



## **Manufatura aditiva como estratégia para projetos de despoluição a base de biocarvão: uma revisão sistêmica**

### ***Additive Manufacturing as a Strategy for Biochar-Based Depollution Projects: A systemic review***

**Artur Caron Mottin, Doutor, PPGD / UEMG, PPGEM / CEFET-MG.**

artur.mottin@cefetmg.br

**Daniel de Souza Gamarano, Mestre, PPGD / UEMG.**

dgdanielgamarano@gmail.com

**Caroline Salvan Pagnan, Doutora, PPGD / UEMG.**

carolinespagnan@gmail.com

**Eliane Ayres, Doutora, PPGD / UEMG.**

eayres.pu@hotmail.com

#### **Resumo**

A contaminação de recursos hídricos tem se tornado um problema em escala global. O desenvolvimento de soluções inovadoras para a recuperação desse recurso é fundamental para reduzir o impacto ambiental das atividades humanas. Fundamentado no referencial teórico da adsorção aplicada à remediação ambiental, este trabalho teve como objetivo analisar criticamente a viabilidade do uso da impressão 3D na otimização do desempenho do biocarvão (*biochar*). Para isso, foi conduzida uma revisão sistemática utilizando o protocolo PRISMA, a partir de artigos indexados nas bases Scielo, Periódicos CAPES, Science Direct e Google Scholar. Aplicaram-se critérios de elegibilidade que incluíram publicações a partir de 2020 e estudos que abordassem biocarvão, adsorção e manufatura aditiva, resultando em 112 publicações que após analisadas qualitativamente resultaram em 35 artigos. Os achados destacam o potencial do biocarvão impresso em 3D para adsorção de poluentes, embora desafios técnicos e limitações econômicas persistam. Conclui-se que a integração entre biocarvão e manufatura aditiva representa um avanço promissor para tecnologias de despoluição hídrica.

**Palavras-chave:** Adsorção; biochar; despoluição de águas; impressão 3D; agrosíduos.

#### **Abstract**

*Water resource contamination has emerged as a critical global challenge, requiring innovative strategies focused on remediation to mitigate the environmental impact of anthropogenic activities. Grounded in the theoretical framework of adsorption applied to environmental remediation, this study critically evaluates the feasibility of utilizing 3D printing to enhance the performance of biochar as an adsorbent. To achieve this, a systematic review was conducted following the PRISMA protocol, analyzing peer-reviewed articles indexed in Scielo, Periódicos CAPES, Science Direct, and Google Scholar. Eligibility criteria included publications from 2020 onwards that specifically addressed biochar, adsorption, and additive manufacturing, yielding an initial selection of 112 studies, resulting in 35 directly relevant articles after qualitative analysis. The findings highlight the potential of 3D-printed biochar for pollutant adsorption, while also underscoring persistent technical challenges and economic constraints. In conclusion, the biochar and additive manufacturing integration represents a promising advancement in the development of next-generation water depollution technologies.*

**Keywords:** Adsorption; Biochar; Water Depollution; 3D Printing; Agro-Waste.



## 1. Introdução

A água doce representa cerca de 3% da água disponível no planeta, sendo que 2% estão nas geleiras e aproximadamente 1% está disponível para o consumo humano (Wan *et al.*, 2025). Segundo estimativas da UNESCO (2021), cerca de 80% de todas as águas residuais industriais e municipais são lançadas no meio ambiente sem qualquer tratamento prévio, com efeitos prejudiciais para a saúde humana e para os ecossistemas (Zhao *et al.*, 2024; Xiong *et al.*, 2023). Inúmeras são as tentativas para capturar poluentes e recuperar os recursos hídricos já atingidos. Algumas alternativas são onerosas, outras acabam gerando resíduos secundários (Yang *et al.*, 2024; Federowicz *et al.*, 2025). A adsorção, fenômeno físico-químico onde o componente em uma fase gasosa ou líquida é transferido para a superfície de uma fase sólida, demonstra ser uma alternativa interessante, principalmente quando utilizados materiais de fonte renováveis como o biocarvão (*biochar*) (Zhang *et al.*, 2022a; Wan *et al.*, 2022).

A adsorção de poluentes é comumente realizada com carvão ativado como adsorvente. Porém, pesquisas têm avaliado o potencial do uso do biocarvão (*biochar*) devido ao seu baixo custo comparado ao carvão ativado (Roy, *et al.*, 2022). Mesmo realizando-se o processo de ativação, o biocarvão é mais econômico que o carvão ativado tradicional (Shi *et al.*, 2020; Zhang *et al.*, 2022b; Oliveira *et al.*, 2023; Roy, *et al.*, 2022; Stephanie *et al.*, 2021). Estudos demonstram que o biocarvão é eficaz e promissor como mecanismo de remoção de poluentes no processo de tratamento de águas residuais (Zhao *et al.*, 2021; Kearns *et al.*, 2021; Menezes *et al.*, 2022; Uday *et al.*, 2023; Li *et al.*, 2023b; Amalina *et al.*, 2022; Oliveira *et al.*, 2023; Anderson *et al.*, 2023). No entanto, o biochar livre apresenta alguns problemas de desintegração em contato com a água agitadas, ou quando utilizado na forma de pó, o que acaba gerando resíduos secundários indesejáveis. (Li *et al.*, 2023a; Muoghalu *et al.*, 2023)

A eficiência do biochar na adsorção de diferentes poluentes é demonstrada nos diversos estudos já publicados (Yang *et al.*, 2024; Wang *et al.*, 2024c; Wei *et al.*, 2024; Srivastava *et al.*, 2024; Jagaba *et al.*, 2024; Silva *et al.*, 2023; Mishra *et al.*, 2023; Zhang *et al.*, 2022a; Roy, *et al.*, 2022; Uday *et al.*, 2022;). Mas, sua aplicação ainda é restrita ao ambiente laboratorial, dado que o material ainda não se tornou um produto viável. Nesse ponto, as metodologias de design podem auxiliar para que se encontre um caminho até sua comercialização. A bioinspiração / biomimética aliada ao design circular são norteadores para o processo de desenvolvimento de soluções complexas, como as abordadas nesse projeto.

O caráter integrativo do design, desenvolvendo soluções de amplo espectro, é um impulsionador da inovação em projetos de diversas áreas. A capacidade de construção de novas conexões entre elementos existentes, seja materiais, tecnologias, redes, mercados e pessoas, é fundamental na criação de soluções que trarão benefícios de impacto técnico, econômico, ambiental e social e cultural (Tamborrini in Moraes *et al.*, 2012). O desenvolvimento de um projeto em design passa pela consideração de aspectos ligados a diversos campos de análise, a citar o mercado; o clima de investimento do setor; os aspectos perceptivos do usuário; os impactos nos diferentes eixos da sustentabilidade; a ciência e a tecnologia; além da capacidade produtiva e os materiais (Ashby & Johnson, 2011). Desta forma, o presente estudo propõe a revisão sistemática sobre o biocarvão (*biochar*) em projetos tridimensionais que utilizem a manufatura aditiva como meio de viabilização desses dispositivos. A fim de compreender como a integração a outras áreas do conhecimento, a criação de um sistema de aplicação de um material já existente e com eficácia comprovada, poderia mitigar os efeitos da poluição em recursos hídricos.

