com propriedades antimicrobianas, capaz de reduzir a carga microbiana em águas ARH.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 MATERIAIS

O carvão de osso bovino (BBC) foi adquirido do comércio varejista especializado “Bonechar do Brasil Ltda.” (Paiçandu/PR – Brasil). O carvão de osso bovino foi utilizado como fornecido, ou seja, sem pré-tratamento. O material passou por uma peneira de 80 Mesh para homogeneização da distribuição granulométrica. O extrato de alho foi obtido de bulbos de alho fornecidos por um comércio local. A cepa bacteriana utilizada foi *Escherichia coli* (*E. coli*) TOP-10 fornecida pelo Laboratório de Microbiologia Aplicada da Universidade Estadual de Maringá (Maringá/PR – Brasil). Os reagentes utilizados foram de grau analítico.

2.2 MÉTODOS

2.2.1 Funcionalização de carvão de osso bovino

Para a preparação do carvão de osso bovino como adsorvente, uma funcionalização ácida foi realizada com ácido nítrico (1,0 mol/L) com um método baseado em Ferreira *et al.*, 2018. O procedimento foi realizado em um béquer adicionando 100 mL de solução de HNO₃ a 20 g de BBC. O balão foi mantido sob agitação (200 rpm) por 24 h a 25 °C. Após esse período, o sólido foi filtrado, lavado com 2,0 L de água destilada e seco a 50 °C por 48 h em estufa. O material foi denominado carvão de osso bovino funcionalizado (BBC-F). O BBC-F foi, posteriormente, impregnado com extrato de alicina, sendo denominado (BBC-FA).

2.2.2 Obtenção do extrato de alho rico em alicina

Para obtenção do extrato, bulbos de alho (*Allium sativum* L.) foram desinfetados com solução de NaOH a 1% por 30 min e lavados com água destilada. A extração também utilizou água destilada como solvente, seguindo um método adaptado de Alvarino *et al.*, 2023 e Beline *et al.*, 2025. Lotes de 100 g de bulbos de alho desintegrados manualmente foram triturados em liquidificador. Posteriormente, foram adicionados 30 mL de água



destilada e o material foi mantido refrigerado por 24h a 5°C. Após esse período, a mistura foi filtrada (3 µm) para remoção dos resíduos de alho sendo fase líquida o extrato rico em alicina (Alicina, C₆H₁₀OS₂ ; PM = 162,276 g/mol). Até seu uso, o extrato foi mantido no escuro a 20 °C devido à volatilidade da alicina.

2.2.3 Determinação do teor de alicina no extrato de alho

O teor de alicina pode ser estimado medindo-se a atividade enzimática da molécula por meio da quantificação da concentração de ácido pirúvico. O método baseia-se na reação catalisada pela alinase, que produz uma molécula de alicina e duas moléculas de ácido pirúvico (Schwimmer; Weston, 1961).

Neste método, 1,0mL de extrato de alho, 1,0 mL de 0,0125% de 2,4-dinitrofenil-hidrazina (DNPH) em HCl (2 mol/L) e 1,0 mL de água destilada foram adicionados a um tubo de ensaio sob agitação. O tubo foi então selado e imerso em banho-maria a 37 °C por 10 min. Após a incubação, o tubo de ensaio foi removido do banho e 5,0 mL de solução de NaOH 0,6 mol/L foram adicionados sob agitação. A mistura foi então deixada em repouso por 5 min para completar a reação que confere uma cor amarela à solução. A concentração de alicina foi determinada medindo a absorbância a 420 nm usando um espectrofotômetro UV-vis. Soluções de ácido pirúvico (AP) com concentrações variando de 0,001 a 0,010 mol foram usadas como padrões. Os resultados foram expressos em mol/L de ácido pirúvico por grama de alho no extrato (mmol PA/L).

2.2.4 Impregnação de carvão de osso com extrato de alicina

Para o método de impregnação, 2,0 g de BBC foram misturados com 20 mL de extrato de alho. A solução foi preparada em um balão lacrado e agitada a 180 rpm por 24 h em um shaker (25 °C). Em seguida, a mistura foi filtrada e o material sólido impregnado foi armazenado em um dessecador por 48 h, de acordo com Beline *et al.*, 2025. Este material adsorvente foi denominado carvão de osso bovino impregnado com alicina (BBC-A). BBC-F foi impregnado com alicina pelo mesmo método, sendo assim denominado BBC-FA.

