

USO DE BIOCARVÃO PARA REMOÇÃO DE CONTAMINANTES EMERGENTES

Data de aceite: 02/06/2024

Jeiza Freitas Pinheiro

Instituto Federal de Educação, Ciência e
Tecnologia do Maranhão – IFMA
São Luís – Maranhão
<http://lattes.cnpq.br/2777510899319453>

Matheus Filipe Leitão de Oliveira

Instituto Federal de Educação, Ciência e
Tecnologia do Maranhão – IFMA
São Luís – Maranhão
<http://lattes.cnpq.br/9359108516367467>

Luciana Cutrim Dias

Instituto Federal de Educação, Ciência e
Tecnologia do Maranhão – IFMA
São Luís – Maranhão
<http://lattes.cnpq.br/5677108805593305>

Mayara Coelho Sá

Instituto Federal de Educação, Ciência e
Tecnologia do Maranhão – IFMA
São Luís – Maranhão
<http://lattes.cnpq.br/1599633391664436>

Edson Tobias de Jesus

Instituto Federal de Educação, Ciência e
Tecnologia do Maranhão – IFMA
São Luís – Maranhão
<http://lattes.cnpq.br/1712930825246145>

Gilmar Silvério da Silva

Instituto Federal de Educação, Ciência e
Tecnologia do Maranhão – IFMA
São Luís – Maranhão
<http://lattes.cnpq.br/6983165980341102>

Eliane Rodrigues de Sousa

Instituto Federal de Educação, Ciência e
Tecnologia do Maranhão – IFMA
São Luís – Maranhão
ID Lattes: 0356225771584504

1. INTRODUÇÃO

Os contaminantes emergentes (CEs) formam um grupo de poluentes químicos que podem provocar efeitos nocivos à saúde de seres humano e ao meio ambiente, sendo consideradas matérias orgânicas altamente complexas (CHENG *et al.*, 2021). De maneira geral, os CEs incluem produtos farmacêuticos, produtos de cuidados pessoais, disruptores endócrinos, antibióticos, entre outros (BO; SHENGEN; CHANG, 2016). Os CEs estão presentes em níveis muito baixos e a sua detecção não é simples. Alguns contaminantes persistem no meio ambiente e ficam por muito tempo. Em estudos realizados anteriormente foram encontrados mais de trinta tipos de CEs em águas residuais tratadas e não tratadas, água doce, águas pluviais agrícolas e urbanas (CHENG *et al.*, 2021).

CEs são introduzidos em ambientes aquáticos por várias rotas como a descarga direta de águas residuais brutas, hospitalares, estações de tratamento de águas residuais industriais, por lixiviamento de aterros sanitários, entre outros (TRAN; REINHARD; GIN, 2018). Alguns CEs, como produtos farmacêuticos e de cuidados pessoais, atuam como desreguladores endócrinos, que são compostos capazes de alterar as funções normais dos hormônios, provocando uma variedade de efeitos à saúde (EPA, 2023; NILSEN et al., 2019).

Portanto, estudos relacionados a remoção desses contaminantes em diferentes compartimentos ambientais são de interesse de muitos pesquisadores. O uso de novos materiais, levando-se em consideração uma metodologia sustentável e de baixo custo são normalmente alvos de pesquisas. Nesse contexto, destaca-se o uso de biocarvão para remoção de contaminantes emergentes do meio ambiente. O biocarvão é um material de carbono poroso produzido para as mais diferentes aplicações, principalmente pela sua excelente capacidade de adsorção de compostos orgânicos e inorgânicos. O biocarvão leva vantagem em relação a outros adsorventes, pois é considerado um adsorvente sustentável e econômico (JHA *et al.*, 2023). Além disso, a inclusão de propriedades magnéticas no biocarvão possibilitam uma separação eficiente do adsorvente da matriz em estudo. Desta forma, este capítulo visa descrever as principais características do uso de biocarvão para remoção de contaminantes emergentes em amostras ambientais.

