

Adsorção de poluentes em águas residuárias utilizando biocarvão: revisão sistemática

Adsorption of pollutants in wastewater through biochar: a systematic review

Andriele Rodrigues de Oliveira ¹, Luciana Coelho Mendonça ²,
Taísa Andrade Barbosa ²

¹ Universidade Federal de Sergipe, Departamento de Engenharia Civil – Av. Marechal Rondon, s/n - Rosa Elze, CEP: 49100-000, São Cristóvão – SE, Brasil.
e-mail: anndrieelliengcivil@gmail.com

² Universidade Federal de Sergipe, Departamento de Engenharia Civil – Av. Marechal Rondon, s/n - Rosa Elze, CEP: 49100-000, São Cristóvão – SE, Brasil.
e-mail: lumendon@gmail.com; taisacivil@gmail.com

RESUMO

A adsorção tem sido utilizada no tratamento de águas residuárias para a remoção de poluentes visto que apresenta baixo custo, necessita de menor espaço para sua implantação e é mais simples de operar quando comparado com outros tipos de tratamento. Ao utilizar o biocarvão como material adsorvente, a adsorção torna-se ainda mais econômica e sustentável, pois este é um biomaterial carbonáceo produzido com resíduos sólidos através de pirólise com taxas de oxigênio limitadas. Este estudo tem como objetivo investigar, através de análise quantitativa e qualitativa, as publicações acerca da utilização de biocarvão como adsorvente de poluentes em águas residuárias, a fim de verificar sua eficiência, parâmetros de aplicação e identificar possíveis lacunas de pesquisa. A análise quantitativa foi realizada de forma atemporal, com a categorização dos artigos considerando o tipo do poluente, ano e local de realização do experimento. Por conseguinte, a análise qualitativa foi feita por meio de leitura criteriosa dos artigos observando características como pH, temperatura da adsorção, temperatura de pirólise, matéria-prima e ativação do biochar, cinética e isotermas de adsorção, eficiência de remoção antes e após regeneração, bem como capacidade de adsorção. Foi concluído que os estudos ainda são recentes, realizados em pequena escala e as pesquisas mostraram grande preocupação com a remoção de micropoluentes emergentes. A temperatura de pirólise mais utilizada estava entre 400°C e 800°C e a adsorção aumentou com o aumento da temperatura do processo em até 45° C. As matérias-primas utilizadas para produção do biocarvão se mostraram diversificadas e, geralmente, os estudos utilizaram matérias-primas disponíveis na região do estudo. Além disso, o biocarvão apresentou maiores eficiências quando ativado. O modelo cinético de pseudo segunda-ordem e a isoterma de Langmuir foram as que melhor se ajustaram à maioria dos experimentos.

Palavras-chave: Biochar, filtração, esgoto, contaminantes.

ABSTRACT

Adsorption has been used in the treatment of wastewater for the removal of pollutants and has a low cost, requires less space for implementation and is simpler to operate when compared to other types of treatment. When using biochar as adsorbent material, adsorption becomes even more economical and sustainable, as this is a carbonaceous biomaterial produced with solid waste through pyrolysis with limited oxygen rates. This study aims to investigate, through quantitative and qualitative analysis, the publications about the use of biochar as an adsorbent of pollutants in wastewater, in order to verify its efficiency, application parameters and identify possible research gaps. Quantitative analysis was carried out in a timeless manner, with the categorization of articles considering the type of pollutant, year and location of the experiment. Therefore, the qualitative analysis was carried out through a careful reading of the articles, observing characteristics such as pH, adsorption temperature, pyrolysis temperature, raw material and biochar activation, adsorption kinetics and isotherms, removal efficiency before and after influence, as well as adsorption capacity. It was concluded that the studies are still recent, carried out on a small scale and the researchers were very concerned with the removal of emerging micropollutants. The most used pyrolysis temperature was between 400°C and 800°C and adsorption increased with increasing process temperature by up to 45°C. raw materials available in the study region. In

addition, biochar showed greater efficiencies when active. The pseudo second order kinetic model and the Langmuir isotherm were the ones that best fit most of the experiments.

Keywords: Biochar, filtration, sewage, contaminants.

1. INTRODUÇÃO

O elevado crescimento populacional aliado à cultura do consumo exacerbado de produtos industrializados e de medicamentos, além do descarte inadequado de efluentes são desafios para o alcance do sexto item da lista de Objetivos de Desenvolvimento Sustentável das Nações Unidas: garantia do acesso universal e seguro à água potável e ao saneamento.

Segundo dados da UNICEF (Fundo das Nações Unidas para a Infância), da OMS (Organização Mundial de Saúde) e da ONU [1, 2], uma a cada três pessoas não têm acesso à água potável e mais da metade da população mundial não tem acesso à esgoto tratado. Além disso, pesquisas já identificaram o aumento da taxa de poluentes resistentes aos tratamentos convencionais de esgoto, como por exemplo, fármacos, produtos de uso pessoal, corantes, herbicidas, metais e demais compostos químicos [3, 4].

Ainda existem poucos estudos acerca da influência desses compostos presentes na água para a saúde humana, principalmente em países de baixa renda [5]. Entretanto, pesquisas já identificaram efeitos nocivos como desregulação endócrina e feminização de espécies aquáticas submetidas a altas taxas de micropoluentes [6]. Nesse contexto, torna-se cada vez mais necessário o desenvolvimento de técnicas no tratamento de águas residuárias e o uso de materiais que sejam eficientes, econômicos e sustentáveis.

A adsorção surge como alternativa de tratamento físico-químico, geralmente após o tratamento terciário, para remover compostos químicos orgânicos e inorgânicos que não foram removidos pelos tratamentos convencionais, e com isso, melhorar a qualidade do efluente a ser lançado nos cursos hídricos. Estudos indicam que dentre as técnicas existentes para remoção de poluentes como biodegradação, oxidação química, osmose reversa, processos com cloração e filtração por membrana, a adsorção é a mais utilizada devido ao seu baixo custo, alta eficiência, pequena área de implantação e simplicidade de operação [5].

A adsorção de poluente é comumente realizada com carvão ativado como adsorvente. Porém, pesquisas têm avaliado o potencial do biocarvão como meio filtrante devido ao seu baixo custo comparado ao carvão ativado. Mesmo após o processo de ativação, o biocarvão é mais econômico que o carvão ativado [7, 8] e pode atingir eficiência maior ou similar [8]. Além da vantagem econômica, o biocarvão é considerado um material carbonáceo ecologicamente correto pois é produzido a partir da pirólise de vários resíduos sólidos em altas temperaturas sob condições limitadas a oxigênio [9,10].

Portanto, este estudo tem como objetivo investigar as publicações acerca do tratamento de água residuária utilizando biocarvão, através da revisão sistemática, a fim de: (1) verificar quais os principais tratamentos de água residuária utilizam biocarvão para remoção de contaminantes; (2) analisar a eficiência do biocarvão na adsorção de poluentes; (3) identificar as semelhanças dos estudos de caso e (4) o porquê das mesmas; além de (5) observar o panorama geral do estudo da adsorção de poluentes em águas residuárias com biocarvão e; (5) detectar as possíveis lacunas de pesquisa.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

A pesquisa sistemática sobre o assunto foi realizada pelo Portal Periódicos CAPES (Portal de Periódicos da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior), por meio do acesso liberado para discentes da Universidade Federal de Sergipe (UFS) pela Comunidade Acadêmica Federada (CAFe). Desse modo, foi possível acessar a base de dados Scopus e Scielo. Para esta revisão, apenas artigos científicos foram utilizados como referência, sendo que os artigos científicos na forma de revisão sistemática não foram considerados, pois objetivou-se analisar e discutir os resultados obtidos apenas de estudos de casos.

As palavras chaves utilizadas foram “biochar”, “adsorption”, “wastewater”, e “sewage”, considerando-se apenas o título dos artigos para limitar a busca.

A fim de melhor restringir a busca na base de dados Scopus e Scielo, foram utilizados operadores booleanos “AND” e “OR”, escritos da seguinte forma: biochar AND adsorption AND (wastewater OR sewage). Preferiu-se utilizar as palavras em inglês para abranger na busca publicações nacionais e internacionais. Não foi utilizada nenhuma restrição de busca como localidade ou temporalidade. A triagem dos artigos foi realizada através da leitura dos resumos dos mesmos, de modo que os artigos que não abordaram o tema “Filtração de poluentes com biocarvão em águas residuárias” foram desconsiderados, como por exemplo, artigos que abordavam tipos de tratamento de águas residuárias diferentes da filtração ou da adsorção.

À medida que os artigos foram encontrados, foi realizada uma categorização dos mesmos, levando em consideração o tipo do material filtrado, o ano e o local de publicação, respectivamente, a fim de observar o panorama geral do perfil desses artigos. Os poluentes identificados nos estudos de caso foram categorizados em: micropoluentes emergentes, metais, nutrientes, matéria orgânica, odores, fenóis, bactérias, sais e gases.

Após essa categorização inicial, foi realizada uma leitura criteriosa observando aspectos como: matéria-prima do biocarvão, adição de modificadores do biocarvão, temperatura de pirólise, mecanismos de adsorção, tempo médio de equilíbrio, pH da solução, modelo isotérmico e cinético mais adequado, capacidade de adsorção, eficiência de remoção do poluente e o tipo de água residuária sendo tratada. Em seguida, foi feita uma avaliação qualitativa a fim de identificar os artigos que possuíam abordagens similares.

3. RESULTADOS

Ao todo foram encontrados 116 artigos, sendo 115 na plataforma Scopus e 1 na plataforma Scielo. Desses 116 estudos, apenas 63 foram analisados, pois 8 eram revisões, 35 não abordavam a temática desta revisão e 10 não estavam disponíveis gratuitamente, mesmo com o acesso através da UFS.

Conforme ilustra a Figura 1, os artigos analisados nesta revisão foram publicados entre 2012 e 2022, sendo que o número de publicações aumentou significativamente a partir de 2020 para 2021.