2.2.5 Caracterizações

As caracterizações foram realizadas no carvão de osso bovino in natura (BBC), funcionalizado (BBC-F), in natura com alicina (BBC-A) e funcionalizado com alicina (BBC-FA), da seguinte forma: Espectroscopia de Infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR), Espectroscopia Raman, Ponto de carga zero (pHPZC), Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) e fisissorção de nitrogênio pelo método Brunauer–Emmett–Teller (BET).

A análise de FTIR foi conduzida usando um espectrômetro Bomem MB-100C26, com uma faixa de varredura de 400 a 4000 cm⁻¹. A análise Raman foi realizada em um espectrômetro Bruker Raman equipado com um laser de 532 nm e uma potência de saída de 20 mW. Além disso, medidas de adsorção-dessorção de nitrogênio a 77 K foram usadas para avaliar a área de superfície específica e o volume de poros das amostras. Essas medidas foram realizadas em um sistema Micrometrics ASAP 2020, empregando o método BET (Brunauer *et al.*, 1938) para determinação da área de superfície e o método de ponto único a uma pressão relativa (P/P₀) igual a 1,0 para estimar o volume total de poros.

2.2.6 Síntese do efluente hospitalar sintético



As águas residuais hospitalares sintéticas (AHS) foram preparadas seguindo a metodologia descrita por Tiwari *et al.*, 2019. Este método envolve a preparação de uma solução salina projetada para simular a composição média de AAH reais. A composição detalhada do efluente sintético é fornecida na **Tabela 1**. Cada componente químico foi pesado com precisão usando uma balança analítica (Bel Engineering M254A) de acordo com as quantidades especificadas. Em seguida, os reagentes foram transferidos para um balão de fundo redondo de 1000 mL e preenchidos com água destilada. A solução foi agitada continuamente até que todos os reagentes estivessem totalmente dissolvidos. Finalmente, a solução foi transferida para um frasco Erlenmeyer e esterilizada em uma autoclave (Prismatec, CS) a 121 °C por 15 min, depois deixada esfriar até a temperatura ambiente antes do uso.

Tabela 1. Reagentes químicos e suas concentrações no HWW sintético

Reagentes ^a	Concentração (mg/L)
Na ₂ CO ₃	428,60
CaCl ₂ .2H ₂ O	22,10
ZnCl ₂	0,23
FeCl ₂	11,63
KH ₂ PO ₄	92,19
C ₆ H ₁₂ O ₆	938,35
Na ₂ MoO ₄ .2H ₂ O	0,10
(NH ₄) ₂ SO ₄	353,57
CuSO ₄	0,07
MnSO ₄ .H ₂ O	0,12
CoSO ₄ .7H ₂ O	0,48
MgSO ₄	34,68

^a A glicose foi usada como fonte de carbono para fornecer uma demanda química de oxigênio semelhante à das águas residuais.

Fonte: adaptado de Tiwari *et al.*, 2019.

2.2.7 Análise microbiológica: adsorção de *E. coli*

Para a adsorção de *E. coli*, BBC-A e BBC-FA foram testados como adsorventes devido ao potencial antimicrobiano da alicina impregnada de acordo com Beline *et al.*, 2025. Variações de massa de 100 mg à 400 mg de adsorvente foram testadas em 4 Erlenmeyer e adicionado a 30 mL de efluente hospitalar sintético (HWW) previamente inoculado com *E. coli* na concentração de 10⁴ UFC/mL (unidades formadoras de colônias por mL). A suspensão foi colocada em um Erlenmeyer e mantida a 25 °C sob agitação (120 rpm) por 24 h (agitador orbital CT-712, Cientec, Brasil). Após o tratamento, a atividade antimicrobiana dos materiais foi avaliada pela análise de uma alíquota da amostra. Para avaliar a redução da carga microbiana, uma alíquota de 100 uL foi coletada, realizada diluição seriada e 20 uL transferidos para uma placa de meio de cultura. As placas foram então incubadas a 35 °C por 24 h, após o que o número de UFC foi contado de acordo com Reed; Reed, 1948. Os resultados foram expressos em UFC/mL de acordo com a Eq. 1 e a eficiência de remoção (%) foi determinada de acordo com a Eq. 2.

