

PRODUÇÃO DE CARVÃO ATIVADO A PARTIR DE BORRA DE CAFÉ PARA REMOÇÃO DA COLORAÇÃO DA ÁGUA DA LAGOA DO PARQUE IPANEMA EM IPATINGA-MG

B.S. Siqueira¹, G.G.S. Oliveira¹, H.C. Coura¹, L. Augusto¹, P. Villela¹, F. S. Pio²

¹*Discentes Centro Universitário Católica do Leste de Minas Gerais – Unileste,
Departamento de Engenharia Química, Coronel Fabriciano, Brasil
(gabrielguilherme104@gmail.com)*

²*Docente Centro Universitário Católica do Leste de Minas Gerais – Unileste,
Departamento de Engenharia Química, Coronel Fabriciano, Brasil*

No âmbito das atividades desenvolvidas pelo curso de Engenharia Química do Unileste são incentivados projetos alinhados às demandas da sociedade, utilizando conceitos da disciplina de Operações Unitárias para promover soluções sustentáveis. Nesse contexto, o trabalho avaliou a produção de carvão ativado a partir de borra de café para tratamento de águas residuais. O material apresentou elevada eficiência na remoção de turbidez (96,15%) e cor (84,90%), demonstrando potencial como adsorvente de baixo custo para aplicações em saneamento ambiental.

Palavras-chave: Adsorção; Carvão ativado; Borra de café; Operações unitárias; Sustentabilidade.

INTRODUÇÃO

A degradação da qualidade da água em corpos hídricos urbanos é uma preocupação crescente, especialmente em áreas de lazer e preservação ambiental. No Parque Ipanema, em Ipatinga-MG, a lagoa desempenha um papel essencial tanto para o equilíbrio ecológico quanto para o bem-estar da população local. No entanto, fatores como o descarte inadequado de resíduos, a presença de contaminantes orgânicos e inorgânicos, bem como o escoamento superficial podem comprometer a qualidade da água, afetando a biodiversidade e limitando seu uso recreativo.

Dentre os poluentes encontrados em corpos d'água, corantes sintéticos e metais pesados destacam-se por sua alta estabilidade química e resistência à degradação biológica (Von Sperling, 2014). Para mitigar esses impactos, a adsorção tem se mostrado uma alternativa eficiente e de baixo custo, especialmente com o uso de resíduos agroindustriais e biopolímeros (Babel; Kurniawan, 2003).

A adsorção pode ser compreendida como uma operação de transferência de massa em que determinados sólidos apresentam a capacidade de concentrar, em sua superfície, substâncias presentes em fluidos líquidos ou gasosos, viabilizando a separação dos componentes presentes nos fluidos. Esse fenômeno ocorre predominantemente na superfície externa dos sólidos, de modo que uma

elevada área superficial por unidade de massa sólida favorece significativamente o desempenho do processo (Ruthven, 1984, apud Nascimento et al., 2020, p. 14).

Entre as opções de adsorvente possíveis, destaca-se a borra de café, que é um dos resíduos orgânicos mais produzidos mundialmente e apresenta elevado teor de carbono, celulose, hemicelulose e lignina, características que favorecem sua conversão em carvões ativados com elevada porosidade e potencial adsorptivo (Mussatto et al., 2011; Kanakaraju et al., 2018).

Diante desse contexto, este estudo busca analisar a qualidade da água da Lagoa do Parque Ipanema, e testar um método de remoção da cor de efluentes utilizando carvão ativado obtido da borra de café. A pesquisa visa contribuir para a conservação dos recursos hídricos locais, incentivando práticas ambientais responsáveis e acessíveis.

MATERIAL E MÉTODOS

O processo de produção do carvão ativado foi realizado conforme o presente na Figura 1.