2. CONTAMINANTES EMERGENTES (CEs)

O desenvolvimento de técnicas analíticas mais sensíveis revelou a presença de contaminantes emergentes (ECs, do inglês *Emerging contaminants*) em diferentes compartimentos ambientais, o que vem despertando o interesse para essa problemática (PURI; GANDHI; KUMAR, 2023).

Os ECs formam um grupo diversificado de compostos com composição química complexa, como produtos farmacêuticos e de cuidados pessoais, filtros UV, drogas ilícitas, pesticidas, entre outros (VELÉZ et al., 2019). Em suma, trata-se de contaminantes que estão presentes no ambiente em concentrações muito baixas, mas ainda assim são considerados nocivos à saúde de animais e seres humanos. São compostos que já foram utilizados por vários anos, mas não tínhamos conhecimento sobre efeitos adversos e novas substâncias que estão surgindo com o avanço tecnológico.

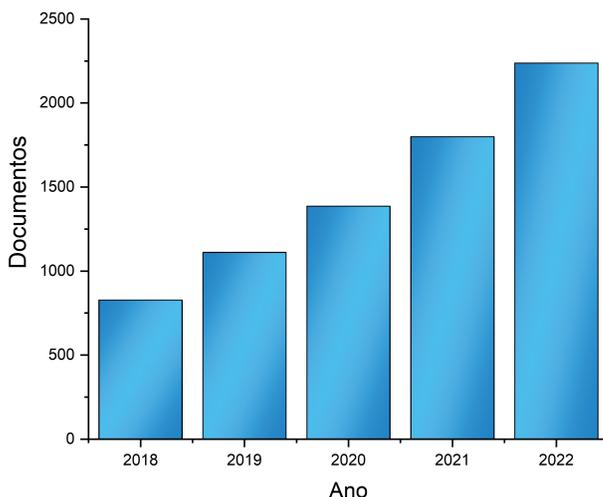
A presença de CEs no meio ambiente está relacionada ao desenvolvimento da indústria, urbanização desordenada, atividades de saúde, agricultura e transporte, onde incluem uma gama de substâncias produzidas pelo homem e que são consideradas indispensáveis para sociedade (VASILACHI *et al.*, 2021). Como são substâncias amplamente utilizadas pelos seres humanos, estas estão sendo introduzidas de forma contínua no ambiente aquático (LÓPEZ-ORTIZ *et al.*, 2018).

Foi realizada uma pesquisa na base de dados *Scopus* (Figuras 1-3), com o uso da palavras-chave “emerging contaminants” entre os anos de 2018-2022. O algoritmo

de busca utilizado foi: TITLE-ABS-KEY (Emerging contaminants) AND (LIMIT-TO (PUBYEAR,2022) OR LIMIT-TO (PUBYEAR,2021) OR LIMIT-TO (PUBYEAR,2020) OR LIMIT-TO (PUBYEAR,2019) OR LIMIT-TO (PUBYEAR,2018)).

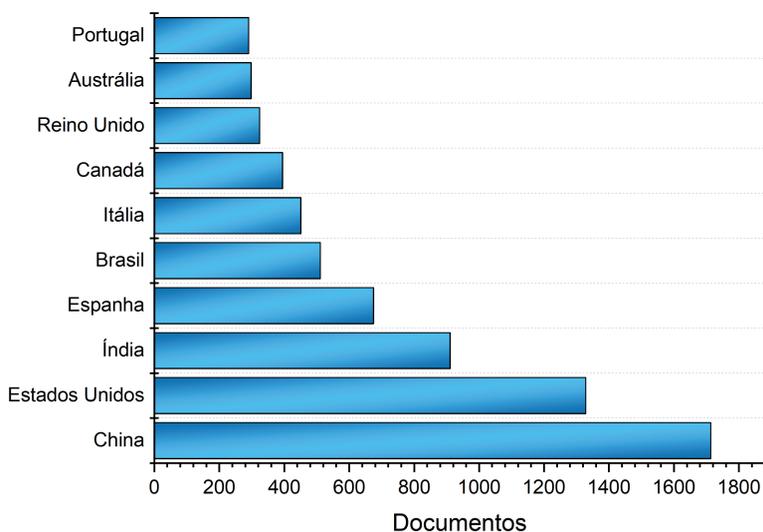
A busca revelou um total de 7361 resultados, onde verifica-se um aumento progressivo no número de publicações ao longo dos anos (Figura 1).