## 2. Procedimentos Metodológicos

O procedimento metodológico adotado para revisão sistemática seguiu as recomendações da PRISMA (*Preferred Reporting Items for Systematic reviews and Meta-Analyses*), que define quatro etapas: Identificação, Seleção, Elegibilidade e Inclusão (PAGE *et al.*, 2021). Apesar do método ter sido desenvolvido para revisões na área médica, muitos trabalhos de outras áreas do conhecimento como engenharia, arquitetura e design, entre outros (DE OLIVEIRA *et al.*, 2022).

O método PRIMA tem por características uma estrutura do tipo Checklist com 27 itens e um fluxograma contendo as quatro etapas, que tem por objetivo melhorar o relato das revisões sistemáticas e meta-análises evitando vieses, ou quando estiverem presentes que sejam relatados de forma clara e objetiva (Page *et al.*, 2021).

A partir dessas referências apresentaremos as etapas do procedimento metodológico em 3 partes: 1. Escopo: onde abordaremos a identificação e o processo de seleção aplicados; 2. Evidências: etapa que apresentaremos os critérios de elegibilidade, inclusão e exclusão do processo de revisão sistemática; e 3. Estrutura da análise: serão detalhados os sistemas e plataformas utilizadas para análise dos estudos encontrados.

### 2.1 Escopo

O objetivo da pesquisa foi analisar os potenciais do uso de biocarvões como material adsorvente para despoluição de águas, em estruturas tridimensionais fabricadas em impressão 3D. A partir do levantamento prévio sobre o tema, foram elaboradas a questão geral (QG) do estudo, além de questões específicas (QS), e questões estatísticas (QE).

O Quadro 1 apresenta as questões utilizadas para a realização da busca pelos trabalhos publicados sobre o tema.

Quadro 1: Questões elaboradas para pesquisas geral, específicas e estatísticas.

Identificação	Questões Detalhadas
QG1	Qual o potencial do uso de biocarvões como adsorvente no processo de despoluição de águas utilizando estruturas tridimensionais fabricadas em impressão 3D?
QS1	Quais as barreiras técnicas para produção de dispositivos em impressão 3D (3DP) com biocarvão?
QS2	Qual o potencial de adsorção e recuperação do biochar em estruturas tridimensionais?
QS3	Quais principais técnicas de impressão 3D foram empregadas?
QE1	Quantas e em quais periódicos as pesquisas foram publicadas?
QE2	Qual o país de origem das pesquisas?

Fonte: Autores.

### 2.2 Evidências

O procedimento de pesquisa teve início com a definição das bases de pesquisa dos artigos. Foi realizado um teste inicial aplicando os termos definidos para se obter o panorama atual da área. As bases Crossref; Google Acadêmico; Lens.org; OpenAlex; Scopus; Semantic Scholar; e Web of Science foram testadas (Coelho *et al.*, 2024). De Oliveira *et al.* (2022) adotou as bases Scielo e Science Direct a fim de obter fontes de artigos em periódico, revisados por pares, e nas línguas portuguesa e inglesa. Jagadeesh &, Sundaram (2024) utilizaram em sua revisão as bases Science Direct e Google Scholar. A partir desses e de outros estudos de revisão sistemática da

literatura, bem como os resultados preliminares, este artigo adotou as bases Scielo, Periódicos da CAPES, Science Direct e Google Scholar para obtenção dos artigos estudados.

Com as bases escolhidas, foram definidas as palavras (*strings*) de busca que se baseiam nas questões de pesquisa e objetivam o maior número de artigos indexados sobre o tema. Todas as palavras e termos utilizados nas buscas foram em língua inglesa. As palavras utilizadas na etapa de pesquisa foram: biocarvão (*biochar*), adsorção (*adsorption*), águas residuais (*Wastewater*); Impressão 3D (*3D Printing / 3DP / additive manufacturing*). Para refinar as buscas, foram utilizados os operadores booleanas lógicos “AND” e “OR”, com o objetivo de combinar termos ou expressões de busca, bem como um operador de proximidade (aspas) para buscar termos compostos, pois esse operador determina a distância máxima entre termos ou expressões em um documento, tornando a busca mais objetiva.

A partir dos resultados encontrados, o método PRISMA define critérios de elegibilidade baseado em critérios de inclusão (CI) e critérios de exclusão (CE) dos artigos encontrados. Os critérios foram definidos conforme o quadro 2, e sendo feita a primeira exclusão com base no ano de publicação do artigo, sendo retirados os anteriores à 2020, e tendo como ponto de corte 12/02/2025. Iniciou-se a pesquisa com o termo *Biochar*, nesse filtro foram encontrados 62.264 trabalhos, sendo 159 na base Scielo, 26313 na base Periódicos CAPES, 11292 na base Science direct e 24500 na base Google Scholar. Quando filtrados adicionando *AND water* o número de trabalhos foi reduzido para 46, 12615, 3745 e 1700, respectivamente. Uma segunda rodada de filtros adicionando o termo *AND Adsorption* foi realizado, tendo como resultados da busca 13 trabalho na base Scielo, 7126 na base periódicos CAPES, 1927 na base Science Direct, e 259 na base Google Scholar. Por fim foram filtrados e excluídos trabalhos como congressos, livros e capítulos de livros, permanecendo apenas artigos em periódicos indexados.

Quadro 2: Critérios de inclusão e exclusão de dados.

Identificação	Questões Detalhadas
CI1	Publicações e Inglês e Português
CI2	Estudos que abordem o uso do biocarvão
CI3	Trabalhos que abordem processos/projetos de despoluição
CE1	Artigos Publicados antes de 2020
CE2	Estudos publicados em congresso, livros ou capítulo de livros
CE3	Artigos que não utilizam o mecanismo de adsorção
CE4	Artigos que não utilizam impressão 3D para obter a estrutura tridimensional

Fonte: Autores.

Com isso, os 9325 trabalhos foram analisados através do título e palavras-chave como biocarvão, adsorção e água. Nessa etapa de filtragem, foram excluídos os trabalhos que não abordassem estruturas tridimensionais ou peças produzidas por impressão 3D nos dispositivos propostos, foco proposto neste estudo. Para isso foi utilizado o termo *3DP OR 3D print OR 3D Printing OR additive manufacturing*, para realizar a filtragem correspondente ao Critério de Exclusão 4 (CE4). A filtragem resultou num total de 127 artigos, que estavam distribuídos entre 38 trabalhos no periódico CAPES, 65 no Google Acadêmico, 24 no Science Direct e 0 na plataforma Scielo.