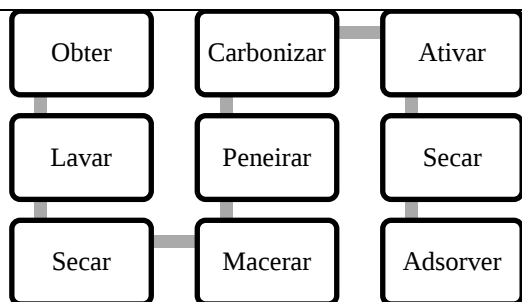


Figura 1. Fluxograma do processo.

Coleta e higienização

A água utilizada nos ensaios foi coletada em diferentes pontos da Lagoa do Parque Ipanema, conforme representado na Figura 2.

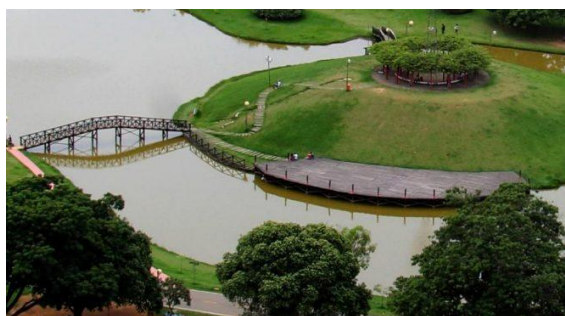


Figura 2. Deck do parque Ipanema.

A caracterização inicial foi realizada por meio de sonda multiparamétrica YSI Pro DSS. A borra de café, obtida de uso doméstico, foi lavada com água destilada para remoção de impurezas solúveis e seca em estufa a 105 °C por 24 h.

Peneiramento

A borra seca foi submetida à análise granulométrica utilizando peneiras de 2000, 1400, 1180, 850, 425 e 300 μm . As massas retidas foram utilizadas para determinação da distribuição granulométrica e ajuste aos modelos Gates-Gaudin-Schuhmann (GGS) e Rosin-Rammler-Bennett (RRB), a fim de avaliar a influência do tamanho das partículas no processo adsorativo.

Pirólise

A carbonização da biomassa foi realizada em forno mufla a 400 °C durante 1 h. O material foi acondicionado em cadinho tampado com papel alumínio, obtendo-se um carvão precursor para posterior ativação química.

Ativação química

O carvão obtido foi impregnado em soluções aquosas de H_3PO_4 e KOH (1 mol L^{-1}), na proporção massa/massa de 1:3, por 24 h à temperatura ambiente. Após o tratamento, os materiais foram lavados até pH neutro, secos em estufa a 105 °C por 24 h e armazenados para os ensaios de adsorção.

Coluna de adsorção

Os testes foram realizados em uma coluna de leito fixo construída com bureta de 50 mL. Uma camada de lã de vidro foi utilizada como suporte para 0,6 g de carvão ativado produzido a partir de borra de café. Em seguida, 20 mL da água coletada foram percolados pelo leito adsorvente, conforme desenho esquemático na Figura 3.

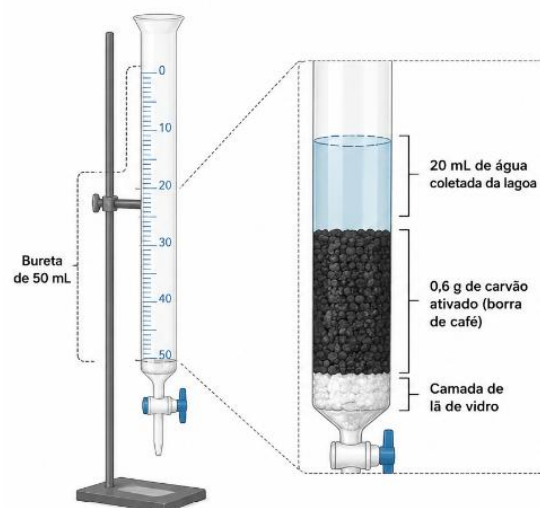


Figura 3. Coluna de leito fixo.