Figura 1- Número de publicações durante os últimos cinco anos (2018-2022). De acordo com pesquisa realizada na base de dados Scopus com o uso da palavra-chave “emerging contaminants”



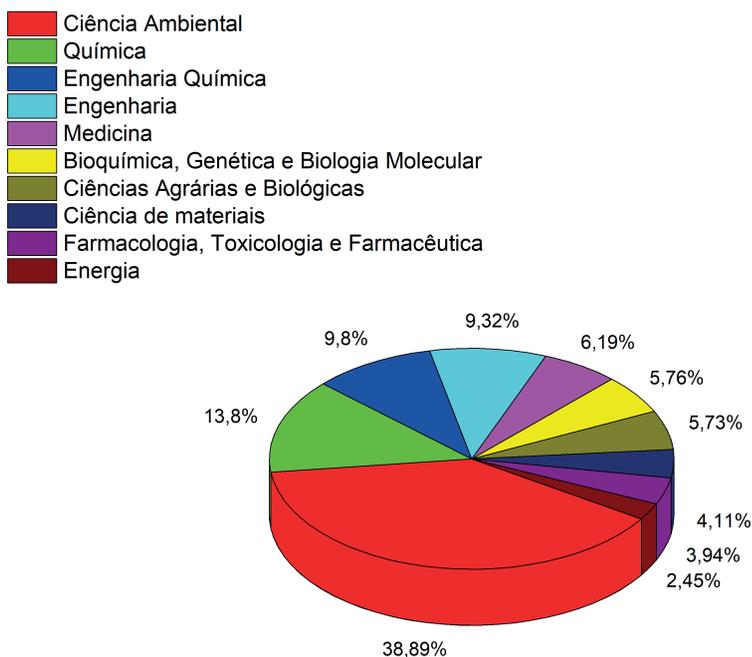
No *ranking* de países com maiores números de publicações estão a China com um total de 1713, Estados Unidos com 1328 e Índia com 911 publicações. O Brasil aparece na quinta posição no número de publicações, totalizando 511 (Figura 2).

Figura 2- *Ranking* de países como maiores números de publicações. De acordo com pesquisa realizada na base de dados Scopus com o uso da palavra-chave “emerging contaminants”.



A pesquisa demonstra, ainda, os principais países/territórios que mais publicam sobre a temática dos contaminantes emergentes (Figura 3), com destaque para Ciência Ambiental (38,89%), Química (13,8%) e Engenharia Química (9,8%).

Figura 3- Principais países/territórios que mais publicam sobre a temática dos contaminantes emergentes. De acordo com pesquisa realizada na base de dados Scopus com o uso da palavra-chave “emerging contaminants”.



Os dados representados na Figuras 1, 2 e 3 evidenciam a importância e preocupação de pesquisadores sobre a temática “contaminantes emergentes”. É importante ressaltar que a pesquisa filtrou resultados dos últimos quatro anos, levando-se em consideração a plataforma utilizada, ou seja, o número encontrado ainda é muito inferior a realidade de artigos já publicados. O que demonstra o quanto o assunto é atual e merece destaque para os pesquisadores e sociedade.

3. MÉTODOS PARA REMOÇÃO DE CONTAMINANTES EMERGENTES

Os principais métodos para remoção de CEs da água incluem o microbiano, eletroquímico, adsorção, processo de membrana e de oxidação química (CHENG *et al.*, 2021). A técnica de adsorção é considerada promissora para o tratamento de água, em virtude da sua natureza universal, operação simples e baixo custo, com capacidade de remoção de poluentes orgânicos de até 99,9% (ALI; ASIM; KHAN, 2012). O processo

de adsorção é um fenômeno de interação de superfície (ZBAIR; BENNICI, 2021), onde segundo Shahid et al., (2021) são utilizados adsorventes para adsorver determinados contaminantes (adsorvato) por meio de forças intermoleculares. O mecanismo de adsorção envolve interações π - π , forças de Van der Waals, atração eletrostática e outras interfaces hidrofóbicas. Dentre as principais vantagens da adsorção temos o esquema operacional simplificado, baixo custo e ampla disponibilidade de adsorventes (SOPHIA A.; LIMA, 2018). É comum na literatura estudos relacionados a aplicação de diferentes adsorventes para remoção de contaminantes emergentes conforme destacado na Figura 4.

