

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS  
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA

GIOVANA SANTANA GONÇALVES

APLICAÇÃO DO BIOCARVÃO PROVENIENTE DE RESÍDUOS DE BIOMASSAS NO  
TRATAMENTO DE ÁGUAS RESIDUÁRIAS: UMA REVISÃO CRÍTICA

SÃO CARLOS – SP

2023

GIOVANA SANTANA GONÇALVES

APLICAÇÃO DO BIOCARVÃO PROVENIENTE DE RESÍDUOS DE BIOMASSAS NO  
TRATAMENTO DE ÁGUAS RESIDUÁRIAS: UMA REVISÃO CRÍTICA

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Departamento de Engenharia Química, da Universidade Federal de São Carlos, para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Química.

Orientadora: Profa. Dra. Adriana Paula Ferreira Palhares

SÃO CARLOS – SP

2023

[colocar a ficha catalográfica]

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS

Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia

Departamento de Engenharia Química

**FOLHA DE APROVAÇÃO**

Assinatura dos membros da comissão examinadora que avaliou e aprovou a Defesa de TCC da candidata Giovana Santana Gonçalves, realizada em dd/mm/aaaa:

---

Prof. Dr. [nome]  
Instituição

---

Prof. Dr. [nome]  
Instituição

---

Prof. Dr. [nome]  
Instituição

## AGRADECIMENTOS

Primeiramente gostaria de agradecer aos meus pais, Tereza do Carmo Santana Gonçalves e Aldo Roberto Gonçalves, por sempre me apoiarem nas minhas decisões, me darem suporte ao longo desses anos de graduação, me incentivarem a realizar meus sonhos e por todo amor e carinho que nunca faltaram.

Agradeço ao meu irmão, Matheus Santana Gonçalves, que sempre me encorajou a fazer uma faculdade, foi uma inspiração para mim e esteve aos meus lados em todos os momentos. Agradeço ao meu namorado, Matheus Borges de Matos, por ser um companheiro que compartilha comigo os momentos de alegrias e angústias, os materiais e muitos aprendizados ao longo desses anos.

Sou imensamente grata por todos os meus amigos, de infância e os que conheci ao longo dessa caminhada, por terem feito parte da minha rede de apoio, estando ao meu lado nos momentos de superação, felicidade, tristeza e conquistas.

Agradeço a todos que conheci no Movimento Empresa Júnior, em especial, aos membros da EQ Júnior, os quais me ensinaram sobre liderança, resiliência, empatia, empreendedorismo, trabalho em grupo e gratidão. Foram anos que contribuíram para a minha evolução profissional e pessoal.

Por fim, gostaria de agradecer a todos os professores e funcionários da universidade, por todo o aprendizado. Em especial gostaria de agradecer a professora Adriana Paula Ferreira Palhares por ter me dado a oportunidade de desenvolver esse trabalho, por todo apoio, compreensão e colaboração.

## RESUMO

As águas residuárias englobam todas as águas utilizadas em diversos processos e descartadas com qualidade alterada, incluindo efluentes domésticos, industriais, agropecuários e águas de infiltração. Elas podem conter substâncias químicas e microrganismos prejudiciais à saúde e aos ecossistemas, necessitando de tratamento para reduzir os impactos ambientais negativos. Embora o saneamento básico no Brasil tenha avançado após 1970, ainda existe um déficit significativo de acesso aos serviços de coleta e tratamento de efluentes. Nesse cenário, o biocarvão tem se destacado como uma alternativa de tratamento promissora e sustentável, devido à sua superfície porosa semelhante à do carvão ativado, porém com consumo energético e custos inferiores. O biocarvão pode ser obtido através de uma biomassa carbonizada proveniente de resíduos sólidos e biomassa agrícola. Este trabalho teve como objetivo avaliar a aplicabilidade do biocarvão proveniente de diferentes fontes de resíduos de biomassas no tratamento de águas residuárias, por meio de uma revisão crítica da literatura. Destacou-se neste trabalho os estudos realizados com biocarvões obtidos através de bagaço de laranja, cascas de coco verde, folhas de amendoeira-da-praia, resíduos vegetais lenhosos e lodo. A partir dos estudos analisados, concluiu-se que o biocarvão, em geral, apresenta bons resultados na remoção de contaminantes, como 100% de capacidade adsortiva de fármaco livre e 46% de remoção de tartrazina. Além disso, observou-se que o emprego de diferentes biomassas e condições de pirólise interferem nas propriedades físico-químicas do biocarvão, como área superficial específica, grupos funcionais ativos, matriz de carbono relativamente estruturada, pH e porosidade. Essas propriedades são de grande relevância para o uso do biocarvão no tratamento de águas residuárias, o que ressalta a importância de escolher a matéria-prima adequada para a sua produção, de acordo com os requisitos particulares da aplicação pretendida. O biocarvão pode representar uma escolha sustentável, simplificada e econômica para a remoção de contaminantes de águas residuárias, como evidenciado pelo uso do biocarvão de bagaço de laranja, que reaproveita um subproduto que seria descartado. Contudo, é importante incentivar a geração local de renda, a criação de *startups* ou de setores internos em empresas que pretendem utilizar o biocarvão no tratamento de efluentes ou fornecer o produto ou serviço.