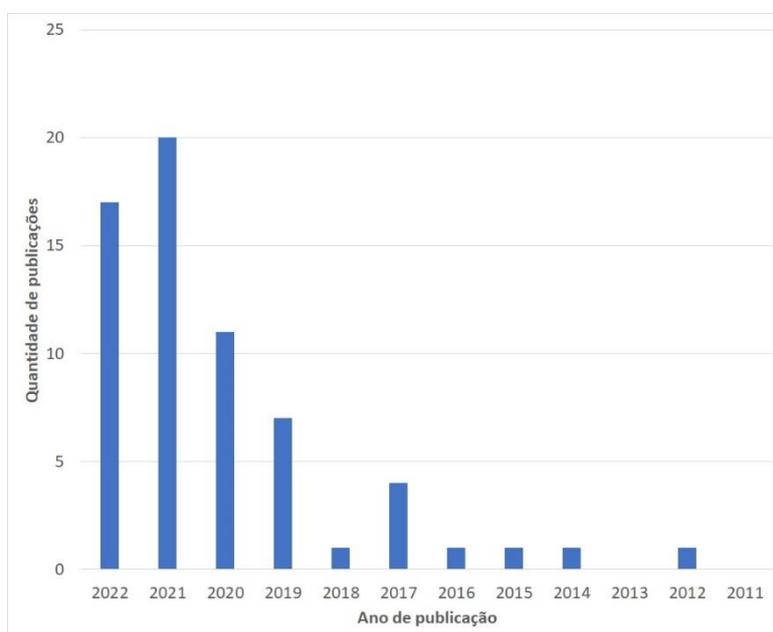


Figura 1: Número de artigos encontrados, por ano de publicação.

Quanto ao tipo de filtração, é importante salientar que a adsorção foi o principal processo para o tratamento da água residuária nas pesquisas, seguido de filtração por coluna aplicado simultaneamente com a adsorção e, adsorção aplicada com o Processo Oxidativo Avançado (POA) com radical sulfato.

De forma geral, como os estudos de caso são recentes, a maioria dos experimentos se encontra ainda em fase inicial, realizados em bancada e com efluente artificial. Dos 63 artigos analisados, apenas 18 utilizaram água residual real para os experimentos, com origens diversificadas como por exemplo: efluentes de pirólise [11], efluentes de coque [7], efluente da produção de gás de xisto [9], efluente de abatedouro [12], lodo fecal bruto e efluente de esgoto [13], efluente de ETE [14], efluente agrícola [15], efluente industrial de galvanoplastia de liga de Zn-Ni [16] e efluente de curtume [17].

A Figura 2 apresenta a quantidade de artigos encontrada de acordo com o país onde foi realizado o experimento. A China foi o país com mais publicações, com 36 das 63 publicações analisadas neste artigo, enquanto esse número diminui significativamente em outros países. Conforme a Figura 3, percebe-se que a maioria dos estudos busca remover/filtrar micropoluentes emergentes, seguidos de nutrientes e metais.

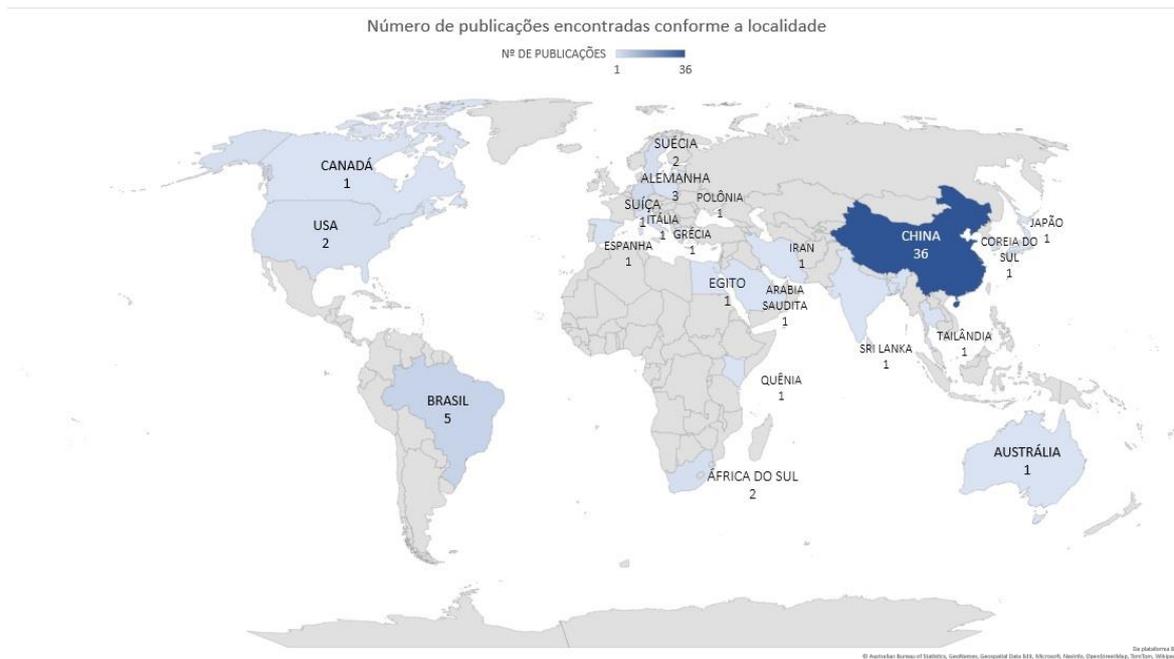


Figura 2: Número de artigos encontrados, por local de publicação.

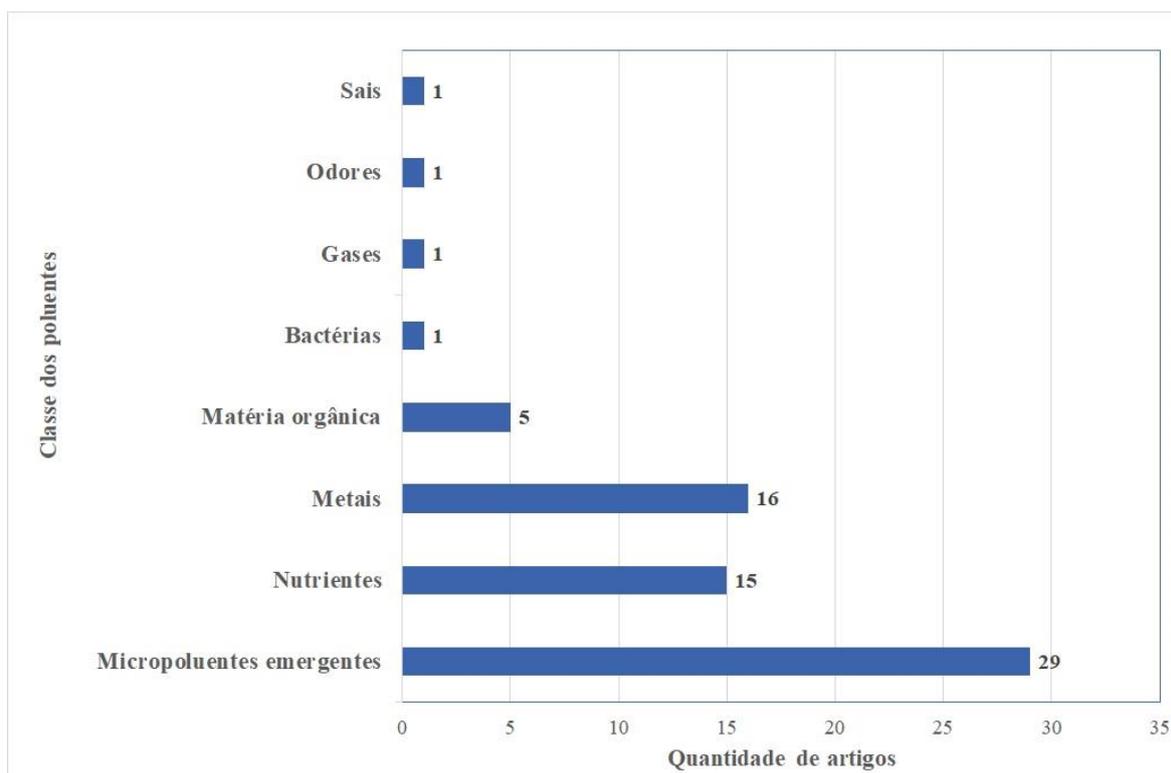


Figura 3: Quantidade de artigos encontrados conforme a classe do poluente a ser removido no estudo.

Dos 29 artigos sobre remoção de micropoluentes emergentes, conforme o que está apresentado na Tabela 1, 5 estudos são apenas sobre a adsorção de um antibiótico específico como a tetraciclina, ciprofloxacina e gatifloxacina e 3 estudaram a remoção/filtração de perfluorooctano sulfonatos (PFOS). Os demais estudos abordaram a remoção individual ou simultânea de diversos micropoluentes emergentes.

Tabela 1: Micropoluentes emergentes encontrados nos artigos analisados.

BIOCARVÃO / (TEMPERATURA DE PIRÓLISE)	AGENTE DE ATIVAÇÃO	POLUENTE	TEMPO DE EQUI-LÍBRIO (MIN)	CAPACIDADE DE ADSORÇÃO (MG/G)	EFICIÊNCIA DE REMOÇÃO (%)	TIPO DE ÁGUA RESIDUÁRIA	REFERÊNCIA
Resíduos de azeitona / (260°C)	Sem ativação	Analgésicos, anti-inflamatórios, antiretrovirais e antibióticos, ciprofloxacina	-	-	62,00%	doméstico	[6]
Resíduos de tomate / (260°C)					46,00%		
Palma de Raphia Farinifera / (260°C)					53,00%		
Casca de arroz / (260°C)					44,00%		
Resíduos sólidos urbanos / (500°C)	Montmorilonita e argila vermelha	Tetraciclina	-	25,98	100,00%	efluente municipal ou solo	[18]
Casca de noz / (600°C)	Ferro e nitrogênio	Tetraciclina	120	238,94	75,30 %	suinocultura	[19]
Cascas de romã / (800°C)	Ácido fosfórico	Ciprofloxacina	240	142,86	85,00%	-	[20]
Lodo de esgoto e resíduos de bambu / (700°C)	Sem ativação	Ciprofloxacina	-	62,48	95,00%	-	[21]
Lodo do tanque de concentração / (550°C)	Cloreto de zinco	Gatifloxacina	-	20,00	96,00%	artificial	[22]
Lodo de desidratação / (550°C)				19,00			
Lodo seco com cal / (550°)				4,00	Baixa		
Lodo do tanque de sedimentação secundário / (550°)				18,00	96,00%		
Lodo seco / (550°C)				17,00	80,00%		
-	Agentes complexantes	Fluoxetina (antidepressivo)	10	-	86,00%	artificial	[23]
Madeira dura (Não mencionou temperatura)	-	Carbamazepina	-	-	99,00%	afluente dos tanques de pré sedimentação de ETE	[14]
		Metropolol			99,00%		
		Ranitidina			98,00%		
		Cafeína			96,00%		