Figura 4- Categorias de adsorventes usados para remoção de contaminantes emergentes.



Fonte: Adaptado de Vasilachi et al., 2021

Portanto, diferentes métodos já foram otimizados para redução dos impactos causados pelos CEs, porém, na maioria dos casos, há a necessidade de uso de equipamentos sofisticados, reagentes de alto custo e técnicas laboriosas. Sendo assim, a busca por materiais inovadores, de baixo custo e ambientalmente amigáveis são os principais alvos de investigações dos pesquisadores mundialmente. Nesse contexto, o uso de biocarvão (do inglês *biochar*) é considerado uma alternativa viável para usos ambientais, devido a sua alta área superficial específica, alta capacidade de adsorção, capacidade de troca iônica e microporosidade (UDAY *et al.*, 2022).

4. BIOCARVÃO

O biocarvão é um subproduto formado a partir de uma grande quantidade de matéria orgânica (biomassa), quando esta é aquecida em atmosfera limitada de oxigênio (SRIVATSAV *et al.*, 2020). O biocarvão pode ser preparado por diferentes técnicas, como o método hidrotérmico, gaseificação e pirólise (QIAN *et al.*, 2015), porém, a pirólise é considerada o processo mais utilizado (AMALINA *et al.*, 2022). Durante a pirólise a biomassa

é convertida em três produtos: bio-óleo, biogás e biocarvão (MATRAPAZI; ZABANIOTOU, 2020).

No processo de obtenção do biocarvão por pirólise, ocorre a decomposição da biomassa por influência do aumento da temperatura em ambientes com baixa concentração de oxigênio (MANYÀ; AZUARA; MANSO, 2018). Entre os tipos de pirólise, pirólise lenta e pirólise rápida, a pirólise lenta é amplamente aplicada pois favorece a produção eficiente do material (AL ARNI, 2018; KAN; STREZOV; EVANS, 2016; QIAN *et al.*, 2015), onde o biocarvão obtido é rico em átomos de carbono.

O biocarvão rico em carbono e apresenta uma excelente capacidade de adsorção, o que permite a remoção de contaminantes orgânicos e inorgânicos de águas residuais (AMBAYE *et al.*, 2021). Para Tan e colaboradores (2015), com relação as propriedades específicas do biocarvão, pode-se destacar sua estrutura porosa, grande área superficial específica, componentes minerais e grupos funcionais de superfície enriquecidos, tornando-o um adsorvente adequado para remoção de poluentes em soluções aquosas. Características como ser um material sustentável, de baixo custo e de fácil produção, tem dado grande visibilidade ao biocarvão (ELAIGWU *et al.*, 2014; QIAN *et al.*, 2015). Outro ponto crucial é que o biocarvão pode ser obtido a por diferentes fontes de biomassas, como resíduos agrícolas, resíduos florestais, esterco e resíduos provenientes de processos alimentícios (GUPTA *et al.*, 2022; SUTAR; PATIL; JADHAV, 2022). O biocarvão é também considerado uma alternativa para amenizar os problemas de emissão de gases do efeito estufa já que o processo de produção acontece em uma atmosfera limitada de oxigênio impedindo a formação de gás carbônico (CO₂). Essas qualidades tem atraindo a atenção de pesquisadores para estudos na área de produção e aplicação em tratamentos ambientais (ENAIME *et al.*, 2020).