**Palavras-chave:** Biocarvão. Biomassa. Águas Residuárias. Esgoto Sanitário. Sustentabilidade.

## ABSTRACT

Wastewater encompasses all waters used in various processes and discarded with altered quality, including domestic, industrial, agricultural effluents, and infiltration waters. They may contain chemicals and microorganisms harmful to human health and ecosystems, requiring treatment to mitigate adverse environmental impacts. While basic sanitation in Brazil has advanced since 1970, a significant deficit in access to wastewater collection and treatment still persists. In this context, biochar has emerged as a promising and sustainable treatment alternative, since it has a porous surface similar to activated charcoal, but with lower energy consumption and costs. Biochar can be derived from carbonized biomass originating from solid waste and agricultural biomass. The objective of this study was to assess the applicability of biochar from diverse biomass sources in wastewater treatment, through a critical literature review. Studies involving biochars derived from orange peel, green coconut husks, beach almond leaves, woody plant residues, and sludge were highlighted. From the analyzed studies, it is evident that biochar generally yields favorable results in contaminant removal, such as 100% adsorptive capacity for pharmaceuticals and 46% removal of tartrazine. Furthermore, it was observed that the different biomass and pyrolysis conditions influences biochar's physicochemical properties, such as specific surface area, active functional groups, relatively structured carbon matrix, pH, and porosity. These properties are of great importance for the use of biochar in wastewater treatment, highlighting the importance of selecting the appropriate raw material for its production, according to the specific requirements of the intended application. Biochar can represent a sustainable, simplified, and cost-effective alternative for removing contaminants from wastewater, as evidenced by the use of orange peel-derived biochar, which repurposes a byproduct that would otherwise be discarded. However, it is important to encourage local income generation, foster startups, or establish internal departments within companies that intend to use biochar in effluent treatment or provide the product or service.

**Keywords:** Biochar. Biomass. Wastewater. Sanitary Sewage. Sustainability.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Investimento previsto para universalização do saneamento básico no Brasil (2006) .....	20
Figura 2 – Frações da participação de diferentes tipos de fontes na matriz energética em diferentes regiões do mundo.....	26
Figura 3 – Exemplificação da diferença entre o ciclo da biomassa e do petróleo.....	27
Figura 4 – Esquema da conversão da biomassa em energia.....	27
Figura 5 – Diagrama de van Krevelen da biomassa e outros combustíveis .....	28
Figura 6 – Análise do potencial de bioenergia ao longo dos anos .....	29
Figura 7 – Processos de conversão de biomassa em energia.....	30
Figura 8 – Representação de uma estrutura ideal do biocarvão .....	32
Figura 9 – Esquematisação dos tipos de isotermas .....	35
Figura 10 – Fluxograma com as etapas realizadas no presente trabalho.....	37
Figura 11 – Comparativo da quantidade de dados encontrados para as palavras-chaves em todas as plataformas de pesquisa .....	38
Figura 12 – Concentração de tetraciclina em função do tempo de adsorção .....	46
Figura 13 – Ajustes realizados para a isoterma de adsorção do modelo de Langmuir.....	46
Figura 14 – Morfologia do fruto do coco-da-baia .....	47
Figura 15 – Amendoeira-da-praia .....	51
Figura 16 – Curva do pH em função da eficiência da remoção (%) de radiotraçadores em águas contaminadas .....	52
Figura 17 – Microscopia eletrônica do biocarvão produzido de folhas secas de amendoeira-da-praia .....	53
Figura 18 – Serragem .....	55
Figura 19 – Macroporos do biocarvão na temperatura de 620 °C.....	57
Figura 20 – Produção de carvão vegetal a partir de plantio de eucalipto.....	58
Figura 21 – Lodo anaeróbio .....	60
Figura 22 – Remoção da tartrazina em função do pH da solução .....	61
Figura 23 – Biocarvão de finos de carvão (madeira) e biocarvão de coco verde.....	62
Figura 24 – Curva granulométricas dos biocarvão de madeira e coco verde .....	63
Figura 25 – Esquema de uma barreira reativa permeável .....	69