$$\text{Número de Colônias (CFU/mL)} = G \cdot \frac{1}{D} \cdot 10^3 \quad 1$$

onde G representa o crescimento bacteriano médio; D é a diluição de UFC contáveis.

$$\text{Eficiência de remoção (\%)} = \frac{C_0 - C_f}{C_0} \times 100 \quad 2$$



onde C_0 e C_f são o \log_{10} (UFC/mL) do controle positivo e após o tratamento de adsorção proposto, respectivamente.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 RESULTADOS DA CARACTERIZAÇÃO

As imagens obtidas por MEV de BBC, BBC-A, BBC-F e BBC-FA são mostradas na Figura 1.

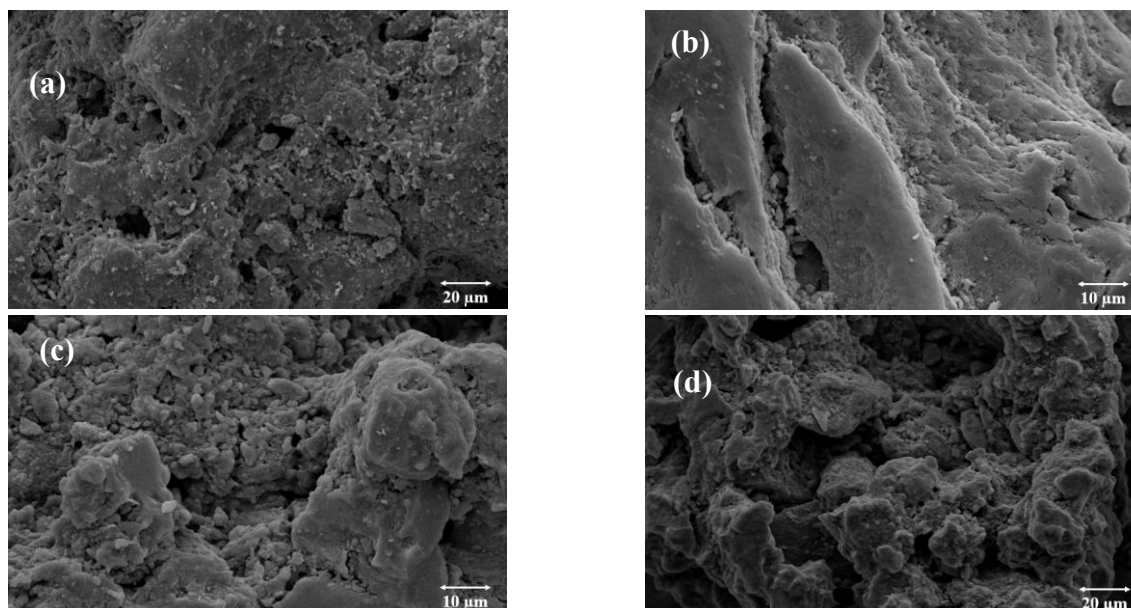


Figura 1. Imagens MEV da BBC (a), BBC-A (b), BBC-F (c) e BBC-FA (d)

Fonte: Dados da pesquisa.

A análise da Figura 1 permite observar que todas as amostras apresentaram partículas de formato irregular, com superfície rugosa e aspecto poroso, já esperado em carvões de osso bovino, não tratado ou funcionalizado (Maeda *et al.*, 2024). No entanto, em todas as amostras, exceto na BBC in natura (a), observa-se uma cobertura lisa, atribuída aos compostos ácidos ou alicina aderidos durante a etapa de funcionalização. Essa tendência também foi relatada por Alvarino *et al.*, 2023 para um material de carvão ativado de babaçu.

Os resultados da fisissorção de N_2 a 77 K para BBC, BBC-A, BBC-F e BCC-FA são mostrados na Tabela 2.