Bagaço de cana de açúcar e lodo de decantação / (380°C)	Sem ativação	Tiametoxam	60	10,17	70,00%	artificial	[24]
Lodo de papel/casca de trigo / (500°C)	Sem ativação	2,4-Dicloro-fenol	143	17,51	99,95%	artificial	[25]
Serragem mista / (800°C)	Ferro e nitrogênio	Carbamazepina	60	69,00	80,00%	artificial	[5]
		Ciprofloxacina		69,00			
		Bisfenol A		55,00			
		Ibuprofeno		12,00			
		Fenol		15,00			
		Acetaminofeno		40,00			
		Sulfametoxazol		34,00			
		Tetraciclina		28,00			
Naproxeno	38,00						
Biossólidos de águas residuais / (800°C)	Ácido clorídrico	Triclosan	–	239,00	32,00%	ETE	[26]
Lodo de esgoto / (500 °C)	Sem ativação	2,4-Dicloro-fenol	4200	–	82,00%	ETE	[27]
		2,3,4-Tricloro-fenol			70,00%		
		Bisfenol A			50,00%		
		Androsterona			98,00%		
		Etinil estradiol			62,00%		
		Estrona			62,00%		
		Carbamazepina			70,00%		
Casca de coco / (900°C)	Hidróxido de potássio	PFOS	30	1269,00	90,00%	artificial	[28]
Madeira / (800°C)	Sem ativação	PFOS	–	168,00	99,00%	ETE	[29]
Borra de café / (400°C)	Hidróxido de sódio e hidróxido de potássio	PFOS	48	43,40	92,40%	artificial	[30]

A Tabela 2 apresenta os dados acerca da remoção de corantes encontrados em 14 artigos analisados. A adsorção de corantes foi aplicada principalmente em solução aquosa com o poluente ou em água residuária (sintética ou real) proveniente de efluente têxtil.

Tabela 2: Corantes encontrados nos artigos analisados.

BIOCARVÃO / (TEMPERATURA DE PIRÓLISE)	AGENTE DE ATIVAÇÃO	POLUENTE	TEMPO DE EQUILÍBRIO (MIN)	CAPACIDADE DE ADSORÇÃO (MG/G)	EFICIÊNCIA DE REMOÇÃO (%)	TIPO DE ÁGUA RESIDUÁRIA	REFERÊNCIA
Sabugo de milho / (450 A 550°C)	Ácido sulfúrico	Corante têxtil real	45	6,02	98,00%	têxtil	[31]
casca de mandioca / (600°C)	Ácido fosfórico	Verde malaquita	40	1363,58	–	artificial	[32]
Lodo de esgoto com alto teor de cinzas e metais / (600°C)	Sem ativação	Triarilmetano, verde malaquita e violeta cristal	2880	69,50	–	artificial	[33]
Folhas de mamona / (600°C)	Sem ativação	Safranina	120	4,98	99,60%	têxtil	[34]
Lodo de indústria alimentícia / (350°C)	Ácido fosfórico	Tartrazina	210	9,87	49,00%	artificial	[35]
Resíduos de cimento Portland / (600°C)	Cloreto de zinco	Rodamina B	60	531,84	–	artificial	[36]
Móveis antigos e poda de madeira / (900°C)	Sem ativação	Preto	90	35,67	–	artificial	[37]
		Azul básico 12	180	80,41			
Casca de cacau / (750°C)	Hidróxido de sódio	Verde brilhante	120	49,00	98,00%	artificial	[38]
		Rodamina B	240	44,00	89,00%		
		Laranja de metila	360	44,00	89,00%		
Casca de café / (450°C)	Cloreto de zinco e brometo de cetrimônio	Amarelo 145	180	73,00	83,70%	artificial	[39]
		Vermelho 195		58,80	71,10%		
		Azul 202		46,10	59,60%		
Lodo de esgoto e lignina / (600°C)	Sem ativação	Azul de metileno	–	38,56	–	–	[40]
Acácia nilótica (Não mencionou temperatura)	Sem ativação	Azul de metileno	200	158,13	–	artificial	[41]
Lodo de esgoto / (550°C)	Sem ativação	Azul de metileno	600	16,21	98,00%	artificial	[42]
Resíduo de chá / (400°C)	Ácido fosfórico	Azul de metileno	97,92	91,13	99,26%	artificial	[43]

O fosfato foi o nutriente mais observado em experimentos de adsorção, seguido do fósforo, nitrato, amônio, sulfatos, amônia, nitritos, nitrogênio amoniacal e potássio. Na Tabela 3 são apresentados os resultados de estudos acerca da adsorção de nutrientes por meio de biocarvão ativado ou não, com suas respectivas temperaturas de pirólise, tempo de equilíbrio, capacidade de adsorção, eficiência de remoção e o tipo de efluente utilizado.

Tabela 3: Dados acerca de remoção de nutrientes utilizando biocarvão.

BIOCARVÃO / (TEMPERATURA DE PIRÓLISE)	AGENTE DE ATIVAÇÃO	POLUENTE	TEMPO DE EQUILÍBRIO (MIN)	CAPACIDADE DE ADSORÇÃO (MG/G)	EFICIÊNCIA DE REMOÇÃO (%)	TIPO DE ÁGUA RESIDUÁRIA	REFERÊNCIA
Madeira de abeto / (600°C)	Água do mar	Fosfato	2160	181,07	De 63,00% a 100,00%	artificial	[8]
Casca de arroz / (700°C)	Sem ativação	Nitrato	90	12,32	22,00%	abatedouro	[12]
		Nitrito		0,23			
Casca de coco / (700°C)		Nitrato	90	12,97	24,00%		
		Nitrito		0,24			
Casca de café / (700°C)		Nitrato	60	12,08	17,00%		
		Nitrito		0,22			
Pinho (Não mencionou temperatura)	Sem ativação	Nitrato	-	-	Entre 68,00% e 98,00%	lodo fecal bruto e efluente de esgoto	[13]
		Fosfato					
Serragem / (600°C)	Bário e óxido de ferro	Sulfatos	480	-	97,00%	artificial	[44]
Lodo de esgoto / (450°C)	Sem ativação	Amônio	800	1,20	50,00%	artificial	[45]
Lodo de esgoto / (600°C)	Sem ativação	Amônia	240	3,50	-	artificial	[46]
	Magnésio			30,58			
	Alumínio			16,00			
	Ferro			5,20			
	Manganês			7,50			
	Sem ativação	Fosfato		3,00			
	Magnésio			400,00			
	Alumínio			50,00			
	Ferro			38,00			
	Manganês			37,00			
Casca de coco (Não mencionou temperatura)	Ferro e alumínio	Nitrato	1440	1,32	85,00%	Industrial pré tratada	[47]
Palha de milho (Não mencionou temperatura)	alumínio			0,86	60,00%		
Lodo de esgoto / (°600)	lantânio	Fosfato	1440	93,91	98,90%	artificial	[48]
Palha de banana / (500°C)	Hidróxido de zinco alumínio	Fosfato	40	185,19	-	artificial	[49]
Palha agrícola / (500°C)	Magnésio e alumínio	Fósforo	120	89,37	95,00%	doméstica	[50]

Hydrocotyle vul- garis / (500°C)	Alginato de sódio	Fosforo	160	255,88	96,00%	artificial	[51]
-------------------------------------	----------------------	---------	-----	--------	--------	------------	------

Entre os metais mais encontrados nos estudos analisados, estão o cromo (IV), o cádmio (II) e o cobre. O mecanismo de adsorção predominante observado na remoção de metais foi o da quimissorção, com troca iônica e complexação de superfície. A Tabela 4 apresenta os resultados encontrados.

Tabela 4: Dados acerca de remoção de metais utilizando biocarvão.

BIOCARVÃO / (TEMPERATURA DE PIRÓLISE)	AGENTE DE ATIVA- ÇÃO	POLUENTE	TEMPO DE EQUILÍ- BRIO (MIN)	CAPACIDADE DE ADSOR- ÇÃO (MG/G)	EFICIÊNCIA DE REMO- ÇÃO (%)	TIPO DE ÁGUA RESIDU- ÁRIA	REFE- RÊNCIA
Casca de broto de bambu / (750°C)	Sem ativa- ção	Cobre	480	4,87	99,00%	artificial	[15]
		Cromo (IV)	240	57,63	80,00%		
Algas azuis Taihu / (800°C)	Hidróxido de potássio	Níquel	20	2,26	98,87%	galvano- plastia	[16]
Aguapé / (500°C)	Sem ativa- ção	Cromo	10	–	99,00%	curtume	[17]
Palha de taro (450°C)	Magnésio	Cromo (IV)	90	50,21	90,00%	artificial	[52]
Palha de banana (450°C)			–	114,64	–		
Palha de milho (450°C)			180	40,12	–		
Palha de mandi- oca (450°C)			60	75,56	89,19%		
Palha de abeto chinês (450°C)			150	17,21	–		
Palha de Camel- lia Oleífera / (450°C)			120	20,21	–		
Casca de coco / (temperatura não mencionada)	Nitrato de ferro	Cromo (IV)	120	1,27	100,00%	artificial	[53]
	Sem ativa- ção			0,06	4,66%		
Lodo de esgoto de fábrica de pa- pel / (750°C)	Sem ativa- ção	Cobre	1440	29,61	95,00%	artificial	[54]
		Zinco	120	30,00			
		Arsênio	150	0,95			
	Ácido clorí- drico	Cobre	–	12,28	40,92%		
		Zinco		26,00	87,93%		
		Arsênio		0,95	95,00%		
Lodo de ETE / (900°C)	Sem ativa- ção	Cádmio (II)	–	42,80	100,00%	artificial	[55]
Camellia oleífera (800°C)	Óxido de magnésio	Cádmio (II)	200	649,9	92,00%	artificial	[56]
Fungo Aurícula- ria Aurícula (400°C)	Dissulfeto de carbono	Cádmio (II)	60	450,51	96,10%	artificial	[57]

Esterco de porco / (500°C)	Água	Urânio	60	350,10	82,40%	artificial	[58]
	Peróxido de hidrogênio			661,70	85,90%		
	Permanganato de potássio			979,30	94,70%		
Solidago Canadensis / (700°C)	Sem ativação	Európio (III)	550	270,30	-	artificial	[59]
	Hidroxiapatita			344,80			
	Hidróxido duplo (LDL)		700	666,70			
	Hidroxiapatita e hidróxido duplo			714,30			
Lodo de ETE / (600°C)	Sem ativação	Chumbo	240	611,80	-	artificial	[60]
Serragem de eucalipto / (600°C)	Sem ativação	Níquel	30	36,00	73,00%	artificial	[61]
		Chumbo		129,00	95,00%		
Cogumelo descartado / (300°C)	Ácido clorídrico	Chumbo	300	5,00	81,00%	artificial	[62]
		Cádmio (II)		20,00			
		Níquel		2,00			
		Cobre		9,00			
Caruru-de-cacho / (500°C)	Sem ativação	Cádmio (II)	720	310,00	92,70%	artificial	[63]
		Chumbo		326,00	97,50%		
		Cobre		246,00	98,50%		
Pó de serra / (500°C)	amino modificação	Cobre	90	15,00	-	artificial	[64]

Apesar de a matéria orgânica ser removida considerando variados parâmetros, a remoção de DQO (Demanda Química de Oxigênio) foi o mais analisado. A Tabela 5 apresenta os seis artigos relacionados à remoção de matéria orgânica e os seus respectivos dados.