Por fim, os trabalhos foram classificados por periódicos e por fator de impacto, e excluídas as publicações repetidas (15 artigos), obteve-se o total de 112 trabalhos analisados. Esses trabalhos foram baixados, seus resumos foram lidos a fim de identificar aqueles que atendiam às premissas e objetivos deste artigo. Ao final da análise qualitativa da temática, que foi realizada de forma individualizada, resultando em 35 trabalhos que contribuíram diretamente para as análises e avaliações realizadas.

O resumo do procedimento de busca e exclusão está descrito visualmente na Figura 1, onde pode-se observar a evolução dos filtros e a aplicação dos critérios de inclusão e exclusão.

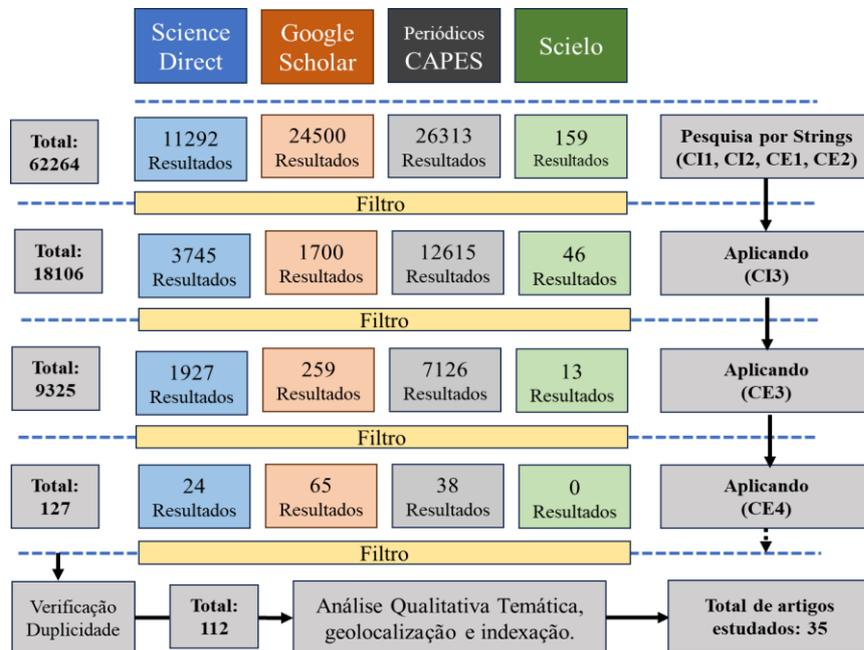


Figura 1: Etapas aplicadas do procedimento metodológico. Fonte: Autores.

### 2.3 Estrutura de Análise

A análise dos artigos selecionados foi realizada visando atender ao objetivo geral do trabalho e buscando responder às perguntas de pesquisa. A partir da análise qualitativa individualizada dos estudos, os principais artigos foram organizados em planilhas para uma análise sistemática dos resultados. Com foco nas perguntas de pesquisa, foram identificados softwares e bancos de dados utilizados para as análises qualitativas e quantitativas.

Buscando evitar a tendência na pesquisa, cada termo selecionado para as etapas de filtragem foi aplicado novamente nos artigos excluídos. Assim, reduzindo a possibilidade de algum trabalho ser eliminado erroneamente.

## 3. Resultados e Discussões

A discussão dos resultados foi dividida de forma a responder às questões de pesquisa. Para a discussão das questões de pesquisa, foram utilizados os artigos selecionados com base nos critérios apresentados no tópico de procedimentos metodológicos.

### 3.1. QG1. Qual o potencial do uso de biocarvões como adsorvente no processo de despoluição de águas utilizando estruturas tridimensionais fabricadas em impressão 3D?

O biocarvão é um material poroso e rico em carbono, derivado da pirólise de biomassa, com uma alta área superficial e diversos grupos funcionais que o tornam **eficaz na adsorção de poluentes em água** (Song *et al.*, 2023; Wei *et al.*, 2024; Zhang *et al.*, 2022). É capaz de adsorver diversos tipos de poluentes, incluindo metais pesados como Cobre (Cu) (Xiong *et al.*, 2023; Yan *et al.*, 2021a) chumbo (Pé) (Wang *et al.*, 2023; Zhang *et al.*, 2022; Mahmoud *et al.*, 2021),



Cádmio (Cd) (Jin *et al.*, 2024) e Arsênio (As) (Xiong *et al.*, 2023; Wei *et al.*, 2024), corantes orgânicos como o azul de metileno (MB) (Zhou *et al.*, 2024; Zhao *et al.*, 2024; Wang *et al.*, 2024b) e outros compostos orgânicos (Song *et al.*, 2023).

Sua aplicação em **estruturas tridimensionais em interface à impressão 3D** apresenta uma série de vantagens, como a possibilidade de criação de estruturas de biocarvão com geometrias complexas e controladas, otimizando a área de contato e a adsorção de poluentes (Zhou *et al.*, 2024; Silva *et al.*, 2023). O enfoque do projeto das estruturas 3D pode ser em facilitar a recuperação e reutilização do biocarvão após a adsorção, evitando perdas e aumentando a sustentabilidade do processo (Zhou *et al.*, 2024). As estruturas permitem a combinação de biocarvão com outros materiais, como hidrogéis (Silva *et al.*, 2023), argila (Shao *et al.*, 2024) ou aerogéis (Wei *et al.*, 2020), potencializando a capacidade de adsorção e a estabilidade mecânica do material compósito. Além disso, permite a produção de materiais com espessuras customizadas e condições operacionais predeterminadas, economizando tempo, custos e matérias-primas (Zhou *et al.*, 2024; Silva *et al.*, 2023). As estruturas fabricadas em impressão 3D permitem a criação de materiais com uma excelente capacidade de remoção de poluentes orgânicos, além de simplificar o processo de reutilização e facilitar a reciclagem de adsorventes (Zhou *et al.*, 2024; Silva *et al.*, 2023).

O enfoque da aplicação do biocarvão em estruturas tridimensionais é diverso, passando por **Sistemas Bioeletroquímicos (BESs)**, nos quais a utilização de biocarvão em eletrodos tridimensionais em BESs aumenta a área superficial específica, encurta a distância de transferência de massa e melhora a taxa de transferência de elétrons, resultando em uma maior eficiência na remoção de poluentes em águas residuais (Song *et al.*, 2023). Com o objetivo de **remoção de corantes**, onde o biocarvão dopado com nitrogênio, moldado em estruturas 3D, demonstra alta capacidade de adsorção e estabilidade a longo prazo para diversos corantes orgânicos, como azul de metileno (MB), cristal violeta (CV) e malachite green (MG) (Zhou *et al.*, 2024). Para a **descontaminação de solos e águas**, a combinação de argila e biocarvão em estruturas 3D impressas pode ser utilizada como catalisador para a degradação de poluentes como o levofloxacino, com baixa lixiviação de metais (Shao *et al.*, 2024). Visando a **remoção de produtos farmacêuticos**, compósitos de ZnAl/biocarvão produzidos em estruturas 3D mostraram um potencial notável para remover paracetamol, cetoprofeno e ibuprofeno de soluções aquosas (Moreno-Pérez *et al.*, 2021).