Tabela 2. Área superficial específica e volume e diâmetro dos poros para BBC, BBC-A, BBC-F e BCC-FA

Amostra	BBC	BBC-A	BBC-F	BBC-FA
Área de superfície específica (m^2/g)	83,97	26,27	87,36	31,96
Diâmetro médio dos poros (nm)	11,87	21,18	11,27	16,67
Volume total de poros (cm^3/g)	0,249	0,139	0,246	0,133



Volume de microporos (cm ³ /g)	0,003	0,002	0,004	0,001
--	-------	-------	-------	-------

Fonte: Dados da pesquisa.

As amostras BBC e BBC-F apresentaram áreas superficiais semelhantes, enquanto BBC-A e BBC-FA (com alicina) tiveram redução de cerca de três vezes. Essa diminuição foi atribuída ao bloqueio de poros pelas moléculas de alicina, evidenciado por MEV (Figura 1), bem como pela redução de ~50% no volume e diâmetro médio dos poros. Resultados semelhantes foram observados em outros carvões com alicina, como os de babaçu e bagaço de cana (Alvarino *et al.*, 2023; Beline *et al.*, 2025), enquanto valores para carvão bovino não modificados permaneceram constantes (Maeda *et al.*, 2024).

Todas as amostras apresentaram estrutura mesoporosa, com volume insignificante de microporos (Tabela 2). A funcionalização com HNO₃ não alterou significativamente as propriedades superficiais, mas modificações químicas foram detectadas por FTIR (Figura 2).

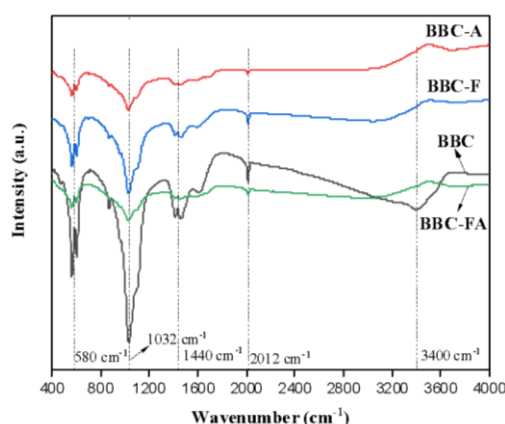


Figura 2. Espectros de FTIR de amostras BBC, BBC-A, BBC-F e BBC-FA

Fonte: Dados da pesquisa.

Os espectros de FTIR das amostras de carvão de osso revelaram diferenças e similaridades importantes que refletem a funcionalização da superfície e a impregnação de alicina. Uma banda larga centrada em ~3400 cm⁻¹ foi observada em todas as amostras, associada a vibrações de estiramento de OH da água adsorvida e/ou de grupos hidroxila de superfície (Cechinel *et al.*, 2014). Essa banda foi notavelmente mais intensa nas amostras oxidadas (BBC-F) e combinadas (BBC-FA), sugerindo um aumento na densidade de hidroxila de superfície após o tratamento com ácido nítrico. Na região de ~2900 cm⁻¹, bandas fracas de estiramento de CH foram detectadas na amostra BBC, provavelmente devido a cadeias alifáticas residuais de matéria orgânica na matéria-prima imaculada (Xue *et al.*, 2024). Esse sinal diminuiu ou desapareceu após tratamentos de superfície, consistente com a remoção oxidativa de resíduos orgânicos (Gaudreault, 2005; Mohammad-Khah; Ansari, 2009).

Entre 1600-1000 cm⁻¹, observaram-se mudanças estruturais significativas. Uma banda comum a todas as amostras (~1600 cm⁻¹) foi atribuída a vibrações C=O ou C=C (Li *et al.*, 2024). Nos carvões BBC-F e BBC-FA, essa banda se deslocou e intensificou-se (~1700 cm⁻¹), indicando formação de grupos ácido carboxílico. Uma nova banda em 1540 cm⁻¹ surgiu apenas nessas amostras, relacionada a grupos nitro (NO₂), evidenciando a nitração promovida pelo HNO₃ (Alvarino *et al.*, 2023).

Na faixa de 1030–1100 cm⁻¹, as vibrações de CO e S=O indicaram funções oxigenadas em BBC e BBC-F, e a presença de grupos sulfóxido em BBC-A e BBC-FA, oriundos da alicina. Adicionalmente, bandas entre 600–700 cm⁻¹ revelaram vibrações CS,



características de materiais modificados por alicina, embora com baixa intensidade, possivelmente devido à sobreposição com a matriz do carvão ou baixa concentração (Alvarino *et al.*, 2023; Beline *et al.*, 2025; Bhattacharya *et al.*, 2022; Borlinghaus *et al.*, 2014).