Equilíbrio de adsorção

A capacidade de adsorção foi avaliada utilizando azul de metileno como adsorvato modelo. A quantidade adsorvida no equilíbrio (q_e) foi calculada a partir das concentrações inicial e final da solução. As concentrações foram determinadas por espectrofotometria UV-Vis em 664 nm, utilizando curva de calibração construída com padrões entre 0,25 e 4 ppm.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Análise granulométrica

A distribuição granulométrica da borra de café foi determinada por peneiramento, conforme apresentado na Tabela 1.

Tabela 1. Distribuição granulométrica.

Peneira (mesh)	Abertura da Peneira			Massa retida (g)	Fração retida		Fração passante	
	-Di (μm)	+Di (μm)	Di (μm)		x _i	x _i (%)	X _i	X _i (%)
10/14	2000	1400	1700	8	0,0690	6,90	0,9310	93,10
14/16	1400	1190	1295	6	0,0517	5,17	0,8793	87,93
16/20	1190	841	1016	3	0,0259	2,59	0,8534	85,34
20/40	841	420	631	8	0,0690	6,90	0,7845	78,45
40/50	420	297	359	46	0,3966	39,66	0,3879	38,79
50	297	297	297	27	0,2328	23,28	0,1552	15,52
fundo	fundo	fundo	0	18	0,1552	15,52	0,0000	0,00

A distribuição de frequência (Figura 4) demonstrou maior concentração mássica de partículas na faixa entre 250 e 500 μm, evidenciando predominância de material fino. Esse comportamento é desejável para aplicações em adsorção, uma vez que a predominância de partículas finas favorece o aumento da área superficial específica, reduzindo as resistências difusionais e aumentando a eficiência dos processos de transferência de massa durante a adsorção (McCabe; Smith; Harriott, 2005).

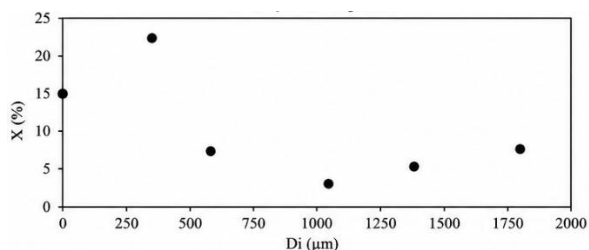


Figura 4. Distribuição de frequência.

A curva acumulada (Figura 5) mostrou que aproximadamente 75% da amostra apresenta diâmetro inferior a 841 μm, confirmando a predominância de partículas finas no material estudado. Essa característica contribui para maior eficiência dos fenômenos de transferência de massa, favorecendo o acesso dos contaminantes aos sítios ativos do adsorvente.

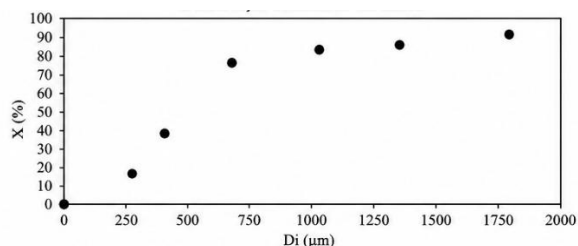


Figura 5. Distribuição cumulativa.

Os dados experimentais foram ajustados aos modelos Gates-Gaudin-Schuhmann (GGS) e Rosin-Rammler-Bennett (RRB), apresentados na Figura 6. Entre os modelos avaliados, o RRB apresentou melhor ajuste aos dados experimentais, com coeficiente de determinação mais próximo da unidade. Esse resultado indica maior capacidade do modelo em representar a distribuição granulométrica da borra de café utilizada. Esse comportamento é consistente com o observado por Rosin e Rammler (1933), que demonstraram a eficiência do modelo na descrição da distribuição granulométrica de materiais particulados empregados em processos industriais.