Adicionalmente, o uso de biocarvão derivado de resíduos (como casca de arroz ou resíduos de fermentação de antibióticos) não só reduz os custos, mas também contribui para a valorização de resíduos e a sustentabilidade ambiental (Zhou *et al.*, 2024). A combinação de biocarvão e estruturas tridimensionais de impressão 3D oferece uma abordagem promissora e eficiente para a despoluição de águas, proporcionando alta capacidade de adsorção, flexibilidade de design, facilidade de recuperação e potencial de reutilização.

### 3.2. QS1. Quais as barreiras técnicas para produção de dispositivos em impressão 3D (3DP) com biocarvão?

A aplicação dos biocarvões em interface à tecnologia de impressão 3D envolve desafios ligados às limitações do próprio processo produtivo e do material em si. Os artigos selecionados apresentam quatro principais categorias como barreiras técnicas: (i) **desafios na formulação do material** de elaboração do dispositivo, que inclui a viscosidade do material de forma adequada à capacidade de extrusão do equipamento (Zhou *et al.*, 2024), a dispersão uniforme do biocarvão na matriz, evitando aglomerações e o comprometimento das propriedades mecânicas do material, com potencial melhora com uso de técnicas como ultrassonicação para redução do tamanho de partículas (Mohammed, Jeelani, Rangari, 2022; Zouari *et al.*, 2022), e a compatibilidade entre o biocarvão e o material matriz, visando garantir boa adesão e evitar a



separação de fases, podendo ser mitigado pela modificação da superfície do biocarvão (Mohammed, Jeelani, Rangari, 2022); (ii) **os desafios no processamento do material**, que incluem, além do controle das propriedades do biocarvão, a otimização dos parâmetros de impressão, como velocidade, temperatura, altura da camada (Mayakrishnan *et al.*, 2022), e a estabilidade dimensional das peças impressas, que podem sofrer contração durante o resfriamento ou à deformação causada por tensões internas (Shao *et al.*, 2024); (iii) **desafios na integração do biocarvão**, que englobam a alta porcentagem de carregamento de biocarvão necessária, devido à comum baixa qualidade (Mohammed, Jeelani, Rangari, 2022), a manutenção de propriedades mecânicas, devido à baixa resistência mecânica dos biocarvões, podendo ser melhoradas por meio da formação de compósitos com outros materiais (Shao *et al.*, 2024) ou pelo tratamento do biocarvão, aumentando a área de superfície ativa e reduzindo a porcentagem de carregamento necessária (Mohammed, Jeelani, Rangari, 2022); (iv) **desafios de custo e escalabilidade**, incluindo o alto custo de alguns materiais e processos de dispositivos com biocarvão impressos 3D, limitando a viabilidade econômica em larga escala (Wu *et al.*, 2022), e a escalabilidade limitada pela própria tecnologia, demonstrando a necessidade do desenvolvimento de tecnologias de impressão 3D visando o aumento da capacidade de produção (Mayakrishnan *et al.*, 2023). Dessa forma, o projeto de dispositivo que incorporará o biocarvão utilizando tecnologias de manufatura aditiva enfrenta as limitações impostas por cada processo - que pode variar entre o processamento de materiais sólidos, líquidos ou pulverizados transformados em peças tridimensionais por distintas rotas - e a adaptação do material selecionado para o carregamento de biocarvão.

### 3.3. QS2. Qual o potencial de adsorção e recuperação do *biochar* em estruturas tridimensionais?

O biocarvão em estruturas tridimensionais apresenta um alto potencial de adsorção e recuperação devido às suas propriedades únicas e à capacidade de serem moldadas para aplicações específicas. Os artigos analisados exploram diferentes potenciais de uso do biocarvão em estruturas tridimensionais focadas na **adsorção de diversos poluentes**, incluindo íons de metais pesados (Yan *et al.*, 2021b; Roy *et al.*, 2022; Xiong *et al.*, 2023), corantes orgânicos (Zhou *et al.*, 2024; Zhao *et al.*, 2024), antibióticos (Chen *et al.*, 2021) e outros compostos orgânicos (Moreno-Pérez *et al.*, 2021; Beagan *et al.*, 2023). A modificação do biocarvão, como a dopagem com nitrogênio (N) (Zhou *et al.*, 2024), a funcionalização com heteroátomos como N/S/P, ou a combinação com nanopartículas magnéticas, pode aumentar ainda mais sua capacidade de adsorção, criando sítios de ancoragem para metais e promovendo interações favoráveis com poluentes orgânicos (Wang *et al.*, 2024c). A utilização de CaCO<sub>3</sub> como gerador de poros sacrificiais durante a impressão 3D de biocarvão aumenta a eficiência da transferência de massa e expõe mais sítios ativos, resultando em um melhor desempenho de adsorção (Zhou *et al.*, 2024).

A **estrutura tridimensional** tem forte influência no potencial de adsorção. A impressão 3D, por exemplo, permite a criação de estruturas de biocarvão com geometrias complexas e controladas, otimizando a área de contato e a difusão de poluentes (Zhou *et al.*, 2024; Silva *et al.*, 2023). A formulação do biocarvão em estruturas 3D, como esferas de alginato, por exemplo, é a chave para mitigar problemas como separação, transporte, limpeza e entupimento pelo uso de partículas finas dispersas e permitir sua recuperação (Chen *et al.*, 2021). A combinação de biocarvão com outros materiais, como hidrogéis (Silva *et al.*, 2023) ou aerogéis de óxido de grafeno reduzido (Wei *et al.*, 2020), em estruturas 3D pode sinergicamente melhorar a capacidade de adsorção e a estabilidade mecânica do material compósito.

Outro fator de grande enfoque é a **reutilização e regeneração das estruturas**, uma vez que o biocarvão pode ser regenerado por meio de diferentes métodos, como tratamento térmico,

lavagem com solventes (Wang *et al.*, 2024b) ou dessorção ácida (Wei *et al.*, 2024), permitindo a remoção dos poluentes adsorvidos e a restauração da capacidade de adsorção do material. A reutilização do biocarvão reduz os custos operacionais e minimiza a geração de resíduos, tornando o processo de tratamento mais econômico e ambientalmente amigável (Silva *et al.*, 2023). Estudos mostram que o biocarvão mantém uma eficiência de adsorção considerável mesmo após vários ciclos de reutilização (Wang *et al.*, 2024b; Yang *et al.*, 2024), demonstrando sua durabilidade e potencial para aplicações de longo prazo. Em resumo, o biocarvão em estruturas tridimensionais oferece uma solução promissora para a remoção de poluentes da água, combinando alta capacidade de adsorção, flexibilidade de design e facilidade de recuperação e reutilização.