De forma geral, as análises por FTIR e Raman (Figura 3) confirmaram as transformações físico-químicas ocorridas durante a síntese dos materiais.

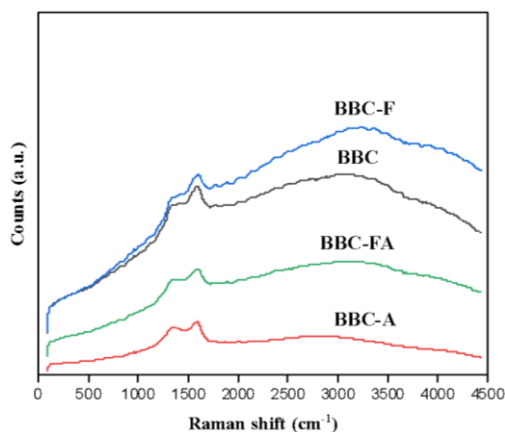


Figura 3. Deslocamento Raman para BBC, BBC-A, BBC-F, BBC-FA

Fonte: Dados da pesquisa.

As amostras apresentaram as bandas típicas de materiais carbonáceos: banda D ($\sim 1350\text{ cm}^{-1}$), ligada à desordem estrutural, e banda G ($\sim 1580\text{ cm}^{-1}$), associada a domínios grafíticos com ligações C=C. A razão ID/IG e a proporção sp^2/sp^3 confirmaram a estrutura parcialmente desordenada do biocarvão (Xue *et al.*, 2024).

A funcionalização ácida aumentou a intensidade da banda D em BBC-F e BBC-FA, indicando maior desordem e presença de grupos oxigenados. Já as amostras com alicina mostraram sinais sutis de grupos com enxofre, com baixa intensidade, possivelmente devido à concentração superficial limitada ou sobreposição de sinais.

O pH_{PCZ} para BBC, BBC-A, BBC-F e BBC-FA é mostrado na Figura 4.

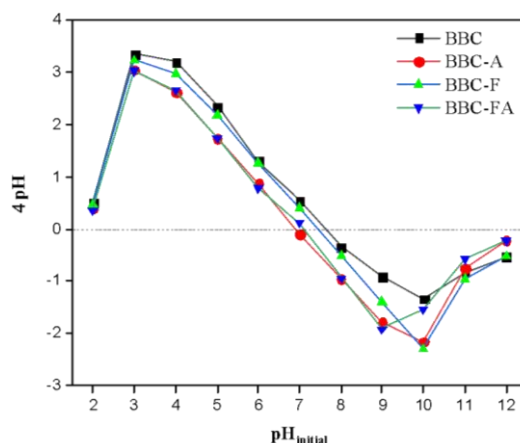


Figura 4. pH do ponto de carga zero para BBC, BBC-A, BBC-F e BBC-FA.

Fonte: Dados da pesquisa.

O pH_{PZC} de todos os adsorventes sintetizados variou entre 7,0 e 8,0 (Figura 4), indicando que, em condições típicas de estações de tratamento de águas residuais ($\text{pH} \sim 7,0$), a superfície dos materiais é essencialmente neutra. Como resultado, a adsorção de *Escherichia coli* provavelmente ocorre por mecanismos diferentes de interações



eletrostáticas, uma vez que não há carga superficial líquida significativa nesses pHs (Alvarino *et al.*, 2023; Beline *et al.*, 2025).

3. 2 RESULTADOS DA DESINFECÇÃO MICROBIOLÓGICA

Os ensaios microbianos revelaram um contraste marcante no desempenho antimicrobiano entre BBC-A e BBC-FA, os dois materiais funcionalizados com alicina que foram analisados (Tabela 3).