Na triagem dos artigos, apenas um artigo foi encontrado com odor, gás e bactérias, respectivamente, como poluentes. KUMI et al. [65], estudou a adsorção de nitrogênio (N₂) utilizando biocarvão de lodo de esgoto modificado por casca de ovo, que possibilita uma melhor estrutura porosa e mais áspera, contribuindo para a adsorção.

PIEKARSKI et al. [66], analisou a remoção de n-butanol utilizando como parâmetro o odor de bacalhau (OUE/m³), através de filtro de leito fixo com diferentes alturas e com biocarvão produzido a partir de lodo de esgoto e resíduos apícolas sem modificação e modificado com peróxido de hidrogênio (H₂O₂) ou cloreto de zinco (ZnCl₂). Observou-se que o desempenho de adsorção do biocarvão do lodo de esgoto foi melhor que o biocarvão dos resíduos da apicultura.

Semelhante a esse estudo em filtro de coluna, MAMERA et al. [13], investigou a concentração e as taxas de migração de nitratos, fosfatos, E. coli e bactérias coliformes fecais através de diferentes tratamentos de coluna de biocarvão no leito do solo lixiviados com lodo fecal bruto e efluente de esgoto. Os resultados mostraram uma taxa decrescente de nitratos, fosfatos, zinco e cobre com o aumento da taxa de aplicação de biocarvão. Além disso, obteve eficiência de remoção acima de 98% para E. coli, e 85% para coliformes fecais nos tratamentos de efluente e lodo.

Tabela 5: Artigos encontrados e seus respectivos dados acerca de remoção de matéria orgânica utilizando biocarvão modificado ou não.

BIOCARVÃO / TEMPERATURA DE PIRÓLISE)	AGENTE DE ATIVAÇÃO	PARÂMETRO	TEMPO DE EQUI-LÍBRIO (MIN)	CAPACIDADE DE ADSORÇÃO	EFICIÊNCIA DE REMOÇÃO (%)	TIPO DE ÁGUA RESIDUÁRIA	REFERÊNCIA
Palha de trigo / (700°C)	quitosana	Matéria orgânica dissolvida	60	–	52,00%	Efluente de coque biotratados	[7]
Aerogel de quitosana / (800°C)	–	Carbono orgânico dissolvido	120	–	52,00%	Efluente da produção de gás de xisto	[9]
		UV 254			72,00%		
		turbidez			70,00%		
Madeira de álamo / (800°C)	– Hidróxido de sódio	Contaminante orgânico	180	110,00	60,00%	Efluente de pirólise	[11]
				150,00	75,00%		
				800,00	90,00%		
Aguapé / (500°C)	–	DQO	–	–	93,00%	Efluente de curtume	[17]
		DBO			93,00%		
Resíduo de biogás de palha / (550°C)	Cloreto de ferro (III)	DQO	60	–	47,00%	Efluente sintético	[67]
Resíduo de biogás de esterco de porco / (550°C)					49,00%		
Resíduo de biogás de esterco de galinha / (550°C)					186,24		

3.1 Matéria-prima

A Figura 4 apresenta uma nuvem de palavras, na qual o aumento da fonte está relacionado com a quantidade de artigos em que se utilizou determinada matéria-prima. Desse modo, a matéria-prima mais utilizada para produzir o biocarvão nos artigos analisados foi o lodo de estação de tratamento de esgoto (ETE) municipal, representando 22,4% das matérias-primas totais dos artigos.

Além do lodo, a madeira também está sendo bastante utilizada na produção de biocarvão como adsorvente de poluentes, bem como palha, casca e resíduos de alimentos (vegetais, frutas, raízes) e serragem. Uma matéria-prima incomum para produção do biocarvão foram resíduos de cimento utilizados na pesquisa de SILVA et al. [36], para remoção do corante Rodamina B.

experimentos realizados em filtro de coluna não foram considerados. Além disso, em 15 artigos o tempo de equilíbrio de adsorção não foi mencionado. Ainda assim, 8 experimentos apresentaram tempo de equilíbrio igual a 120 minutos [9, 19, 35, 39, 51, 53, 54, 55].

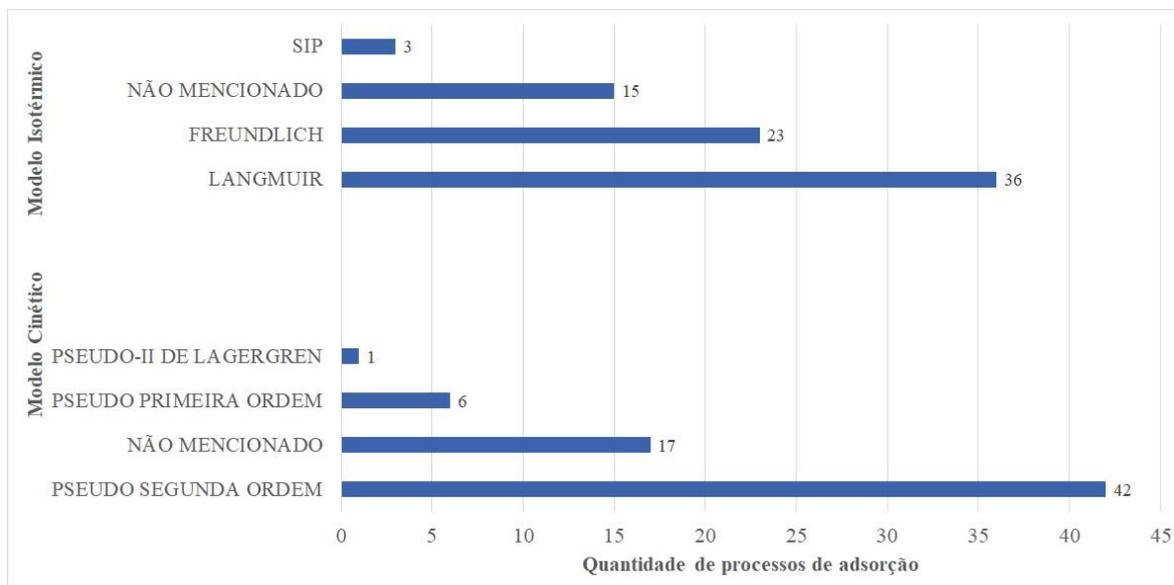


Figura 6: Quantidade de processos de adsorção de acordo com os modelos cinéticos e isotérmicos de adsorção

A Figura 7 apresenta a quantidade de experimentos analisados conforme a temperatura de pirólise na produção do biocarvão, mostrando que a maior parte dos experimentos realizaram pirólise entre 400°C e 800°C.

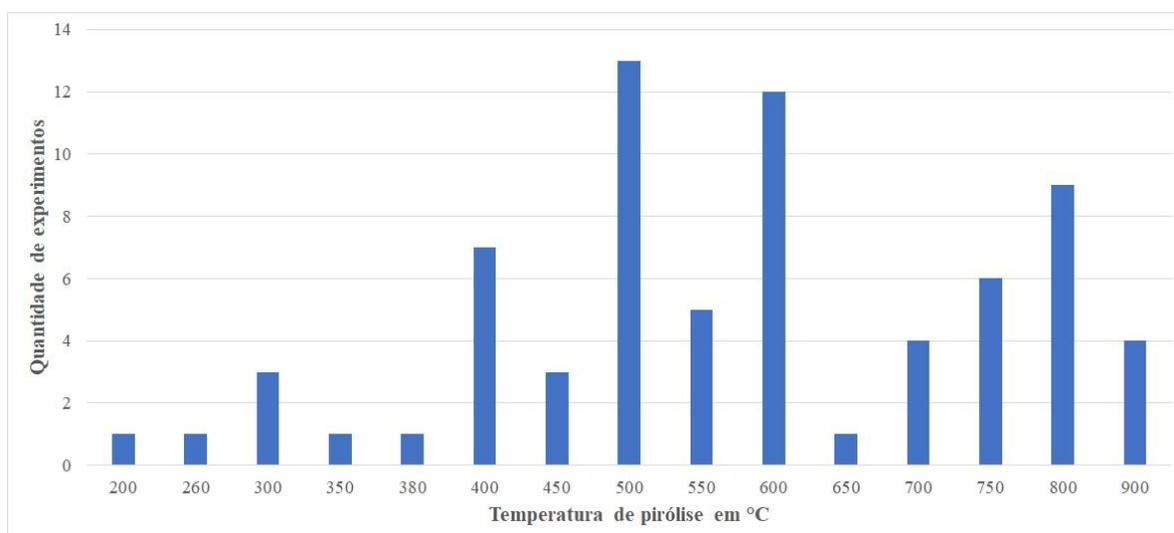


Figura 7: Quantidade de experimentos encontrados com cada temperatura de pirólise em °C.

Quanto à temperatura em que ocorre a adsorção, apenas 21 estudos mencionaram a sua influência na eficiência do processo. Destes, 2 concluíram que a temperatura não influenciava a adsorção [26, 55], 2 concluíram que a eficiência de adsorção diminuiu com o aumento da temperatura [15, 51] e 17 constataram que a adsorção aumentou com o aumento da temperatura [19, 20, 27, 52, entre outros].

Além da temperatura do processo de adsorção, o pH da solução é um fator determinante para a adsorção de poluentes com biocarvão. Dos 63 artigos analisados, 10 não estudaram o efeito do pH na adsorção e o restante realizou os experimentos com pH conforme mostra a Figura 8. Apenas um estudo concluiu que o pH não fazia diferença na adsorção de micropoluentes [27].

Apenas dois artigos avaliaram o custo financeiro da utilização de biocarvão na adsorção de poluentes. ZHANG et al. [8], analisaram o custo do biocarvão de resíduos de madeira de abeto modificado com água do mar como fonte de Ca/Mg, obtendo alta capacidade de adsorção (181,07 mg/g) e eficiência de até 100% na remoção de fosfato, e concluíram que a modificação não aumentou o custo de produção, que foi estimado em 0,41US\$/kg.