### 3.4. QS3. Quais principais técnicas de impressão 3D foram empregadas?

As principais técnicas de impressão 3D (3DP) empregadas, de acordo com os artigos selecionados, incluem: **Direct Ink Writing (DIW)**, que envolve a injeção direta de materiais como tinta através de um bico em locais específicos, camada por camada, para fabricar diversos produtos. É utilizada para imprimir adsorventes monolíticos de biocarvão dopado com nitrogênio (Zhou *et al.*, 2024). **Fused Deposition Modeling (FDM)**, processo por meio do qual um filamento termoplástico aquecido é inserido no bico e o material é depositado com base em um modelo de design auxiliado por computador (CAD). Foi utilizada para preparar filmes de TPU/biochar (Mayakrishnan *et al.*, 2023). **Binder jetting** é uma técnica que, combinada com a moldagem por deposição líquida, garante a alimentação contínua da pasta de extrusão (Shao *et al.*, 2024). Foram citadas, ainda, como tecnologias de impressão 3D aplicadas a **Esterolitografia** (Shao *et al.*, 2024), a **Impressão 3D de concreto** (Wang *et al.*, 2024a) e a **Impressão 3D de hidrogel** (Silva *et al.*, 2023).

### 3.5. QE1. Quantos e em quais periódicos as pesquisas foram publicadas?

As 35 publicações selecionadas foram publicadas em 26 diferentes revistas, conforme apresentado na Figura 2. A média do site score e do fator de impacto das publicações foram 8,32 e 4,52, respectivamente. Observa-se que os maiores números de publicações estão nos periódicos *Environmental Pollution* (Site Score 16,0 e Fator de Impacto 7,6) e *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects* (Site Score 8,7 e Fator de Impacto 4,9). Destaca-se que as revistas com 2 ou mais artigos apresentam como média o Site Score 15,68 e Fator de Impacto 8,5.

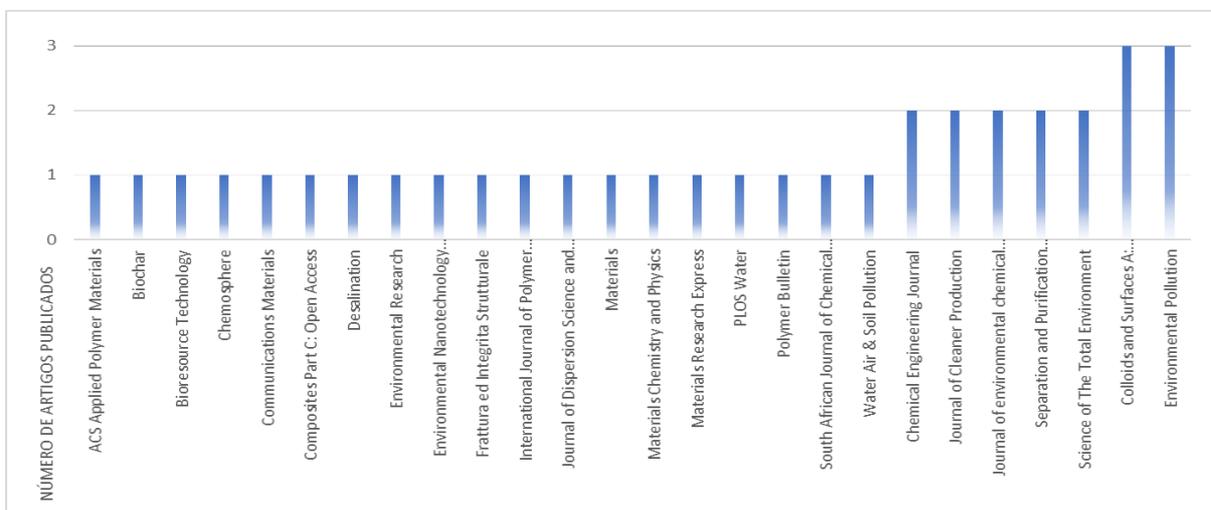


Figura 2: Periódicos onde os estudos foram publicados. Fonte: Autores.

### 3.6. QE2. Qual o país de origem das pesquisas?

Analisando estatisticamente os resultados encontrados *versus* o país de origem da afiliação institucional desses pesquisadores, identificou-se que a China, Índia, Arabia Saudita, Estados Unidos e Brasil apresentam respectivamente o maior número de contribuições. Respectivamente, cada país contribuiu com 21, 4, 4, 4 e 2 publicações. Das 35 publicações analisadas obtém-se um total de 203 autores, sendo destes 141 chineses, 12 norte americanos, 10 indianos, 10 sauditas, 8 brasileiros, 5 egípcios, 5 bengaleses, além de suíços, mexicanos, poloneses, alemães e eslovenos. A Figura 3 apresenta o mapa de calor da origem dos autores.

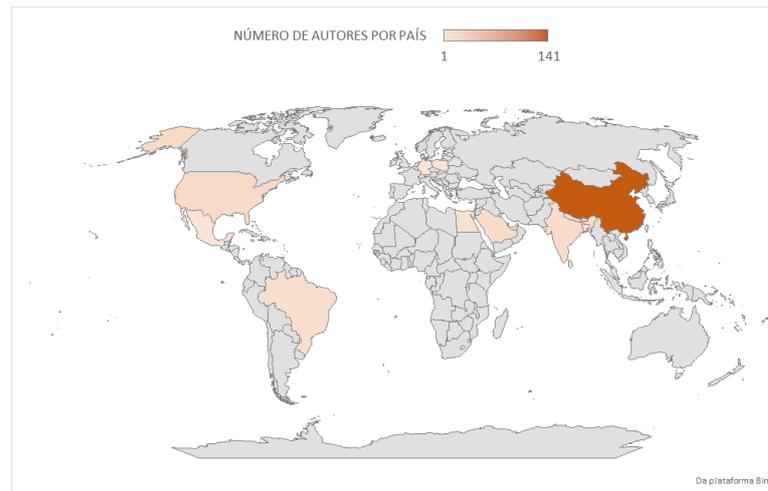


Figura 3: Países de origem dos autores das publicações analisadas. Fonte: Autores.

Alguns fatores podem justificar os resultados encontrados. A china apresenta um forte desenvolvimento científico e econômico nos últimos anos, além de fazer parte do grupo de maiores produtores agrícolas mundiais junto aos EUA, Brasil, Índia e Rússia. Cabe lembrar que os resíduos agrícolas são grande fonte para obtenção do biocarvão, e o elevado número de estudos chineses podem demonstrar uma preocupação do país com o aproveitamento dessa fonte de recursos (DE OLVEIRO *et. al.*, 2022).