Tabela 3. Resultados da avaliação antibacteriana dos experimentos de adsorção

Parâmetro	BBC-A	BBC-FA
UFC/mL (controle)	7.85E8	1.92E11
Log ₁₀ unidades (controle)	8,89	11,28
UFC/mL (300 mg)	3.35E11	2,51E8
Log ₁₀ unidades (300 mg)	11,52	8,40
Log ₁₀ unidades	>2,63	2,88
% Eficiência de remoção	>29,58	25,53
UFC/mL (400 mg)	0,84E11	9.7E5
Log ₁₀ unidades (400 mg)	10,92	5,97
Log ₁₀ unidades remoção	>2,03	5.31
% Eficiência de remoção	>22,83	52,93

Valores com um sinal > na frente significam um aumento em vez de uma diminuição.

Fonte: Dados da pesquisa.

O carvão de osso funcionalizado com ácido nítrico e alicina (BBC-FA) exibiu excelente atividade antibacteriana contra *E.coli*, especialmente na dosagem de 400 mg, alcançando uma redução notável no crescimento bacteriano (~53%). Este tratamento levou a uma redução de 5,97 Log₁₀ nas contagens de *E.coli*, com valores significativamente menores de UFC/mL (9,7 E⁵) em comparação com as amostras de controle. Em contraste, o carvão BBC-A apresentou resultados inesperados e preocupantes. Todas as amostras BBC-A apresentaram contagens bacterianas maiores que as dos controles, atingindo até 3,4E¹¹ UFC/ mL. Isso sugere que, na ausência de funcionalização com ácido nítrico, o material não apenas falhou em inibir o crescimento bacteriano, mas pode ter promovido a proliferação de *E. coli*. Nenhum outro resultado relatado foi encontrado que corrobore com esses achados (Alvarino *et al.*, 2023; Beline *et al.*, 2025; Ribeiro *et al.*, 2024), uma vez que os mecanismos antibacterianos da alicina deveriam ter inibido o crescimento bacteriano (Marchese *et al.*, 2016; Rabinkov *et al.*, 1998; Thakur *et al.*, 2024).

4 CONCLUSÃO

Este estudo desenvolveu e caracterizou com sucesso materiais à base de carvão de osso bovino funcionalizados com ácido nítrico e/ou impregnados com alicina para potencial aplicação na desinfecção de águas residuais hospitalares. Análises morfológicas, físico-químicas e espectroscópicas (MEV, BET, FTIR, Raman e pH_{PZC}) demonstraram que o tratamento ácido introduziu grupos funcionais oxigenados e aumentou a desordem da superfície, enquanto a impregnação com alicina reduziu significativamente a área superficial específica e a porosidade devido à cobertura e ao bloqueio dos poros. As análises de FTIR e Raman confirmaram a incorporação de grupos contendo enxofre da



alicina e grupos nitro do tratamento ácido, revelando modificações substanciais na superfície.

Ensaio microbiológicos com *Escherichia coli* mostraram que o tratamento combinado (BBC-FA) resultou em melhor desempenho antibacteriano, alcançando uma redução de 5,31 Log₁₀ e uma eficiência de remoção de 53%. Em contraste, o material impregnado apenas com alicina (BBC-A) apresentou inesperadamente proliferação bacteriana, sugerindo que a funcionalização do ácido nítrico é uma etapa crucial para alcançar e estabilizar os efeitos antimicrobianos da alicina em superfícies de biocarvão.

Em conclusão, esses resultados destacam a importância de estratégias sinérgicas de funcionalização de superfícies para otimizar o desempenho de desinfecção de adsorventes à base de carbono. A amostra BBC-FA demonstrou potencial promissor como alternativa sustentável e de baixo custo para o controle microbiano em sistemas de tratamento de águas residuais, podendo ser aplicado na etapa terciária e eliminar a necessidade de uso de produtos químicos ou antibióticos, especialmente em efluentes relacionados à assistência à saúde.

REFERÊNCIAS

ALVARINO, T. et al. Advanced treatment of hospital wastewater by ozonation and membrane filtration. **Journal of Environmental Management**, v. 330, p. 117-129, 2023. DOI: 10.1016/j.jenvman.2022.12.042.

BELINE, E. L.; DE MOURA, A. A.; DIÓRIO, A. et al. Ecologicamente correto ativado carbono para a remoção de resistente a antibióticos bactérias remoção de águas residuais hospitalares. **Environmental Nanotechnology, Monitoring and Management**, v. 24, p. 101088, 2025. DOI: 10.1016/j.enmm.2025.101088.