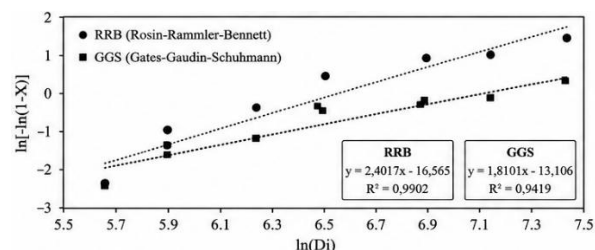


Figura 6. Modelos RRB e GGS.

Além disso, o valor obtido para o parâmetro n sugere uma distribuição relativamente uniforme das partículas. Em sistemas de adsorção em leito fixo, essa uniformidade contribui para melhor empacotamento do leito, reduzindo a formação de canais preferenciais e promovendo distribuição mais homogênea do fluxo através da coluna. Dessa forma, os resultados granulométricos indicam que o material apresenta características adequadas para utilização como adsorvente.

Avaliação dos agentes de ativação

Após a carbonização, foram avaliados dois agentes ativantes químicos, hidróxido de potássio (KOH) e ácido fosfórico (H₃PO₄), visando selecionar a

condição mais adequada para aplicação nos ensaios de adsorção.

Durante a etapa de lavagem dos carvões ativados observou-se comportamento distinto entre os materiais. O carvão ativado com KOH apresentou água residual com coloração marrom intensa, indicando maior solubilização de compostos presentes na matriz carbonácea. Por outro lado, o carvão ativado com H_3PO_4 apresentou água de lavagem praticamente incolor (Figura 7), evidenciando menor desprendimento de substâncias solúveis.



Figura 7. Comparação entre a água de lavagem dos carvões ativados: (1) água residual escura do carvão ativado com KOH, (2) água límpida da lavagem do carvão ativado com H_3PO_4 .

Esse comportamento sugere maior estabilidade química do material ativado com ácido fosfórico, reduzindo potenciais interferências nos ensaios de adsorção e minimizando o risco de contaminação secundária do meio aquoso. Outro fator considerado, segundo Lua e Yang (2004), a ativação com ácido fosfórico promove simultaneamente desidratação da biomassa e desenvolvimento de microporos, preservando maior rendimento de carvão quando comparada a agentes alcalinos. Em razão do explicitado, o carvão ativado com H_3PO_4 foi selecionado para as etapas subsequentes do estudo.

Aplicação no tratamento da Lagoa

A água utilizada nos ensaios foi coletada na Lagoa do Parque Ipanema e apresentou características compatíveis com águas superficiais sujeitas ao aporte de matéria orgânica e sólidos suspensos. Os valores iniciais de turbidez e cor foram de 52 FAU e 77,5 Hz, respectivamente.

O tratamento foi realizado em coluna de adsorção contendo 0,6 g de carvão ativado. Em cada ciclo foram percolados 20 mL de água da lagoa, sendo realizados cinco ciclos consecutivos. Já na primeira passagem

observou-se redução significativa dos parâmetros analisados, com valores de turbidez e cor de 3 FAU e 14,4 Hz.

Ao final do quinto ciclo, os valores atingiram 2 FAU para turbidez e 11,7 Hz para cor aparente, demonstrando manutenção da eficiência do material ao longo dos ensaios. As reduções correspondem a remoções de 96,15% para turbidez e 84,90% para cor. A elevada remoção observada pode ser atribuída à elevada área superficial e à presença de grupos funcionais oxigenados na superfície do carvão ativado, responsáveis pela retenção de partículas coloidais e compostos orgânicos (Bansal; Goyal, 2005).

Os valores finais obtidos enquadram-se nos limites estabelecidos pela Portaria GM/MS nº 888/2021, que estabelece turbidez máxima de 5 FAU e cor aparente máxima de 15 Hz para água destinada ao consumo humano. Embora outros parâmetros de potabilidade não tenham sido avaliados, os resultados demonstram elevada eficiência do carvão ativado produzido a partir da borra de café na remoção de impurezas responsáveis pela alteração visual da qualidade da água.