No entanto, um fator que chama atenção, além do grande número de publicações, é o número de autores por artigos. A análise apresentada na Figura 4 considerou o total de autores dividido pelo número de artigos de cada país. Nota-se que a média geral fica em torno de 5,97 autores por artigo, enquanto a mediana está em 3 autores por artigo. A China se destaca com uma média de autores acima do normal, tendo 4 publicações com mais de 10 autores vinculados.

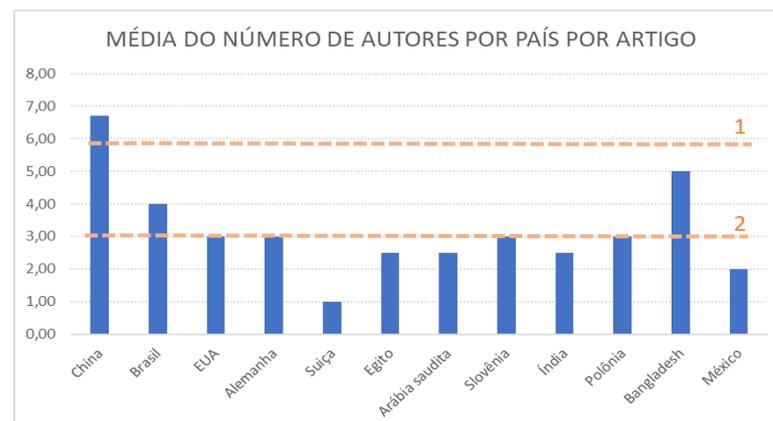


Figura 4: Número médio de autores por país (1. média geral / 2. mediana geral). Fonte: Autores.



#### 4. Considerações Finais

Esta revisão sistemática examinou estudos sobre os potenciais do biocarvão (*biochar*) como adsorvente no tratamento de águas residuais, especialmente os aplicados em estruturas tridimensionais por meio da manufatura aditiva. Os trabalhos analisados indicam que a impressão 3D permite a otimização das estruturas com biocarvão, aprimorando sua estabilidade mecânica, capacidade de adsorção e eficiência na remoção de poluentes. A versatilidade geométrica viabiliza o controle da porosidade e melhora a recuperação e reutilização dos materiais, favorecendo a sustentabilidade do processo.

Entretanto, alguns desafios ainda persistem, como a correta formulação dos compósitos, a compatibilidade do *biochar* com diferentes matrizes poliméricas e o desenvolvimento de processos de regeneração mais eficientes são aspectos críticos que demandam avanços. Além disso, a escalabilidade da manufatura aditiva e a viabilidade econômica de algumas tecnologias ainda representam barreiras à implementação em larga escala.

Dessa forma, conclui-se que a integração entre *biochar* e manufatura aditiva constitui uma estratégia inovadora para o desenvolvimento de tecnologias avançadas de despoluição hídrica. O estudo contribui para o avanço do conhecimento ao demonstrar que a impressão 3D pode potencializar as aplicações do biocarvão, abrindo novas perspectivas para pesquisas futuras e aplicações industriais no contexto da remediação ambiental.

#### Agradecimentos

Os autores agradecem ao Conselho Nacional do Desenvolvimento Científico e Tecnológico - CNPq, e à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG), pela concessão de bolsas e auxílio financeiro durante o período de desenvolvimento deste estudo. Agradecemos as instituições Universidade do Estado de Minas Gerais - UEMG, e Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais - CEFET-MG pelo apoio e infraestrutura disponibilizada para pesquisa.



## Referências

- ANDERSON, M. A.; DURGESH, V.; BAKER, M.; YU, P.; MÖLLER, G. Biomimetic crossflow filtration with wave minimal surface geometry for particulate biochar water treatment. **PLOS Water**, v. 2, n. 1: e0000055, 2023. <https://doi.org/10.1371/journal.pwat.0000055>
- ASHBY, M.; JOHNSON, M.: **Design Industrial: Materiais e processos de fabricação**. São Paulo: Blücher, 2011.
- BEAGAN, A.; FETOUH, H. A.; ZHONG, D. L.; MOHAMED, M. E. Eco-friendly approach for the construction of biochar-based superhydrophobic membrane for effective oil/water separation. **Materials Research Express**, V.10, N. 8, 2023. DOI <http://doi.org/10.1088/2053-1591/acf02b>
- CHEN, J.; OUYANG, J. CAI, X.; XING, X.; ZHOU, L.; LIU, Z.; CAI, D. Removal of ciprofloxacin from water by millimeter-sized sodium alginate/H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub> activated corncob-based biochar composite beads, **Separation and Purification Technology**, V. 276, 2021, ISSN 1383-5866, <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2021.119371>
- DE OLIVEIRA, Jordana; MODOLO, Regina Célia Espinosa; GONZÁLEZ, Marco Aurélio Stumpf. Bim como suporte à avaliação do ciclo de vida de edifícios: uma revisão sistemática. **MIX Sustentável**, [S.l.], v. 8, n. 4, p. 45-58, ago. 2022. ISSN: 2447-3073. Disponível em:<<http://www.nexos.ufsc.br/index.php/mixsustentavel>>. Acesso em: 08/02/2025. Doi: <https://doi.org/10.29183/2447-3073.MIX2021.v8.n4.49-62>
- FEDEROWICZ, K.; CENDROWSKI, K.; SIKORA, P. Low-carbon cementitious composite incorporated with biochar and recycled fines suitable for 3D printing applications: hydration, shrinkage and early-age performance. **Fracture and Structural Integrity**, V. 19, N.71, P. 91–107, 2024. <https://doi.org/10.3221/IGF-ESIS.71.08>
- JAGABA, A. H.; LAWAL, D. U.; YASSIN, M. A.; ABDULAZEEZ, I.; MU'AZU, N. D.; USMAN, A. K.; LIM, J. W.; ALJUNDI, I. H. Nickel augmented biochar for sustaining produced water treatment to decarbonize oil and gas industrial waste using anaerobic-aerobic granular cylindrical periodic discontinuous batch reactors, **Environmental Research**, V. 257, 2024. ISSN 0013-9351, <https://doi.org/10.1016/j.envres.2024.119381>
- JAGADEESH, N.; SUNDARAM, B. Adsorption of Pollutants from Wastewater by Biochar: A Review. **Journal of Hazardous Materials Advances**, V. 9, 2023, ISSN 2772-4166, <https://doi.org/10.1016/j.hazadv.2022.100226>
- JIN, Z.; XUE, Z.; LI, B.; OU, L.; YAN, L.; YANG, L.; YIN, K.; JOUHA, J.; SHAO, P.; ZENG, Z.; LUO, S. High-performance spent coffee grounds-based 3D microporous biochar for the efficient capture of Cd<sup>2+</sup> via a multi-pathway mechanism, **Chemical Engineering Journal**, V. 485, 2024, ISSN 1385-8947, <https://doi.org/10.1016/j.cej.2024.149537>
- LI, R.; WU, Y.; LOU, X.; LI, H.; CHENG, J.; SHEN, B.; QIN, L. Porous Biochar Materials for Sustainable Water Treatment: Synthesis, Modification, and Application. **Water**, v.15, 395, 2023a. <https://doi.org/10.3390/w15030395>
- LI, X.; ZENG, J.; ZUO, S.; LIN, S.; CHEN, G. Preparation, Modification, and Application of Biochar in the Printing Field: A Review. **Materials**, 16, 5081, 2023b. <https://doi.org/10.3390/ma16145081>
- MAHMOUD, M. E.; ABOUELANWAR, M. E.; MAHMOUD, S. E. M. E.; SALAM, M. A. Doping starch-gelatin mixed hydrogels with magnetic spinel ferrite@biochar@molybdenum oxide as a highly efficient nanocomposite for removal of lead (II) ions. **Journal of**