5. BIOCARVÃO MAGNÉTICO

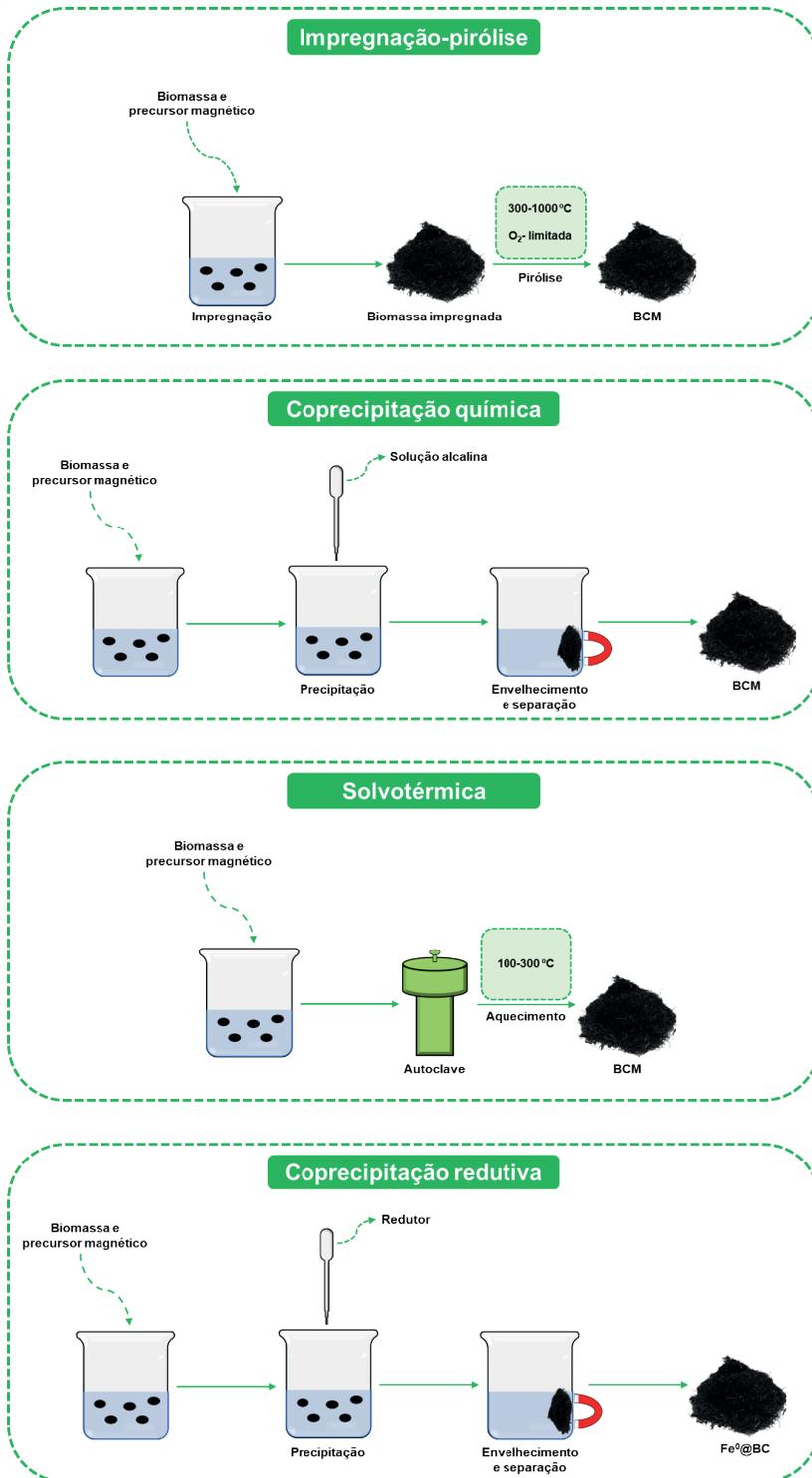
Apesar da eficiência de adsorção e propriedades especiais do biocarvão, problemas como o tamanho pequeno das partículas, capacidade de separação e reutilização do material após a adsorção dos CE's da água são problemas que precisam ser solucionados (LI *et al.*, 2020).