Comparativamente, os resultados obtidos mostram desempenho semelhante ou superior ao relatado para outros adsorventes alternativos presentes na literatura. Sousdaleff (2024), por exemplo, reportou reduções de cor entre 61,9% e 94,4% e remoções de turbidez variando entre 49% e 92,2%. Dessa forma, o material desenvolvido neste estudo apresenta desempenho competitivo aliado à vantagem de utilizar um resíduo amplamente disponível.

Avaliação da Capacidade Adsorativa com Azul de Metileno

Após a validação preliminar do adsorvente utilizando a água da lagoa, realizou-se uma avaliação quantitativa empregando azul de metileno como referência. Uma vez que é amplamente empregado como molécula modelo para avaliação da capacidade adsorativa de materiais carbonáceos devido à sua estabilidade química e facilidade de quantificação por espectrofotometria (Ho; Mckay, 1999). A utilização desse corante permite analisar o comportamento adsorativo do material sob condições controladas e comparar seus resultados com dados reportados na literatura.

A curva de calibração (Figura 8) construída com base nas soluções padrão de azul de metileno apresentou uma relação linear entre absorvância e concentração, expressa pela equação de calibração (Equação 1), com coeficiente de correlação de 0,9997, indicando excelente linearidade e precisão da calibração.

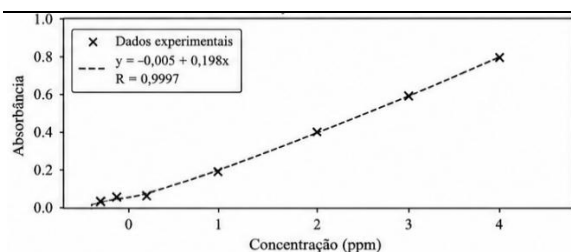


Figura 8. Curva de calibração do azul de metileno.

$$\text{abs} = -0,005 + 0,198 \times \text{concentração} \quad (1)$$

Os experimentos foram conduzidos utilizando soluções com concentrações entre 50 e 70 ppm, em intervalos de 5 ppm. Concentrações inferiores chegaram a ser avaliadas, porém apresentaram absorbâncias residuais próximas de zero após a adsorção, dificultando a obtenção de dados quantitativos representativos.

A partir das concentrações de equilíbrio obtidas experimentalmente (Tabela 2), foram ajustados os modelos de Langmuir e Freundlich para descrever o comportamento do sistema.

Tabela 2. Resultados dos testes de adsorção.

C_i (ppm)	Abs	C_f (ppm)	q_e (mg/g)
70	0,733	3,726	1,099
65	0,538	2,732	1,038
60	0,388	1,978	0,950
55	0,244	1,259	0,859
50	0,173	0,898	0,815

O modelo de Langmuir (Figura 9) apresentou sua equação linearizada (Equação 2), com coeficiente de determinação de 0,9984, indicando excelente concordância com os dados experimentais. O ajuste sugere predominância de adsorção em monocamada nos sítios ativos disponíveis. A capacidade máxima de adsorção calculada foi de 1,239 mg/g, enquanto a constante de Langmuir ($K_L = 2,434$ L/mg) indicou elevada afinidade entre o azul de metileno e a superfície do carvão ativado.