**Environmental Chemical Engineering**, V. 9, I. 6, 2021, ISSN 2213-3437.  
<https://doi.org/10.1016/j.jece.2021.106682>.

MAYAKRISHNAN, V.; MOHAMED, J. K.; SELVARAJ, N. Effect of nano-biochar on mechanical, barrier and mulching properties of 3D printed thermoplastic polyurethane film. **Polym. Bull.**, v. 80, p. 6725–6747, 2023. <https://doi.org/10.1007/s00289-022-04380-2>

MENEZES, B. L. O., DA ROCHA JR, F. R., WESZ, G. N., SOUSA, Í D. H., LIMA, R. G. S., MENDONÇA, L. C., Barbosa, T. A. Biochar in wastewater treatment: a systematic mapping. **Journal of Urban and Environmental Engineering (JUEE)**, n.16, v.2, p.215-220, 2022.

MISHRA, S. R.; GADORE, V.; AHMARUZZAMAN, MD. Novel 3D sphere-like  $\beta$ -In<sub>2</sub>S<sub>3</sub>/Biochar nanoflowers for remediation of dyes in single and binary systems and interpretation using statistical physical modeling. **Environmental Nanotechnology, Monitoring & Management**, V. 20, 2023, ISSN 2215-1532, <https://doi.org/10.1016/j.enmm.2023.100807>

MOHAMMED, Z.; JEELANI, S.; RANGARI, V. Effective reinforcement of engineered sustainable biochar carbon for 3D printed polypropylene biocomposites. **Composites Part C: Open Access**, V. 7, 2022, ISSN 2666-6820. <https://doi.org/10.1016/j.jcomc.2021.100221>

MORAES, D.; IIDA, I.; DIAS, R. A. **Cadernos de estudos avançados em Design: inovação**. Barbacena: EdUEMG, 2012.

MORENO-PÉREZ, J.; PAULETTO, P. S.; CUNHA, A. M.; BONILLA-PETRICIOLET, Á.; SALAU, N. P. G.; DOTTO, G. L. Three-dimensional mass transport modeling of pharmaceuticals adsorption inside ZnAl/biochar composite. **Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects**, V. 614, 2021, ISSN 0927-7757, <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2021.126170>

MUOGHALU, C. C.; OWUSU, P. A.; LEBU, S.; NAKAGIRI, A.; SEMIYAGA, S.; IORHEMEN, O. T.; MANGA, M. Biochar as a novel technology for treatment of onsite domestic wastewater: A critical review. *Front. Environ. Sci.* v.11, 2023. doi: 10.3389/fenvs.2023.1095920

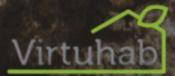
OLIVEIRA, A. R., BARBOSA, T. A., MENDONÇA, L. C. Adsorção de poluentes em águas residuárias utilizando biocarvão: revisão sistemática. *Research, Society and Development*, n. 12, v. 4, 2023. ISSN 2525-3409, DOI: <http://dx.doi.org/10.33448/rsd-v12i4.41228>

PAGE, Matthew J. et al. The PRISMA 2020 statement: an updated guideline for reporting systematic reviews. **BMJ**, v. 372, n. 71, p. n71, 29 Mar 2021. <http://dx.doi.org/10.1136/bmj.n71>

ROY, H.; PRANTIKA, T. R.; RIYAD, M. H.; PAUL, S.; ISLAM, M. Synthesis, characterizations, and RSM analysis of Citrus macroptera peel derived biochar for textile dye treatment. **South African Journal of Chemical Engineering**, V. 41, 2022, P. 129-139, ISSN 1026-9185, <https://doi.org/10.1016/j.sajce.2022.05.008>.

SHAO, Y.; WANG, J.; WU, H.; YAN, Y.; JIN, Q.; ZHANG, X. Shape stability control of a 3D-printed clay/biochar-based monolith to support Fe catalyst for continuous levofloxacin degradation with low metal leaching. **Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects**, V. 680, 2024, ISSN 0927-7757, <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2023.132664>.

SHI, Y., HU, H., & REN, H. Dissolved organic matter (DOM) removal from biotreated coking wastewater by chitosan-modified biochar: Adsorption fractions and mechanisms. *Bioresource Technology*, 297, 122281, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.122281>