BEZERRA DE ARAUJO, L. et al. Impact of pharmaceutical residues on aquatic ecosystems: a review. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 30, p. 4567-4589, 2023. DOI: 10.1007/s11356-022-24381-2.

BHATNAGAR, A.; SILLANPÄÄ, M. Applications of chitin- and chitosan-derivatives for the detoxification of water and wastewater. **Advances in Colloid and Interface Science**, v. 152, n. 1-2, p. 26-38, 2009. DOI: 10.1016/j.cis.2009.09.003.

BHATTACHARYA, S.; SEN, D.; BHATTACHARJEE, C. Inhibition mechanism study for diallyl thiosulfinate (allicin) against crucial bacterial proteins through in silico molecular docking simulation. **Process Biochemistry**, v. 122, p. 110-119, 2022. DOI: 10.1016/j.procbio.2022.09.026.

BORLINGHAUS, J. et al. Allicin: chemistry and biological properties. *Molecules*, v. 19, n. 8, p. 12591-12618, 2014. DOI: 10.3390/molecules190812591.

BRASIL. Ministério da Saúde. **Portaria nº 1.884, de 11 de novembro de 1994**. Normas para projetos físicos de estabelecimentos assistenciais de saúde. Diário Oficial da União. Disponível em: https://bvsms.saude.gov.br/bvs/publicacoes/normas_montar_centro_.pdf. Acesso em: 11 ago. 2025.

BRASIL. Agência Nacional de Vigilância Sanitária (ANVISA). **Resolução RDC nº 50, de 21 de fevereiro de 2002. Regulamento Técnico para planejamento, programação, elaboração e avaliação de projetos físicos de estabelecimentos assistenciais de**



saúde. Diário Oficial da União. Disponível em:

https://www.cremesp.org.br/library/modulos/legislacao/integras_pdf/RES_ANVISA_DC_50_2002_jornal.pdf. Acesso em: 11 ago. 2025.

BRASIL. Confederação Nacional de Saúde (CNSaúde). **Cenário dos Hospitais no Brasil 2021-2022**. Brasília, DF: CNSaúde, 2022. Disponível em: <http://cnsaude.org.br/wp-content/uploads/2022/07/CNSAUDE-FBH-CENÁRIOS-2022.pdf>. Acesso em: 11 ago. 2025.

BRUNAUER, S.; EMMETT, P. H.; TELLER, E. Adsorption of gases in multimolecular layers. **Journal of the American Chemical Society**, v. 60, n. 2, p. 309-319, 1938. DOI: 10.1021/ja01269a023.

CECHINEL, M. A. P.; ULSON DE SOUZA, S. M. A. G.; ULSON DE SOUZA, A. A. Estudo de adsorção de chumbo (II) para ativado carbono originário de osso bovino. **Journal of Cleaner Production**, v. 65, p. 342-349, 2014. DOI: 10.1016/j.jclepro.2013.08.020.

DADA, A. O. et al. Recent advances in the application of adsorbents for water treatment. **Journal of Water Process Engineering**, v. 42, p. 102-115, 2023. DOI: 10.1016/j.jwpe.2021.102115.

DE ARAÚJO, K. S. et al. Advanced oxidation processes: a review on the fundamentals and applications in wastewater treatment. **Ambiente e Água**, v. 11, n. 2, p. 387, 2016. DOI: 10.4136/ambi-agua.1862.

FERREIRA, R. C. et al. Utilização de carvão ativado de dendê in natura e funcionalizado em meio ácido na adsorção de paracetamol. *Matéria (Rio de Janeiro)*, v. 23, n. 1, 2018. DOI: 10.1590/s1517-707620170001.0304.

GAUDREAU, P. Activated charcoal revisited. **Pediatric Emergency Medicine**, v. 6, n. 2, p. 76-80, 2005.

GAUTAM, S. et al. Hospital wastewater generation and its treatment: an overview. **Journal of Environmental Health Science & Engineering**, v. 5, p. 25-34, 2007. DOI: 10.1186/s40201-017-0270-6.

GUERRA, S. T. et al. Virulence factors of Escherichia coli: an overview of infections in animals and humans. **Semina: Ciências Agrárias**, v. 40, n. 5, p. 2087, 2019. DOI: 10.5433/1679-0359.2019v40n5p2087.