Já SHI et al. [7], no estudo da remoção de matéria orgânica dissolvida (DOM) de efluentes de coque biotratados por biocarvão modificado com quitosana, constataram que as matérias-primas de baixo custo de biochar (pelo menos US\$246 por tonelada) e quitosana (pelo menos US\$1000 por tonelada) são usadas para preparar biocarvão, e o processo de produção é mais ecológico. Em contraste com o alto custo e alto consumo de energia durante o processo de fabricação do tradicional material de adsorção de carvão ativado (pelo menos US\$1500 por tonelada).

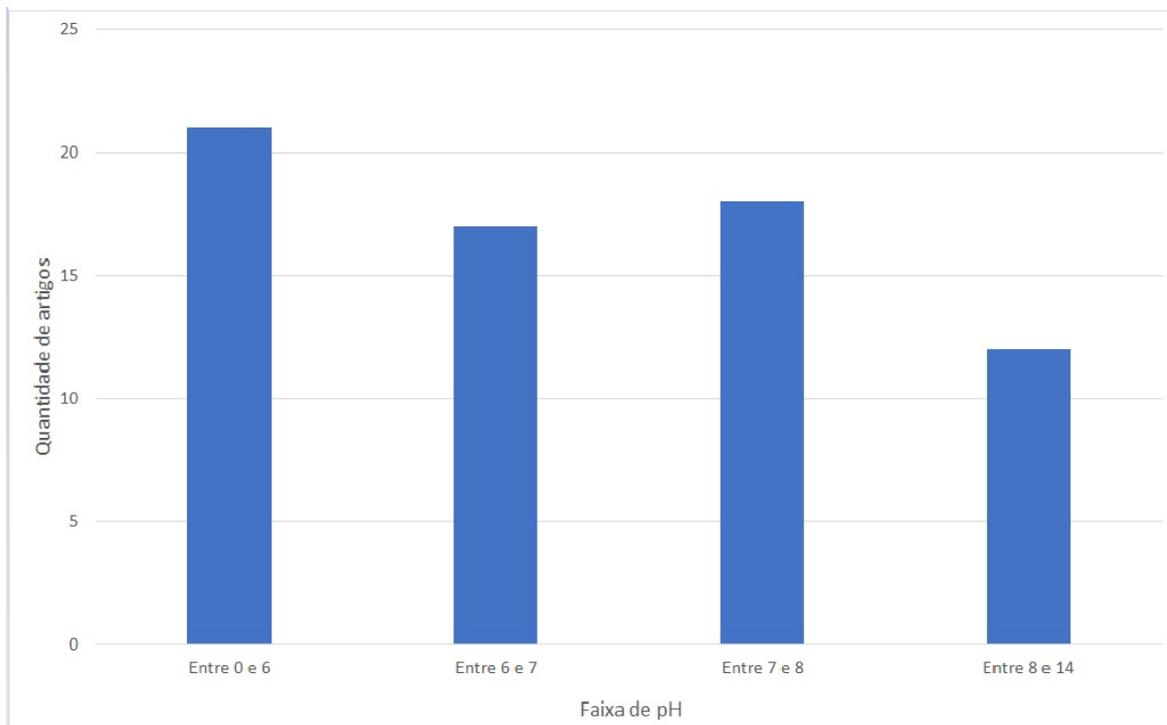


Figura 8: Gráfico de dispersão da quantidade de processos de adsorção nos artigos conforme o valor de pH da solução adsorvente/adsorbato.

Dos 63 artigos analisados, apenas 19 apresentaram dados acerca da regeneração do biocarvão. Os resultados são mostrados na Figura 9, em que a abcissa do gráfico representa a eficiência de adsorção após a regeneração do biocarvão e a ordenada indica a quantidade de ciclos de regeneração.

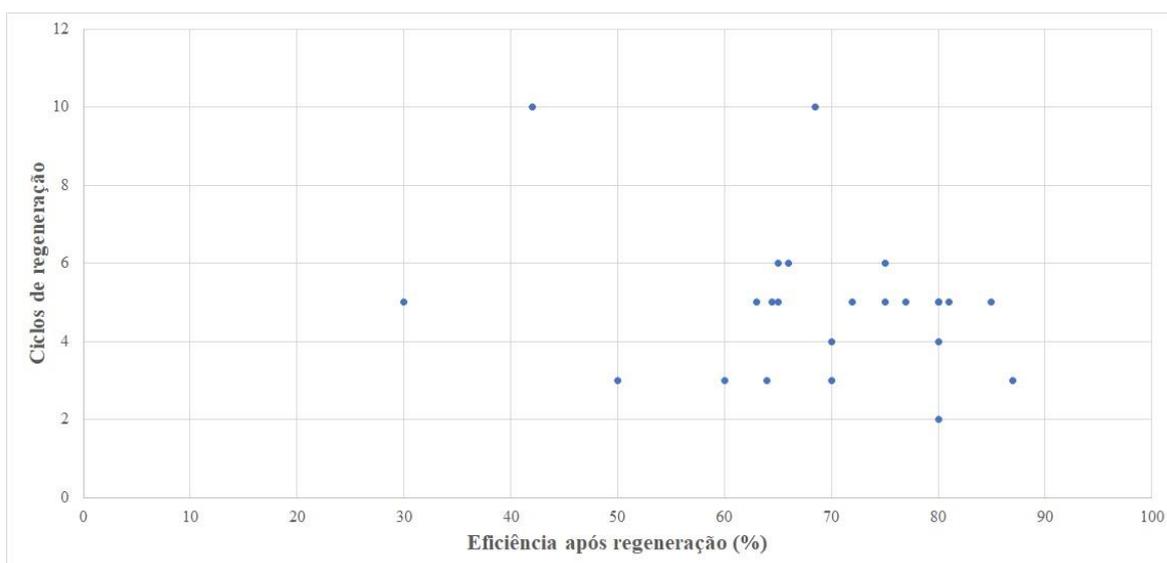


Figura 9: Gráfico de dispersão da quantidade de ciclos de regeneração versus a eficiência da adsorção após regeneração em percentagem.

4. DISCUSSÕES

Com o acelerado crescimento econômico e uma das maiores populações do planeta, a China tem sido cenário

de problemas ambientais recorrentes e de grandes dimensões. Conforme ZAGO [69], a poluição da água no país afeta 75% dos rios e lagos chineses e 90% das águas subterrâneas urbanas, 28% dos rios são tão tóxicos que não servem nem para o uso agrícola. Entretanto, na última década o governo chinês tem se mostrado engajado em adotar políticas ambientais mesmo diante do dilema entre o crescimento econômico e a proteção ambiental. Esse pode ser uma razão pela qual o maior número de publicações foi da China.

A partir da análise dos resultados, foi possível perceber que a maioria das publicações encontradas é recente visto que houve um aumento significativo de publicações a partir de 2019. Como causa disso, pode-se mencionar duas hipóteses: o interesse da comunidade científica ao longo dos últimos dez anos em reduzir os impactos da resistência antimicrobiana; e o risco de contaminação através dos esgotos durante a pandemia do Covid-19. É possível constatar que a maior parte dos artigos trata sobre a remoção de micropoluentes emergentes, o que revela a preocupação dos estudiosos quanto aos efeitos negativos das altas concentrações desses poluentes nos cursos d'água para a saúde humana e ambiental.

Para REGKOUZAS e DIAMADOPOULOS [27], os micropoluentes orgânicos representam um grupo de poluentes, encontrados regularmente na superfície e nas águas residuais, apresentando um efeito tóxico a longo prazo e ameaça aos organismos receptores. Isso acontece porque são persistentes durante os processos convencionais de tratamento de água e até mesmo quando são biodegradados, podem ser transformados em mais subprodutos perigosos [70].

Segundo MARTI et al. [71], o uso excessivo e indevido de agentes antimicrobianos na medicina humana e veterinária, pecuária, ambientes industriais e sua posterior liberação em estações de tratamento de efluentes (ETE) têm contribuído para o surgimento e disseminação de bactérias resistentes no meio ambiente, incluindo bactérias causadoras de infecções em humanos e animais. Além disso, estudos já identificaram efeitos hormonais e redução significativa de embriões em espécies aquáticas expostas a concentrações de medicamentos [72].

Os corantes também podem ser classificados como micropoluentes emergentes. Entre os corantes mais citados nos artigos estão o azul de metileno e o verde malaquita, que são corantes básicos e catiônicos, bastante utilizados, principalmente pelas indústrias. Todavia, o corante verde malaquita, por exemplo, é uma substância tóxica e com potencial cancerígeno para os seres humanos [73].

Além dos micropoluentes emergentes, outra classe de poluente muito encontrada nos estudos foram os nutrientes e os metais. Segundo ZHANG et al. [74], o excesso de nitrogênio e fósforo despejados no ambiente aquático causará eutrofização, resultando na disseminação de algas, colocando em risco a segurança da água potável e a biodiversidade dos ecossistemas aquáticos.

Em relação aos metais, a maior parcela das publicações estudou a remoção de metais nocivos à saúde mesmo em pequenas concentrações, como o cromo (IV) e o cádmio (II). Para LIU et al. [75] e FU et al. [76], embora o metal cádmio não tenha significado patológico, seus compostos são altamente tóxicos. Se for descartado diretamente sem tratamento, é fácil causar intoxicação crônica de seres humanos e animais. Conforme XU et al. [56], a exposição prolongada a baixas concentrações de compostos de cádmio causará anemia, enfi-sema, neuralgia, dor de estômago, osteoporose e outras emergências.

Analisando os artigos, foi possível concluir que no caso da remoção de matéria orgânica, o principal interesse dos experimentos era utilizar a adsorção com biocarvão como pós-tratamento ou apenas para melhorar a turbidez da água residuária.

4.1 Matéria-prima e ativação do biocarvão

Quanto à matéria-prima utilizada nos experimentos, observou-se que normalmente as matérias-primas são obtidas nas regiões próximas à pesquisa. Além disso, o grande uso do lodo de esgoto como matéria-prima do biocarvão indica o interesse em reciclar o lodo de esgoto, material que geralmente é descartado em aterros sanitários, causando impactos ambientais.

Os estudos mostraram que a ativação do biochar aumenta a eficiência do biocarvão e aumenta a viabilidade da remoção de poluentes em larga escala. Segundo ZHANG [8], a capacidade de adsorção relativamente limitada do biochar sem ativação ainda não pode atender à demanda por aplicações práticas. WANG et al. [16], verificaram que o biochar ativado por hidróxido de potássio obteve a área superficial específica de 1657,8 m²/g, quase 92,6 vezes maior que a do biochar sem ativação (17,9 m²/g).