O biocarvão magnético (BCM) é um material composto de biocarvão carregado com partículas magnéticas, onde incorpora as propriedades do biocarvão e propriedades de separação magnética, logo o material é facilmente removido do meio aquoso (YI *et al.*, 2020). Segundo FENG e colaboradores (2021), três tipos de precursores magnéticos são utilizados para preparação do BCM: óxidos de ferro, sais de metais de transição e minérios de ferro naturais. Como o sal de metal de transição não é magnético por si só, este precisa de uma reação química de precipitação ou reação de redução térmica para transformá-los em uma substância magnética. Segundo os mesmos autores, atualmente, existem quatro

métodos mais utilizados para preparação do BCM: impregnação-pirólise, coprecipitação química, solvotérmica e coprecipitação redutora.

- Na impregnação-pirólise, a biomassa é impregnada na solução precursora magnética e, posteriormente, esta é colocada em ambiente sem ou limitado de oxigênio para tratamento térmico.
- Na coprecipitação química, o biocarvão é disperso na solução precursora magnética e, em seguida deixa-se cair uma solução alcalina na solução, onde ocorre uma precipitação magnética na superfície do biocarvão.
- No método solvotérmico, à mistura contendo o biocarvão e precursores magnéticos é colocada em uma autoclave a 100-300 °C. Normalmente são adicionados aos métodos solvotérmicos redutores, sais alcalinos e surfactantes.
- No método de coprecipitação redutora ocorre a adição de uma solução mista de sal de ferro e biocarvão, onde o Fe^{3+} e Fe^{2+} é reduzido a ferro de valência zero e depositado na superfície do biocarvão. A Figura 5 resume os métodos citados.

Figura 5- Diagrama esquemático dos principais métodos de preparo do biocarvão magnético



Fonte: Adaptado de Feng et al., 2021.

O uso de BCM para remediação ambiental é uma alternativa promissora, pois o preparo é simples e diversificado, como visto na Figura 5, além disso é rápido, econômico e ecologicamente correto, em virtude, principalmente, da separação eficiente do adsorvente da amostra aquosa.

6. Usos gerais do biocarvão e perspectivas

A busca por materiais para remoção eficientes de contaminantes emergentes em diferentes compartimentos ambientais é sem dúvida uma preocupação atual que merece destaque mundial, em decorrência principalmente dos efeitos nocivos que estes causam ao meio ambiente e seres humanos. Porém, atualmente, o material precisa apresentar características significativas que vão além da eficiência de remoção de determinados contaminantes, como métodos de preparo rápidos, de baixo custo e ambientalmente amigáveis. O biocarvão une todas essas características e, portanto, vem se tornando um material promissor para as mais diferentes finalidades.

Nos dias atuais, vários autores buscam ainda mais melhorias para o biocarvão, como aumento da área superficial específica e porosidade, com ativação química ou física, uso de biocarvão magnético, entre outros. Em todos os casos, é notória a preocupação de pesquisadores em proporcionar melhorias ao biocarvão e utilizá-lo em pesquisas relacionadas ao meio ambiente.

REFERÊNCIAS

AL ARNI, S. Comparison of slow and fast pyrolysis for converting biomass into fuel. **Renewable Energy**, vol. 124, p. 197–201, 1 Aug. 2018. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.04.060>.

ALI, I.; ASIM, M.; KHAN, T. A. Low cost adsorbents for the removal of organic pollutants from wastewater. **Journal of Environmental Management**, vol. 113, p. 170–183, 30 Dec. 2012. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2012.08.028>.

AMALINA, F.; RAZAK, A. S. A.; KRISHNAN, S.; ZULARISAM, A. W.; NASRULLAH, M. A comprehensive assessment of the method for producing biochar, its characterization, stability, and potential applications in regenerative economic sustainability – A review. **Cleaner Materials**, vol. 3, 1 Mar. 2022. <https://doi.org/10.1016/j.clema.2022.100045>.

AMBAYE, T. G.; VACCARI, M.; VAN HULLEBUSCH, E. D.; AMRANE, A.; RTIMI, S. Mechanisms and adsorption capacities of biochar for the removal of organic and inorganic pollutants from industrial wastewater. **International Journal of Environmental Science and Technology**, vol. 18, no. 10, p. 3273–3294, 1 Oct. 2021. <https://doi.org/10.1007/s13762-020-03060-w>.