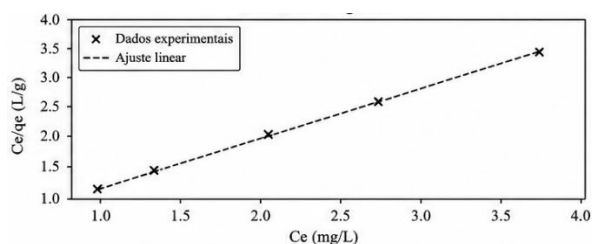


Figura 9. Modelo de Langmuir.

$$\frac{C_e}{q_e} = 0,8070 \times C_e + 0,4012 \quad (2)$$

Resultados semelhantes foram observados por Santana e Carvalho (2024), que reportaram elevadas eficiências de remoção de azul de metileno utilizando carvão ativado produzido a partir de biomassa residual e ativado com ácido fosfórico. Segundo os autores, a presença de grupos superficiais oxigenados e a porosidade desenvolvida durante a ativação favorecem a adsorção de corantes catiônicos, comportamento também observado neste estudo. Esse comportamento está de acordo com a teoria proposta por Langmuir (1918), segundo a qual a adsorção ocorre em sítios energeticamente equivalentes formando uma única camada molecular.

O modelo de Freundlich (Figura 10), com sua forma linearizada (Equação 3), também apresentou excelente ajuste, com R^2 igual a 0,9954. O valor de $1/n = 0,205$ caracteriza uma adsorção favorável, indicando forte interação entre adsorvente e adsorvato e corroborando os resultados observados experimentalmente. O modelo de Freundlich considera superfícies energeticamente heterogêneas, característica frequentemente observada em adsorventes produzidos a partir de biomassa (Freundlich, 1906).

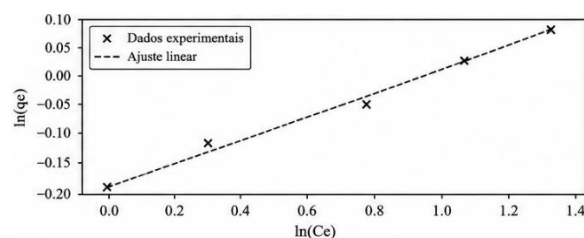


Figura 10. Modelo de Freundlich.

$$\ln(q_e) = 0,2056 \times \ln(C_e) - 0,1701 \quad (3)$$

A boa concordância obtida para ambos os modelos sugere que o processo adsorptivo envolve simultaneamente regiões homogêneas e heterogêneas na superfície do carvão ativado. Esse comportamento é frequentemente relatado para adsorventes produzidos a partir de resíduos lignocelulósicos, cujas superfícies apresentam diferentes grupos funcionais e distribuição não uniforme de energia de adsorção (Foo; Hameed, 2010).

Dessa forma, os resultados demonstram que o carvão ativado produzido a partir da borra de café apresenta desempenho compatível com adsorventes alternativos descritos na literatura, associando boa capacidade de remoção de corantes à utilização de uma matéria-prima residual abundante e de baixo custo. Os elevados coeficientes de determinação obtidos para os modelos de Langmuir e Freundlich reforçam o potencial do material para aplicações em tratamento de águas e efluentes contendo contaminantes orgânicos.

CONCLUSÃO

Os resultados obtidos permitiram concluir que a borra de café apresenta potencial para ser utilizada como matéria-prima na produção de carvão ativado destinado ao tratamento de águas contaminadas. O método de preparo empregado mostrou-se adequado para obtenção de um adsorvente com características favoráveis à remoção de contaminantes presentes em meio aquoso.

A ativação química com ácido fosfórico demonstrou ser a alternativa mais adequada entre as condições avaliadas, produzindo um material mais estável e apto para aplicação nos ensaios de adsorção. Os estudos realizados com água da Lagoa do Parque Ipanema e com azul de metileno confirmaram a eficiência do adsorvente, evidenciando sua capacidade de interagir com compostos responsáveis pela alteração da qualidade na coloração da água.

Os modelos de equilíbrio aplicados indicaram que o processo adsorptivo ocorre em uma superfície com características simultaneamente homogêneas e heterogêneas, comportamento compatível com materiais obtidos a partir de resíduos lignocelulósicos.