Além disso, o biocarvão de madeira álamo modificado com hidróxido de sódio [11] apresentou alta eficiência de remoção comparado com outras classes de adsorbatos, bem como elevada capacidade de adsorção. Em alguns estudos de caso, mesmo sem ativação do biochar, a eficiência de remoção dos poluentes permaneceu considerável, viabilizando a adsorção [17; 56]. No experimento de SHANG et al. [9], a eficiência de adsorção da matéria orgânica com aerogel de biocarvão poroso apresentou o dobro de eficiência na remoção de carbono

orgânico dissolvido (52,5% em 30 minutos) comparado com o carvão ativado convencional (32,0% em 120 minutos).

Ademais, TONG et al. [26] constataram que o ácido clorídrico limpou mais a superfície do biochar, aumentou a porosidade e a área superficial. Porém, ainda assim, o carvão ativado possui cerca de cinco vezes mais área superficial e obteve maior eficiência de remoção de Triclosan. No estudo da remoção de odor através da adsorção com biocarvão de lodo de esgoto, PIEKARSKI et al. [66], concluíram que a modificação adicional com peróxido de hidrogênio ou cloreto de zinco aumenta a eficiência do processo, diminuindo assim a altura do leito necessária para a eliminação do odorante.

Além disso, na adsorção aprimorada de európio de águas residuais usando biocarvão derivado de *Solidago Canadensis* funcionalizado por Ca/Al-LDH e hidroxiapatita, DONG et al. [59], verificaram que a capacidade de adsorção com o biocarvão ativado foi 2,6 vezes maior que a capacidade adsorptiva do biocarvão puro.

A diversidade de agentes ativadores utilizados mostra que os estudiosos estão em busca de inovação nesse aspecto, como por exemplo a utilização de casca de ovo como fonte de carbonato de cálcio [65] e da água do mar como fonte de cálcio e magnésio [8].

4.2 Temperatura de pirólise e temperatura da adsorção

A temperatura de pirólise é a temperatura final na qual ocorre a pirólise da matéria-prima enquanto que a temperatura da adsorção é a temperatura em que ocorre o experimento e o processo de adsorção, podendo ser até mesmo a temperatura ambiente. Para a maioria dos estudos de caso que consideraram a influência da temperatura de adsorção, a eficiência e a capacidade de remoção de poluentes aumentaram quando a temperatura subiu de 15°C para 45°C, e decrescendo a partir daí [54, 56]. Isso mostra que a adsorção pode ser um processo endotérmico.

Determinar a temperatura ótima de pirólise do biocarvão é imprescindível para atingir bons resultados na adsorção de poluentes. Pois, além de influenciar na eficiência de remoção do poluente, a temperatura de pirólise é um parâmetro determinante para o rendimento do biochar. À medida que temperaturas muito baixas não apresentaram bom rendimento do biochar - além de não contribuir para o desenvolvimento de grupos funcionais favoráveis à adsorção -, temperaturas muito elevadas levaram a pequena área de superfície do biocarvão e baixo rendimento também.

Entretanto, o conceito de temperatura baixa ou elevada depende das características da matéria-prima utilizada, como por exemplo o poder calorífico. Para DAI et al. [40], e SEWU et al. [33], o aumento da temperatura diminuiu os rendimentos de biochar devido à decomposição de orgânicos. Ainda, para WANG et al. [62], os rendimentos de biocarvão de cogumelo diminuíram de 80,70% para 36,20% com a temperatura de pirólise aumentando de 300°C para 800 ° C.

Também foi possível observar que a temperatura de pirólise do adsorvente influencia propriedades como porosidade e área de superfície, que conseqüentemente, impactam no processo de adsorção de poluentes. Segundo SULEAMAN et al. [34], a temperatura de pirólise desempenhou um papel fundamental no aumento da morfologia e cristalinidade do biochar que são benéficos para a adsorção de Safranina (corante). Os resultados do BET (Brunauer-Emmett-Teller) indicaram que a temperatura de pirólise teve forte influência na superfície do adsorvente visto que a área de superfície aumentou com o aumento da temperatura de pirólise e a liberação violenta de compostos orgânicos voláteis durante a pirólise pode ter produzido a estrutura mesoporosa em favo de mel no biocarvão à base de folhas de mamona. Também foi observado no estudo da adsorção de Triclosan usando biocarvão derivado de biossólidos de águas residuais que a adesão de Triclosan à superfície de biochar aumentou com o aumento da temperatura de pirólise [26].

4.3 pH, tempo de equilíbrio e regeneração do biocarvão

Foi visto nos resultados que os valores de pH utilizados nos experimentos foram muito diversificados já que depende das propriedades individuais do biocarvão, do tipo de poluente e da mistura dos mesmos. Logo, se faz necessário analisar o ponto de carga zero (pHPCZ) dos materiais antes de cada experimento, pois o pH interfere nos mecanismos de adsorção como por exemplo a interação eletrostática.

KALDERIS et al. [25], concluíram que a interação eletrostática entre o poluente e o biocarvão é dependente do pH e, na maioria dos sistemas com biocarvões e contaminantes ionizáveis, as interações eletrostáticas desempenham um papel importante na adsorção. Desse modo, pode-se dizer que o pH da solução teve forte influência principalmente na adsorção dos metais, que em sua maioria acontece através da interação eletrostática e da troca iônica. Na adsorção de cádmio por biocarvão derivado de lodo de esgoto municipal, TAN et al. [55] concluíram que a precipitação formada pelo aumento do pH e troca iônica entre Ca^{2+} e Cd^{2+} podem ser

suas principais vias de adsorção. No experimento de adsorção de cádmio em águas residuais por biocarvão modificado com óxido de magnésio, por exemplo, quando o pH da solução ultrapassou 7, a taxa de adsorção de cádmio diminuiu [56].

Outro parâmetro importante é o tempo de equilíbrio da adsorção, que também foi diversificado nos diferentes estudos de caso. Ele pode afetar a viabilidade técnica e econômica do tratamento da água residuária, pois tempos de equilíbrio muito longos demandam mais tempo de monitoramento e energia elétrica dos aparelhos, além de prolongar o tempo do tratamento, diminuindo a produtividade.

A regeneração do biocarvão pode ser compreendida como a limpeza dos poros do biocarvão por meio de uma substância a fim de liberar sítios ocupados por poluentes em adsorção anterior, para fins de reutilização do biocarvão. Na maioria dos casos a eficiência de adsorção após regeneração se manteve alta, acima de 60%. Por exemplo, no estudo da remoção de matéria orgânica dissolvida (DOM) com biocarvão modificado com quitosana [7], após 10 dessorções com hidróxido de sódio, o desempenho de adsorção diminuiu apenas em aproximadamente 10%. Já na adsorção de fósforo com esferas de biocarvão derivadas de *Hydrocotyle vulgaris* (Trevo) [52], após cinco ciclos de adsorção-dessorção, a eficiência de remoção ainda permaneceu em 87,06%.

5. CONCLUSÃO

Neste estudo foi possível perceber que as pesquisas em relação ao tratamento de água residuária com biocarvão ainda são recentes e os experimentos estão sendo realizados em pequena escala com efluentes sintéticos. A maioria dos estudos tratavam da remoção de micropoluentes emergentes, principalmente fármacos, produtos cosméticos e corantes, além dos metais.

O biocarvão ativado apresentou alta eficiência de remoção na maioria dos estudos, mesmo após ciclos de regeneração, indicando grande potencial de uso no pós-tratamento de água residuária. Para tanto, é necessário analisar as características como pH, temperatura de pirólise e temperatura do processo, que afetam a eficiência da adsorção. A temperatura de pirólise mais utilizada estava entre 400°C e 800°C e a adsorção aumentou com o aumento da temperatura do processo em até 45° C.

As matérias-primas utilizadas para produção do biocarvão se mostraram diversificadas e geralmente, os estudos utilizaram matérias-primas disponíveis na região do estudo. O modelo cinético de pseudo segunda-ordem e a isoterma de Langmuir foram as que melhor se ajustaram à maioria dos experimentos.

Sugere-se para posteriores estudos, a análise econômica do uso do biocarvão como meio filtrante, pois poucos artigos foram encontrados com essa temática, além do estudo do descarte do biocarvão após a adsorção dos poluentes. A alta eficiência da remoção dos poluentes após regenerações do biocarvão indica seu potencial econômico e sustentável, entretanto não foi explícito nos artigos como ocorreu o processo de regeneração. Além disso, ainda se faz necessária a realização de experimentos e estudos de caso utilizando água residuária real ao invés de efluente sintético na remoção de poluentes.

6. AGRADECIMENTOS

As autoras agradecem à Universidade Federal de Sergipe e à plataforma CAPES pelo acesso às bases de dados de estudos para essa pesquisa.

7. BIBLIOGRAFIA

- [1] UNICEF, JMP, OMS. “Progress on drinking water, sanitation and hygiene: 2000-2017: Special focus on inequalities”, 2019.
- [2] ONU, “Mais de 4,2 bilhões de pessoas vivem sem acesso a saneamento básico”, Notícias, 2020.
- [3] KOMOLAFE, O., et al., “Occurrence and removal of micropollutants in full scale aerobic, anaerobic and facultative wastewater treatment plants in Brazil”, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112286>, Journal of Environmental Management, v. 287, n. 112286, Jun. 2021.
- [4] AQUINO, S. F., BRANDT, E. M. F., CHERNICHARO, C. A. de L., “Remoção de fármacos e desreguladores endócrinos em estações de tratamento de esgoto: revisão da literatura”, Eng. Sanit. Ambient., v. 18, n. 3, set. 2013.
- [5] XU, L., WU, C., CHAI, C., et al., “Adsorption of micropollutants from wastewater using iron and nitrogen codoped biochar: Performance, kinetics and mechanism studies”, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.127606>, Journal of Hazardous Materials, v. 424, Part C, n. 127606, pp., Feb. 2022.
- [6] SPATH, J., ARUMUGAM, P., LINDBERG, R.H., et al., “Biochar for the removal of detected micropollutants in South African domestic wastewater: a case study from a demonstration-scale decentralized wastewater

treatment system in eThekweni”, DOI: <https://doi.org/10.17159/wsa/2021.v47.i4.3861>, *Water SA*, v. 47, n. 4, pp. 396-416, Oct. 2021.