BO, L.; SHENGEN, Z.; CHANG, C.-C. Emerging Pollutants - Part II: Treatment. **Water Environment Research**, vol. 88, no. 10, p. 1876–1904, 3 Sep. 2016. <https://doi.org/10.2175/106143016x14696400495857>.

CHENG, N.; WANG, B.; WU, P.; LEE, X.; XING, Y.; CHEN, M.; GAO, B. Adsorption of emerging contaminants from water and wastewater by modified biochar: A review. **Environmental Pollution**, vol. 273, 15 Mar. 2021. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2021.116448>.

ELAIGWU, S. E.; ROCHER, V.; KYRIAKOU, G.; GREENWAY, G. M. Removal of Pb²⁺ and Cd²⁺ from aqueous solution using chars from pyrolysis and microwave-assisted hydrothermal carbonization of *Prosopis africana* shell. **Journal of Industrial and Engineering Chemistry**, vol. 20, no. 5, p. 3467–3473, 25 Sep. 2014. <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2013.12.036>.

ENAIME, G.; BAÇAOUI, A.; YAACOUBI, A.; LÜBKEN, M. Biochar for wastewater treatment-conversion technologies and applications. **Applied Sciences (Switzerland)**, vol. 10, no. 10, 1 May 2020. <https://doi.org/10.3390/app10103492>.

FENG, Z.; YUAN, R.; WANG, F.; CHEN, Z.; ZHOU, B.; CHEN, H. Preparation of magnetic biochar and its application in catalytic degradation of organic pollutants: A review. **Science of the Total Environment**, vol. 765, 15 Apr. 2021. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.142673>.

GUPTA, M.; SAVLA, N.; PANDIT, C.; PANDIT, S.; GUPTA, P. K.; PANT, M.; KHILARI, S.; KUMAR, Y.; AGARWAL, D.; NAIR, R. R.; THOMAS, D.; THAKUR, V. K. Use of biomass-derived biochar in wastewater treatment and power production: A promising solution for a sustainable environment. **Science of the Total Environment**, vol. 825, 15 Jun. 2022. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.153892>.

JHA, S.; GAUR, R.; SHAHABUDDIN, S.; TYAGI, I. Biochar as Sustainable Alternative and Green Adsorbent for the Remediation of Noxious Pollutants: A Comprehensive Review. **Toxics**, vol. 11, no. 2, 1 Feb. 2023. <https://doi.org/10.3390/toxics11020117>.

KAN, T.; STREZOV, V.; EVANS, T. J. Lignocellulosic biomass pyrolysis: A review of product properties and effects of pyrolysis parameters. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, vol. 57, p. 1126–1140, 1 May 2016. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.12.185>.

LI, X.; WANG, C.; ZHANG, J.; LIU, J.; LIU, B.; CHEN, G. Preparation and application of magnetic biochar in water treatment: A critical review. **Science of the Total Environment**, vol. 711, 1 Apr. 2020. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.134847>.

LÓPEZ-ORTIZ, C. M.; SENTANA-GADEA, I.; VARÓ-GALVAÑ, P. J.; MAESTRE-PÉREZ, S. E.; PRATS-RICO, D. Effect of magnetic ion exchange (MIEX®) on removal of emerging organic contaminants. **Chemosphere**, vol. 208, p. 433–440, 1 Oct. 2018. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2018.05.194>.

MANYÀ, J. J.; AZUARA, M.; MANSO, J. A. Biochar production through slow pyrolysis of different biomass materials: Seeking the best operating conditions. **Biomass and Bioenergy**, vol. 117, p. 115–123, 1 Oct. 2018. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2018.07.019>.

MATRAPAZI, V. K.; ZABANIOTOU, A. Experimental and feasibility study of spent coffee grounds upscaling via pyrolysis towards proposing an eco-social innovation circular economy solution. **Science of the Total Environment**, vol. 718, 20 May 2020. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137316>.