- SILVA, E. C.; SOARES, V. R.; NÖRNBERG, A. B.; FAJARDO, A. R. Recyclable 3D-Printed Composite Hydrogel Containing Rice Husk Biochar for Organic Contaminants Adsorption in Tap Water. **ACS Applied Polymer Materials**, V. 5, N. 10, P. 8415-8429, 2023. DOI: <http://doi.org/10.1021/acsapm.3c01534>
- SONG, Z.; LIAO, R.; SU, X.; ZHANG, X.; ZHAO, Z.; SUN, F. Development of a novel three-dimensional biofilm-electrode system (3D-BES) loaded with Fe-modified biochars for enhanced pollutants removal in landfill leachate. **Science of The Total Environment**, V. 903, 2023, ISSN 0048-9697. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.166980>.
- SRIVASTAVA, S. Mechanical and water absorption characterization of rice husk and coconut coir reinforced biochar composites. **International Journal of Polymer Analysis and Characterization**, v. 29, N.6, P. 398–409, 2024. <https://doi.org/10.1080/1023666X.2024.2375254>
- STEPHANIE, H.; MLSNA, T. E.; WIPF, D. O. Functionalized biochar electrodes for asymmetrical capacitive deionization. **Desalination**, V. 516, 2021, ISSN 0011-9164, <https://doi.org/10.1016/j.desal.2021.115240>
- UDAY, V.; HARIKRISHNAN, P.S.; DEOLI, K.; ZITOUNI, F.; MAHLKENECHT, J.; KUMAR, M. Current trends in production, morphology, and real-world environmental applications of biochar for the promotion of Sustainability. **Bioresource Technology**. 356, 2022.
- WAN, H.; FU, X.; CHEN, Y.; ZHAO, L.; WANG, T.; LIU, Y. Biochar-based hydrogel evaporator with vertically arranged channels for efficient solar steam generation, desalination and water purification. **Separation and Purification Technology**, V. 359, n. 3, 2025, ISSN 1383-5866. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2024.130795>
- WANG, Y.; LI, J.; XU, L.; XU, Q.; WU, D.; AI, Y.; LI, D.; LIU, W.; QU, J.; WANG, L.; ZHANG, Y. The effect and spectral response mechanism of dissolved organic matter (DOM) in Pb(II) adsorption onto biochar. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, V. 11, N. 5, 2023, ISSN 2213-3437, <https://doi.org/10.1016/j.jece.2023.111115>
- WANG, L.; Nerella, V. N.; Li, D. Biochar-augmented climate-positive 3D printable concrete. **Commun Mater**, v. 5, n. 257, 2024a. <https://doi.org/10.1038/s43246-024-00700-3>
- WANG, L.; ZHOU, Z.; LI, X.; ZENG, L.; XU, W.; MA, Y.; CAI, J. Enhanced removal of methylene blue from water by mesopore-dominant biochar from kelp: Kinetic, equilibrium and thermodynamic studies. **Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects**, V. 688, 2024b, ISSN 0927-7757. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2024.133652>.
- WANG, Y.; YU, S.; YUAN, H.; ZHANG, L. Constructing N,S co-doped network biochar confined CoFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> magnetic nanoparticles adsorbent: Insights into the synergistic and competitive adsorption of Pb<sup>2+</sup> and ciprofloxacin. **Environmental Pollution**, V. 343, 2024c, ISSN 0269-7491, <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2023.123178>.
- WEI, C.; XIANG, C.; REN, E.; CUI, C.; ZHOU, M.; XIAO, H.; JIANG, S.; YAO, G.; SHEN, H.; GUO, R. Synthesis of 3D lotus biochar/reduced graphene oxide aerogel as a green adsorbent for Cr(VI). **Materials Chemistry and Physics**, V. 253, 2020, ISSN 0254-0584, <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2020.123271>
- WEI, M.; WANG, B.; WU, P.; ZHANG, X.; CHEN, M.; WANG, S. Electrolytic manganese residue-biochar composite for simultaneous removal of antimony and arsenic from water: Adsorption performance and mechanisms. **Journal of Cleaner Production**, V. 437, 2024, ISSN 0959-6526. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.140623>



WU, J.; WANG, T.; SHI, N.; MIN, F.; PAN, W.-P. Hierarchically porous biochar templated by in situ formed ZnO for rapid Pb<sup>2+</sup> and Cd<sup>2+</sup> adsorption in wastewater: Experiment and molecular dynamics study, **Environmental Pollution**, V. 302, 2022, ISSN 0269-7491, <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2022.119107>

XIONG, H.; HAN, L.; ZHANG, H. ET AL. A Micro-CT Approach for 3D In-Situ Visualizing the Cu (II) Adsorption in Corn Cob Biochar. **Water Air Soil Pollut**, v. 234, n. 2, 2023. <https://doi.org/10.1007/s11270-022-06014-9>

XIONG, Y. ZHANG, Z.; ZHANG, C.; XIAO, J. Foam-stability enhancement in biochar-infused foam concrete: Analyzing ionic strength, interparticle distance, and water state. **Journal of Cleaner Production**, V. 443, 2024, ISSN 0959-6526. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.141231>

YAN, L.; JIANG, S.; RAO, P.; LI, G.; HAO, Z./ HE, L.; SHANG, G. High-efficient removal of Cu(II) using biochar/ZnS composite: optimized by response surface methodology. **Journal of Dispersion Science and Technology**, v. 44, n.7, p. 1159–1169, 2021a. <https://doi.org/10.1080/01932691.2021.2008419>

YAN, Y.; WANG, W.; PENG, Y.; XUE, K.; WANG, J.; XIAO, H. Heterogeneous NiS/NiSe/3D porous biochar for As removal from water by interface engineering-induced nickel lattice distortion. **Science of The Total Environment**, V. 776, 2021b, ISSN 0048-9697, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021b.145874>

YANG, Z.; WANG, J.; ZHAO, N. ET.AL. A novel biochar-based 3D composite for ultrafast and selective Cr(VI) removal in electroplating wastewater. **Biochar**, v. 6, n. 46, 2024. <https://doi.org/10.1007/s42773-024-00338-x>

ZHANG, H.; TIAN, S.; ZHU, Y.; ZHONG, W.; QIU, R.; HAN, L. Insight into the adsorption isotherms and kinetics of Pb (II) on pellet biochar via in-situ non-destructive 3D visualization using micro-computed tomography. **Bioresource Technology**, V. 358, 2022a, ISSN 0960-8524, <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2022.127406>

ZHANG, M., HE, M., CHEN, Q., HUANG, Y., ZHANG, C., YUE, C., YANG, L., & MU, J. Feasible synthesis of a novel and low-cost seawater-modified biochar and its potential application in phosphate removal/recovery from wastewater. *Science of The Total Environment*, 824, 153833, 2022b. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.153833>

ZHAO, Q.; XU, T.; SONG, X.; NIE, S.; CHOI S-E.; SI, C. Preparation and Application in Water Treatment of Magnetic Biochar. *Front. Bioeng. Biotechnol*, v.9, 2021. doi: <https://doi.org/10.3389/fbioe.2021.769667>

ZHAO, X.; WANG, J.; ZHU, G.; ZHANG, S.; WEI, C.; LIU, C.; CAO, L.; ZHAO, S.; ZHANG, S. Efficient removal of high concentration dyes from water by functionalized in-situ N-doped porous biochar derived from waste antibiotic fermentation residue. **Chemosphere**, V. 364, 2024, ISSN 0045-6535. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2024.143215>

ZHOU, Z.; XU, K.; CHANGYONG LI, JIANBIN LIN, JUANJUAN BIAN, KANG SUN, JIANCHUN JIANG, SHU-FENG ZHOU, GUOWU ZHAN, Assembly of 3D printed N-doped biochar as impeller with CaCO<sub>3</sub> as sacrificial pore generator for enhanced dye adsorption. **Chemical Engineering Journal**, V. 497, 2024, ISSN 1385-8947. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2024.154661>

ZOUARI, M.; DEVALLANCE, D.B.; MARROT, L. Effect of Biochar Addition on Mechanical Properties, Thermal Stability, and Water Resistance of Hemp-Polylactic Acid (PLA). **Composites. Materials**, v. 15, 2022. <https://doi.org/10.3390/ma15062271>