[7] SHI, Y., HU, H. e REN, H., “Dissolved organic matter (DOM) removal from biotreated coking wastewater by chitosan modified biochar: Adsorption fractions and mechanisms”, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.122281>, *Bioresource Technology*, v. 297, n. 122281, Feb. 2020.

[8] ZHANG, M., HE, M., CHEN, Q., et al., “Feasible synthesis of a novel and low-cost seawater modified biochar and its potential application in phosphate removal/recovery from wastewater”, DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.153833>, *Science of the Total Environment*, v. 824, n. 153833, Feb. 2022.

[9] SHANG, W., LIU, Y., HE, Q., et al., “Efficient adsorption of organic matters and ions by porous biochar aerogel as pre-treatment of ultrafiltration for shale gas wastewater reuse”, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2020.100011>, *Chemical Engineering Journal Advances*, v. 2, n. 100011, Oct. 2020.

[10] YU, K. L., LAU, B. F., et al., “Recent developments on algal biochar production and characterization”, *Bioresource Technology*, v. 246, pp. 2-11, Dec. 2017.

[11] CAPRARIIS, B., FILIPPIS, P., HERNANDEZ, A.D., et al., “Pyrolysis wastewater treatment by adsorption on biochars produced by poplar biomass”, DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.04.007>, *Journal of Environmental Management*, v. 197, pp. 231-238, Jul. 2017.

[12] KONNEH, M., WANDERA, S. M., et al., “Adsorption and desorption of nutrients from abattoir wastewater: modelling and comparison of rice, coconut and coffee husk biochar”, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2021.e08458>, *Heliyon*, v. 7, n. e08458, Nov. 2021.

[13] MAMERA, M., TOL, J. J., AGHOGHOVWIA, M. P., “Treatment of fecal sludge and sewage effluent by pinewood biochar to reduce wastewater bacteria and inorganic contaminants leaching”, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.watres.2022.118775>, *Water Research*, v. 221, n. 118775, pp., Aug. 2022.

[14] DALAHMEH, S., AHRENS, L., GROS, M., et al., “Potential of biochar filters for onsite sewage treatment: Adsorption and biological degradation of pharmaceuticals in laboratory filters with active, inactive and no biofilm”, DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.08.178>, *Science of The Total Environment*, v. 612, n., pp. 192-201, Jan. 2018.

[15] HU, H., ZHANG, J., et al., “Adsorption of toxic metal ion in agricultural wastewater by torrefaction biochar from bamboo shoot shell”, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.130558>, *Journal of Cleaner Production*, v. 338, n. 130558, Mar. 2022.

[16] WANG, H., WANG, H., ZHAO, H., et al., “Adsorption and Fenton like removal of chelated nickel from Zn-Ni alloy electroplating wastewater using activated biochar composite derived from Taihu blue algae”, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2019.122372>, *Chemical Engineering Journal*, v. 379, n. 122372, pp., Jan. 2020.

[17] HASHEM, M. A., HASAN, M., MOMEN, M. A., et al., “Water hyacinth biochar for trivalent chromium adsorption from tannery wastewater”, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.indic.2020.100022>, *Environmental and Sustainability Indicators*, v. 5, n. 100022, pp., Feb. 2020.

[18] BORTHAKUR, P., ARYAFARD, M., ZARA, Z., et al., “Computational and experimental assessment of pH and specific ions on the solute solvent interactions of clay biochar composites towards tetracycline adsorption: Implications on wastewater treatment”, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.111989>, *Journal of Environmental Management*, v. 283, n. 111989, pp., Apr. 2021.

[19] LI, X., SHI, J., “Simultaneous adsorption of tetracycline, ammonium and phosphate from wastewater by iron and nitrogen modified biochar: Kinetics, isotherm, thermodynamic and mechanism”, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.133574>, *Chemosphere*, v. 293, n. 133574, pp., Apr. 2022.

[20] HAMADEEN, H. M., ELKHATIB, E. A., “New nanostructured activated biochar for effective removal of antibiotic ciprofloxacin from wastewater: Adsorption dynamics and mechanisms”, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envres.2022.112929>, *Environmental Research*, v. 210, n. 112929, pp., Feb. 2022.

[21] LI, J., YU, G., PAN, L. et al., “Ciprofloxacin adsorption by biochar derived from copyrolysis of sewage sludge and bamboo waste”, DOI: <https://doi.org/10.1007/s11356-020-08333-y>, *Environ Sci Pollut Res*, v. 27, n., pp. 22806–22817, Apr. 2020.

[22] YAO, H., et al., “Adsorption of Fluoroquinolone Antibiotics by Wastewater Sludge Biochar: Role of the Sludge Source”, DOI: <https://doi.org/10.1007/s11270-012-1370-7>, *Water Air Soil Pollut*, v. 224, n. 1370, pp. 1-9, Nov. 2012.

[23] ESCUDERO-CURIEL, S., PENELAS, U., et al., “An approach towards Zero-Waste wastewater

technology: Fluoxetine adsorption on biochar and removal by the sulfate radical”, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.129318>, Chemosphere, v. 268, n. 129318, Dec. 2020.

[24] FERNANDES, J. O., BERNARDINO, C. A. R., et al., “Biochar generated from agroindustry sugar cane residue by low temperature pyrolysis utilized as an adsorption agent for the removal of thiamethoxam pesticide in wastewater”, DOI: <https://doi.org/10.1007/s11270-021-05030-5>, Water, Air & Soil Pollut, v. 232, n. 67, Feb. 2021.

[25] KALDERIS, D., KAYAN, B., AKAY, S., et al., “Adsorption of 2,4-dichlorophenol on paper sludge/wheat husk biochar: Process optimization and comparison with biochars prepared from wood chips, sewage sludge and hog fuel/demolition waste”, DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jece.2017.04.039>, Journal of Environmental Chemical Engineering, v. 5, pp. 2222-2231, Apr. 2017.

[26] TONG, Y., MAYER, B. K., MCNAMARA, P. J., “Triclosan adsorption using wastewater biosolids derived biochar”, DOI: <https://doi.org/10.1039/c6ew00127k>, Environmental Science: Water Research & Technology, v. 2, pp. 761-768, Jun. 2016.

[27] REGKOUZAS, P., DIAMADOPOULOS, P., “Adsorption of selected organic micropollutants on sewage sludge biochar”, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.02.165>, Chemosphere, v. 224, n., pp. 840-851, Jun. 2019.

[28] ZHOU, Y., XU, M., HUANG, D., et al., “Modulating hierarchically microporous biochar via molten alkali treatment for efficient adsorption removal of perfluorinated carboxylic acids from wastewater”, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.143719>, Science of the Total Environment, v. 757, n. 143719, Nov. 2020.

[29] DALAHMEH, S. S., ALZIQ, N., AHRENS, L., “Potencial de filtros de biocarvão para tratamento de águas residuais no local: efeitos de biofilmes ativos e inativos na adsorção de per- e polifluoroalquil substâncias em experimentos de coluna de laboratório”, Environmental Pollution, v. 247, p. 155-164, April, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.01.032>.

[30] STEIGERWALD, J. M., RAY, J. R., “Adsorption behavior of perfluorooctanesulfonate (PFOS) onto activated spent coffee grounds biochar in synthetic wastewater effluent”, DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.hazl.2021.100025>, Journal of Hazardous Materials Letters, v. 2, n. 100025, Apr. 2021.

[31] SONU, K., SOGANI, M., et al., “Enhanced decolorization and treatment of textile dye wastewater through adsorption on acid modified corncob derived biochar”, DOI: <https://doi.org/10.1002/slct.202003156>, Chemistry Select, v. 5, pp. 12287-12297, Oct. 2020.

[32] BEAKOU, B. H., HASSANI, K. E., et al., “A novel biochar from Manihot esculenta Crantz waste: application for the removal of Malachite Green from wastewater and optimization of the adsorption process”, <https://doi.org/10.2166/wst.2017.332>, Water Sci Technol, v. 76, n. 6, pp. 1447-1456, Sep. 2017.

[33] SEWU, D. D., LEE, D. S., WOO, S. H., et al., “Decolorization of triarylmethane dyes, malachite green, and crystal violet, by sewage sludge biochar: Isotherm, kinetics, and adsorption mechanism comparison”, DOI: <https://doi.org/10.1007/s11814-020-0727-7>, Korean J. Chem. Eng., v. 38, n. 3, pp. 531-539, Dez. 2020.

[34] SULEMAN, M., ZAFAR, M., AHMED, A., et al., “Castor Leaves Based Biochar for Adsorption of Saffranin from Textile Wastewater”, DOI: <https://doi.org/10.3390/su13126926>, Sustainability, v. 13, n. 12, pp., May 2021.

[35] CUBA, R. M. F., DE PAULA, B. M., et al., “Tartrazine dye removal with activated biochar produced from anaerobic sludge of an industrial wastewater treatment plant”, DOI: 10.1590/S1517-707620210004.1309, Revista Matéria, v. 26, n. 04, Apr. 2021.

[36] SILVA, W.L., MURARO, P.C.L., PAVOSKI, G. et al., “Preparation and characterization of biochar from cement waste for removal of rhodamine B dye”, DOI: <https://doi.org/10.1007/s10163-022-01416-7>, Journal of Material Cycles Waste Management, v. 24, pp. 1333–1342, May 2022.

[37] NASCIMENTO, B. F., ARAUJO, C. M. B., et al., “Adsorption of Reactive Black 5 and Basic Blue 12 using biochar from gasification residues: Batch tests and fixedbed breakthrough predictions for wastewater treatment”, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biteb.2021.100767>, Bioresource Technology Reports, v. 15, n. 100767, Jun. 2021.

[38] CORDOVA, B. M., CRUZ, J. P. S, et al., “Simultaneous adsorption of a ternary mixture of brilliant green, rhodamine B and methyl orange as artificial wastewater onto biochar from cocoa pod husk waste Quantification of dyes using the derivative spectrophotometry method”, <https://doi.org/10.1039/d0nj00916d>, New J. Chem., v. 44, n. 20, pp. 8303-8316, Feb. 2020.