NILSEN, E.; SMALLING, K. L.; AHRENS, L.; GROS, M.; MIGLIORANZA, K. S. B.; PICÓ, Y.; SCHOENFUSS, H. L. Critical review: Grand challenges in assessing the adverse effects of contaminants of emerging concern on aquatic food webs. **Environmental Toxicology and Chemistry**, vol. 38, no. 1, p. 46–60, 1 Jan. 2019. <https://doi.org/10.1002/etc.4290>.

PURI, M.; GANDHI, K.; KUMAR, M. S. Emerging environmental contaminants: A global perspective on policies and regulations. **Journal of Environmental Management**, vol. 332, 15 Apr. 2023. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.117344>.

- QIAN, K.; KUMAR, A.; ZHANG, H.; BELLMER, D.; HUHNKE, R. Recent advances in utilization of biochar. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, vol. 42, p. 1055–1064, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.10.074>.
- SHAHID, M. K.; KASHIF, A.; FUWAD, A.; CHOI, Y. Current advances in treatment technologies for removal of emerging contaminants from water – A critical review. **Coordination Chemistry Reviews**, vol. 442, 1 Sep. 2021. <https://doi.org/10.1016/j.ccr.2021.213993>.
- SOPHIA A., C.; LIMA, E. C. Removal of emerging contaminants from the environment by adsorption. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, vol. 150, p. 1–17, 15 Apr. 2018. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2017.12.026>.
- SRIVATSAV, P.; BHARGAV, B. S.; SHANMUGASUNDARAM, V.; ARUN, J.; GOPINATH, K. P.; BHATNAGAR, A. Biochar as an eco-friendly and economical adsorbent for the removal of colorants (Dyes) from aqueous environment: A review. **Water (Switzerland)**, vol. 12, no. 12, 1 Dec. 2020. <https://doi.org/10.3390/w12123561>.
- SUTAR, S.; PATIL, P.; JADHAV, J. Recent advances in biochar technology for textile dyes wastewater remediation: A review. **Environmental Research**, vol. 209, 1 Jun. 2022. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2022.112841>.
- TAN, X.; LIU, Y.; ZENG, G.; WANG, X.; HU, X.; GU, Y.; YANG, Z. Application of biochar for the removal of pollutants from aqueous solutions. **Chemosphere**, vol. 125, p. 70–85, 1 Apr. 2015. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2014.12.058>.
- TRAN, N. H.; REINHARD, M.; GIN, K. Y. H. Occurrence and fate of emerging contaminants in municipal wastewater treatment plants from different geographical regions-a review. **Water Research**, vol. 133, p. 182–207, 15 Apr. 2018. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2017.12.029>.
- UDAY, V.; HARIKRISHNAN, P. S.; DEOLI, K.; ZITOUNI, F.; MAHLKNECHT, J.; KUMAR, M. Current trends in production, morphology, and real-world environmental applications of biochar for the promotion of sustainability. **Bioresource Technology**, vol. 359, 1 Sep. 2022. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2022.127467>.
- VASILACHI, I. C.; ASIMINICESEI, D. M.; FERTU, D. I.; GAVRILESCU, M. Occurrence and fate of emerging pollutants in water environment and options for their removal. **Water (Switzerland)**, vol. 13, no. 2, 2 Jan. 2021. <https://doi.org/10.3390/w13020181>.
- VÉLEZ, V. P. P.; ESQUIVEL-HERNÁNDEZ, G.; CIPRIANI-AVILA, I.; MORA-ABRIL, E.; CISNEROS, J. F.; ALVARADO, A.; ABRIL-ULLOA, V. Emerging contaminants in trans-American waters. **Revista Ambiente & Água**, v. 14, 2019 <https://doi.org/10.4136/ambi-agua.2436>
- YI, Y.; HUANG, Z.; LU, B.; XIAN, J.; TSANG, E. P.; CHENG, W.; FANG, J.; FANG, Z. Magnetic biochar for environmental remediation: A review. **Bioresource Technology**, vol. 298, 1 Feb. 2020. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.122468>.
- ZBAIR, M.; BENNICI, S. Survey summary on salts hydrates and composites used in thermochemical sorption heat storage: A review. **Energies**, vol. 14, no. 11, 1 Jun. 2021. <https://doi.org/10.3390/en14113105>.