HAN, S. et al. Estimating antibiotic use in major cities through wastewater-based epidemiology. **Science of the Total Environment**, v. 826, p. 154116, 2022. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2022.154116.

MAEDA, C. H. et al. The influence of electrolytes on reactive dye adsorption kinetics onto bone char: a mass transfer model. **Environmental Technology**, v. 45, n. 4, p. 794-810, 2024. DOI: 10.1080/09593330.2022.2128891.

MARCHESE, A. et al. Antifungal and antibacterial activities of allicin: a review. **Trends in Food Science & Technology**, v. 52, p. 49-56, 2016.



<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0924224416300558>. Acesso em: 11 ago. 2025.

MOHAMMAD-KHAH, A.; ANSARI, R. Activated charcoal: preparation, characterization and applications. **International Journal of Chemical Technology**, v. 1, p. 1-20, 2009. DOI: 10.4314/bcse.v26i2.2

RABINKOV, A. et al. The mode of action of allicin: radical trapping and interaction with thiol-containing proteins. **Biochimica et Biophysica Acta (BBA) – General Subjects**, v. 1379, n. 2, p. 233-244, 1998. DOI: 10.1016/S0304-4165(97)00104-9.

REED, R. W.; REED, G. B. "Drop plate" method for counting viable bacteria. **Canadian Journal of Research**, v. 26e, n. 6, p. 317-326, 1948. DOI: 10.1139/cjr48e-020.

RIBEIRO, A. C. et al. Antibacterial activity of natural zeolites functionalized with silver nanoparticles (NZ-AgNPs) for water treatment. **Environmental Nanotechnology, Monitoring & Management**, v. 22, p. 101001, 2024. DOI: 10.1016/j.enmm.2024.101001.

SALEHI, B. et al. Allicin and health: a comprehensive review. **Trends in Food Science & Technology**, v. 86, p. 502-516, 2019. DOI: 10.1016/j.tifs.2019.03.003.

SCHWIMMER, S.; WESTON, W. J. Enzymatic development of pyruvic acid in onion as a measure of pungency. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v. 9, n. 4, p. 301-304, 1961. DOI: 10.1021/jf60116a018.

THAKUR, P. et al. Garlic (*Allium sativum* L.): a review on biofunctionality, allicin potency, and drying methodologies. **South African Journal of Botany**, v. 171, p. 129-146, 2024. DOI: 10.1016/j.sajb.2024.05.039.

TIWARI, B. et al. Bacterial community structure of a membrane bioreactor treating synthetic hospital wastewater. **Bioresource Technology**, v. 286, p. 121362, 2019. DOI: 10.1016/j.biortech.2019.121362.

VECCHIA, A. D. et al. Diagnóstico sobre o tratamento de esgoto hospitalar no Brasil. **Revista Saúde e Ambiente**, v. 10, n. 2, p. 65-70, 2009. Disponível em:

https://www.researchgate.net/profile/Fernando-Spilki/publication/254201041_DIAN%27OSTICO_SOBRE_A_SITUAcCAO_DO_TRATAMENTO_DO_ESGOTO_HOSPITALAR_NO_BRASIL/links/558956ba08ae6d4f27eabfc3/DIAGNOSTICO-SOBRE-A-SITUAcCAO-DO-TRATAMENTO-DO-ESGOTO-HOSPITALAR-NO-BRASIL.pdf. Acesso em: 11 ago. 2025.

XAVIER, R. S. et al. O tratamento de efluentes hospitalares como elemento primordial para a sustentabilidade. **Peer Review**, v. 5, n. 16, p. 160-172, 2023. DOI: 10.53660/778.prw2227.

XUE, H. et al. Advanced biochar-based materials for antibiotic removal from hospital wastewater via adsorption and oxidative degradation. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, v. 12, n. 6, p. 114275, 2024. DOI: 10.1016/j.jece.2024.114275.



ZHOU, Y. et al. Urinary tract infections caused by uropathogenic Escherichia coli: mechanisms and treatment options. International Journal of Molecular Sciences, v. 24, n. 13, p. 10537, 2023. DOI: 10.3390/ijms241310537.