- [39] KOSAIYAKANON, C., KUNGSANANT, S., 2020 “Adsorption of Reactive Dyes from Wastewater Using Cationic Surfactant-modified Coffee Husk Biochar”, *Environment and Natural Resources Journal*, v. 18, n. 1, Mar. 2020.
- [40] DAI, Q., LIU, Q., ZHANG, X., et al., “Synergetic effect of copyrolysis of sewage sludge and lignin on biochar production and adsorption of methylene blue”, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.124587>, *Fuel*, v. 324, Part A, n. 124587, pp., Sep. 2022.
- [41] SINGH, S., PRAJAPATI, A. K., et al., “Adsorption potential of biochar obtained from pyrolysis of raw and torrefied *Acacia nilotica* towards removal of methylene blue dye from synthetic wastewater”, DOI: <https://doi.org/10.1007/s13399-021-01645-0>, *Biomass Conversion and Biorefinery*, Jun. 2021.
- [42] FAN, S., WANG, Y., et al., “Removal of methylene blue from aqueous solution by sewage sludge derived biochar: Adsorption kinetics, equilibrium, thermodynamics and mechanism”, DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jece.2016.12.019>, *Journal of Environmental Chemical Engineering*, v. 5, pp. 601-611, Dec. 2016.
- [43] SALEHI, E., ASKARI, M., et al., “Phosphoric acid treated spent tea residue biochar for wastewater decoloring: batch adsorption study and process intensification using multivariate data-based optimization”, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cep.2020.108170>, *Chemical Engineering and Processing - Process Intensification*, v. 158, n. 108170, Oct. 2020.
- [44] KHALID, W., CHENG, C. K., et al., “Fabrication and characterization of a novel Ba²⁺ loaded saw dust biochar doped with iron oxide for the super adsorption of SO₄²⁻ from wastewater”, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.135233>, *Chemosphere*, v. 303, Part 3, n. 135233, Sep. 2022.
- [45] TANG, Y., ALAM, M. S., et al., “Influence of pyrolysis temperature on production of digested sludge biochar and its application for ammonium removal from municipal wastewater”, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.10.268>, *Journal of Cleaner Production*, v. 209, pp. 927-936, Oct. 2019.
- [46] LV, B., ZHANG, W., et al., “Influence of different metals on production of sewage sludge-based biochar and its application for ammonium and phosphate adsorption removal from wastewater”, DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)EE.1943-7870.0002039](https://doi.org/10.1061/(ASCE)EE.1943-7870.0002039), *Journal of Environmental Engineering*, v. 148, n. 04022051, Nov. 2022.
- [47] YOU, H., LIN, H., et al., “Iron-aluminum and aluminum single impregnated biochar composite for nitrate adsorption in rare earth wastewater: behavior and mechanism”, DOI: <https://doi.org/10.1007/s13399-021-02148-8>, *Biomass Conversion and Biorefinery*, Oct. 2021.
- [48] LI, J., LI, B., HUANG, H., et al., “Investigation into lanthanum coated biochar obtained from urban de altered sewage sludge for enhanced phosphate adsorption”, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.136839>, *Science of the Total Environment*, v. 714, n. 136839, Jan. 2020.
- [49] JIANG, Y., LI, A., et al., “Phosphate adsorption from wastewater using ZnAl-LDO loaded modified banana straw biochar”, DOI: <https://doi.org/10.1007/s11356-019-05183-1>, *Environmental Science and Pollution Research*, v. 26, pp. 18343–18353, May 2019.
- [50] YUAN, J., ZHU, Y., WANG, J., et al., “Facile Modification of Biochar Derived from Agricultural Straw Waste with Effective Adsorption and Removal of Phosphorus from Domestic Sewage”, DOI: <https://doi.org/10.1007/s10904-021-01992-5>, *J Inorg. Organomet Polym*, v. 31, n., pp. 3867–3879, Apr. 2021.
- [51] FU, X., WANG, P., et al., “Hydrocotyle vulgaris derived novel biochar beads for phosphorus removal: static and dynamic adsorption assessment”, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jece.2022.108177>, *Journal of Environmental Chemical Engineering*, v. 10, n. 108177, Jun. 2022.
- [52] LI, A., DENG, H., et al., “High Efficiency Removal of Cr (VI) from Wastewater by Mg Loaded Biochars: Adsorption Process and Removal Mechanism”, DOI: <https://doi.org/10.3390/ma13040947>, *Materials*, v. 13, n. 947, Feb. 2020.
- [53] BU, J., LI, W., et al., “Adsorption of Cr (VI) from wastewater by iron-modified coconut shell Biochar”, DOI: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202124801059>, In: *E3S Web Conf.*, v. 248, n. 01059, Apr. 2021.
- [54] XU, Z., Lin, Y., et al., “Adsorption behaviors of paper mill sludge biochar to remove Cu, Zn and As in wastewater”, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.eti.2021.101616>, *Environmental Technology & Innovation*, v. 23, n. 101616, Aug. 2021.
- [55] TAN, C., ZEYU, Z., et al., “Adsorption of cadmium by biochar derived from municipal sewage sludge: Impact factors and adsorption mechanism”, DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.chemosphere.2015.04.052>, *Chemosphere*, v. 134, pp. 286-293, Sept. 2015.
- [56] XU, Y., XIA, H., ZHANG, Q., et al., “Adsorption of cadmium (II) in wastewater by magnesium oxide

- modified biochar”, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2022.104059>, *Arabian Journal of Chemistry*, v. 15, n. 104059, pp., Sep. 2022.
- [57] WANG, G., YANG, R., et al., “Adsorption of Cd (II) onto *Auricularia auricula* spent substrate biochar modified by CS₂: Characteristics, mechanism and application in wastewater treatment”, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.132882>, *Journal of Cleaner Production*, v. 367, n. 132822, Jun. 2022.
- [58] LIAO, J., DING, L., et al., “Efficient removal of uranium from wastewater using pig manure biochar: Understanding adsorption and binding mechanisms”, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.127190>, *Journal of Hazardous Materials*, v. 423, Part B, n. 127190, Feb. 2022.
- [59] DONG, L., LI, S., et al., “Enhanced adsorption of Eu (III) from wastewater using *Solidago canadensis* derived biochar functionalized by Ca/Al-LDH and hydroxyapatite”, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apusc.2021.150794>, *Applied Surface Science*, v. 567, n. 150794, Jul. 2021.
- [60] LEI, W., LI, T. T., et al., “Study on adsorption of lead by biochar prepared from sludge of municipal wastewater treatment plant”, DOI: 10.1088/1757-899X/479/1/012007, In: *The 3rd International Conference on New Material and Chemical Industry, Materials Science and Engineering*, v. 479, Atlanta, 2019.
- [61] SHAFIQ, M., ALAZBA, A. A., AMIN, M. T., “Kinetic and isotherm studies of ni²⁺ and pb²⁺ adsorption from synthetic wastewater using *eucalyptus camdulensis* — Derived Biochar”, DOI: <https://doi.org/10.3390/su13073785>, *Sustainability*, v. 13, n. 3785, Mar. 2021.
- [62] WANG, X., LI, X., LIU, G., et al., “Mixed heavy metal removal from wastewater by using discarded mushroom stick biochar: adsorption properties and mechanisms”, DOI: 10.1039/c8em00457a, *Environ. Sci.: Processes Impacts*, v. 21, n. 584, Jan. 2019.
- [63] YANG, Z., HU, W., et al., “A Novel Manganese-Rich Pokeweed Biochar for Highly Efficient Adsorption of Heavy Metals from Wastewater: Performance, Mechanisms, and Potential Risk Analysis”, DOI: <https://doi.org/10.3390/pr9071209>, *Processes*, v. 9, n. 1209, Jul. 2021.
- [64] YANG, G., JIANG, H., “Amino modification of biochar for enhanced adsorption of copper ions from synthetic wastewater”, DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.watres.2013.09.050>, *Water Research*, v. 48, pp. 396-405, Oct. 2013.
- [65] KUMI, A. G., IBRAHIM, M. G., et al., “Synthesis, characterization and adsorption properties of sewage sludge derived biochar modified with eggshell”, In: *Advances in Science and Engineering Technology International Conferences (ASET)*, pp. 1-4, Jun. 2020.
- [66] PIEKARSKI, J., DABROWSKI, T., DABROWSKI, J., IGNATOWICZ, K., “Preliminary studies on odor removal in the adsorption process on biochars produced from sewage sludge and beekeeping waste”, DOI 10.24425/aep.2021.137275, *Archives of Environmental Protection*, v. 47, n. 2, pp. 20–28, 2021.
- [67] WANG, M., WANG, G., QIAN, L., et al., “Biochar production using biogas residue and their adsorption of ammonium nitrogen and chemical oxygen demand in wastewater”, DOI: <https://doi.org/10.1007/s13399-021-01510-0>, *Biomass Conversion and Biorefinery*, Apr. 2021.
- [68] AHMED, M. J., DHEDAN, S. K., “Equilibrium isotherms and kinetics modeling of methylene blue adsorption on agricultural wastes-based activated”, DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.chemosphere.2013.10.071>, *Fluid Phase Equilibria*, v. 317, pp. 9-14, Mar. 2012.
- [69] ZAGO, L., “Discussões sobre a questão ambiental na China: impactos e perspectivas”, *ClimaCom*, n. 13, abril, 2015. DOI: <http://climacom.mudancasclimaticas.net.br/discussoes-sobre-a-questao-ambiental-na-china-impactos-e-perspectivas/>.
- [70] INYANG, M., DICKENSON, E., “The potential role of biochar in the removal of organic and microbial contaminants from potable and reuse water: A review”, DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.chemosphere.2015.03.072>, *Chemosphere*, v. 134, n., pp. 232-240, Mar. 2015.
- [71] MARTI, E., VARIATZA, E., BALCAZA, J. L., “The role of aquatic ecosystems as reservoirs of antibiotic resistance”, DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.tim.2013.11.001>, *Trends in microbiology*, v. 22, n. 1, pp. 36-41, Nov. 2013.
- [72] GALUS, M., et al., “Chronic effects of exposure to a pharmaceutical mixture and municipal wastewater in zebrafish”, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.aquatox.2012.12.016>, *Aquatic Toxicology*, v. 132–133, n., pp. 212-222, May 2013.
- [73] LIMA, D. R., “Adsorção do corante verde malaquita utilizando palha de milho modificada por ultrassom”, Universidade Federal de Santa Maria, Centro de tecnologia, programa de pós-graduação em engenharia química, 2017.

[74] ZHANG, M., GAO, B., et al., "Synthesis of porous MgO biochar nanocomposites for removal of phosphate and nitrate from aqueous solutions", *Chemical Engineering Journal*, v. 210, pp. 26-32, Nov. 2012.

[75] LIU, T., et al., "Adsorption of cadmium and lead from aqueous solution using modified biochar: A review", *Journal of Environmental Chemical Engineering*, v. 10, n. 1, Feb., 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jece.2021.106502>.

[76] FU, C., et al., "Study of adsorption property and mechanism of lead (II) and cadmium (II) onto sulfhydryl modified attapulgite", *Arabian Journal of Chemistry*, v. 14, n. 2, Feb., 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2020.102960>.