Dessa forma, o trabalho atingiu seu objetivo ao utilizar os conceitos da disciplina de Operações Unitárias para demonstrar a viabilidade técnica e ambiental do aproveitamento da borra de café para produção de carvão ativado, contribuindo para a valorização de resíduos orgânicos e uso de alternativas sustentáveis voltadas ao tratamento de águas e efluentes.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Unileste pela disponibilização da infraestrutura, laboratórios e suporte técnico necessários à realização deste trabalho, bem como aos professores que contribuíram para seu desenvolvimento. Agradecem também à administração do Parque Ipanema pela autorização para a coleta das amostras de água utilizadas na pesquisa.

REFERÊNCIAS

- BABEL, S.; KURNIAWAN, T. A. Low-cost adsorbents for heavy metals uptake from contaminated water: a review. **Journal of Hazardous Materials**, v. 97, n. 1-3, p. 219-243, 2003.
- BANSAL, R. C.; GOYAL, M. **Activated carbon adsorption**. Boca Raton: CRC Press, 2005.
- FOO, K. Y.; HAMEED, B. H. Insights into the modeling of adsorption isotherm systems. **Chemical Engineering Journal**, v. 156, n. 1, p. 2-10, 2010.
- FREUNDLICH, H. Über die adsorption in lösungen. Zeitschrift für Physikalische Chemie. **Journal of Physical Chemistry**, Leipzig, v. 57, p. 385-470, 1906.

HO, Y. S.; MCKAY, G. Pseudo-second order model for sorption processes. **Process Biochemistry**, Oxford, v. 34, n. 5, p. 451-465, 1999.

KANAKARAJU, D. et al. Coffee biomass as precursor for activated carbon. **Journal of Cleaner Production**, 2018.

LANGMUIR, I. The adsorption of gases on plane surfaces of glass, mica and platinum. **Journal of the American Chemical Society**, Washington, v. 40, n. 9, p. 1361-1403, 1918.

LUA, A. C.; YANG, T. Characteristics of activated carbons prepared from pistachio-nut shells by phosphoric acid activation. **Microporous and Mesoporous Materials**, v. 63, p. 113-124, 2004.

MCCABE, W. L.; SMITH, J. C.; HARRIOTT, P. **Unit operations of chemical engineering**. 7. ed. New York: McGraw-Hill, 2005.

MUSSATTO, S. I. et al. Production, composition and application of coffee and its industrial residues. **Food and Bioprocess Technology**, 2011.

NASCIMENTO, R. F.; LIMA, A. C. A.; VIDAL, C. B.; MELO, D. Q.; RAULINO, G. S. C. **Adsorção: aspectos teóricos e aplicações ambientais**. Fortaleza: Imprensa Universitária, 2014. 256 p.

ROSIN, P.; RAMMLER, E. The laws governing the fineness of powdered coal. **Journal of the Institute of Fuel, London**, v. 7, p. 29-36, 1933.

SANTANA, Caio Nunes; CARVALHO, Luciene Santos. Comparação do uso de distintos ativantes químicos na obtenção de carvão ativado a partir da borra do café de cápsulas. In: **Anais do IV Congresso de Pesquisa, Pós-Graduação e Inovação e III Jornada de Extensão do IFBA**. Disponível em: <<https://www.even3.com.br/anais/iv-congresso-de-pesquisa-pos-graduacao-e-inovacao-351904/712060-comparacao-do-uso-de-distintos-ativantes-quimicos-na-obtencao-de-carvao-ativado-a-partir-da-borra-do-cafe-de-caps>>. Acesso em: 01 jun. 2025.

SOUSDALEFF, Martha. **Estudo do biochar de borra de café no tratamento do lixiviado do aterro sanitário de Campo Mourão**. 2024. 67 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Inovações Tecnológicas, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campo Mourão, 2024. Disponível em: <<http://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/handle/1/35473>>. Acesso em: 03 jul. 2026.

VON SPERLING, M. **Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos**. 4. ed. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2014.