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Quantidade de dados encontrados para as palavras-chaves em todas as plataformas de pesquisa.....	38
Tabela 2 – Fração de tetraciclina removida em função da massa de biocarvão .....	45
Tabela 3 – Propriedades do biocarvão para temperaturas de 400 °C e 600 °C .....	49
Tabela 4 – Avaliação econômica preliminar .....	50
Tabela 5 – Estimativa de investimento.....	50
Tabela 6 – Características dos radiotraçadores Co-57, Mn-54 e Zn-65 .....	51
Tabela 7 – Concentração dos elementos na amostra de biocarvão a 620 °C .....	56
Tabela 8 – Valores de área superficial em função da temperatura .....	56

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Programas federais com investimento em saneamento na década de 1990 .....	23
Quadro 2 – Classificação dos tipos de pirólise.....	34
Quadro 3 – Portfólio do estudo .....	39
Quadro 4 – Condições de pirólise de cada estudo analisado.....	65
Quadro 5 – Resumo dos principais resultados dos estudos analisados na revisão de literatura .....	67

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABIB	Associação Brasileira de Indústrias de Biomassa
AESBE	Associação Brasileira das Empresas Estaduais de Saneamento
ANA	Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico
b.u.	Base úmida
BCA	Biocarvão Ativado
BET	Brunauer-Emmett-Teller
BID	Banco Interamericano de Desenvolvimento
BIRD	Banco Internacional para Reconstrução e Desenvolvimento
BNDES	Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social
Capes	Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior
CBT	Conversão à baixa temperatura
CNPq	Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico
DQO	Demanda Química de Oxigênio
Embasa	Empresa Baiana de Águas e Saneamento
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
ETAR	Estação de Tratamento de Águas Residuais
ETE	Estações de Tratamento de Esgoto
FCP/SAN	Programa de Financiamento a Concessionários Privados de Saneamento
FINEP	Financiadora de Estudos e Projetos
Finep	Financiadora de Estudos e Projetos
Funasa – SB	Fundação Nacional de Saúde – Saneamento Básico
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
MEV	Microscópio Eletrônico de Varredura
ODS	Objetivos de Desenvolvimento Sustentável
OGU	Orçamento Geral da União
PAEs	Ésteres do ácido ftálico
Pass	Programa de Ação Social em Saneamento
Planasa	Plano Nacional de Saneamento

Plansab	Plano Nacional de Saneamento Básico
PMSS	Programa de Modernização do Setor Saneamento
PNCDA	Programa Nacional Combate ao Desperdício Água
Pronurb	Programa de Saneamento para Núcleos Urbano
Propar	Programa de Assistência Técnica à Parceria Público-Privada em
Prosab	Programa de Pesquisas em Saneamento Básico
Prosege	Programa de Ação Social em Saneamento e Geração de Empregos
Qtd.	Quantidade
Sanesul	Empresa de Saneamento de Mato Grosso do Sul
SNIS	Sistema Nacional de Informações de Saneamento
tep	Toneladas equivalentes de petróleo
TIR	Taxa Interna de Retorno
TNT	Tecido Não-Tecido
UASB	Reator de manta de lodo ( <i>Upflow Anaerobic Sludge Blanket</i> )
Un.	Unidade
VPL	Valor Presente Líquido
VT	Valor Total
VU	Valor Unitário

## LISTA DE SÍMBOLOS

°C	Grau Celsius
μS	Microsiemens
Al	Alumínio
C	Carbono
Ca	Cálcio
CH <sub>4</sub>	Metano
Cl	Cloro
cm	Centímetros
CO	Monóxido de carbono
CO <sub>2</sub>	Dióxido de carbono
Co-57	Isótopo de massa 57 do Cobalto
Cr (VI)	Cromo hexavalente
g	Gramas
H	Hora
H	Hidrogênio
K	Potássio
keV	Mil elétrons-volt
kg	Quilograma
kJ	Quilojoule
kVA	Quilovoltampere
kW	Quilowatt
nm	Nanometro
m	Metro
m <sup>2</sup>	Metros quadrados
m <sup>3</sup>	Metros cúbicos
Mg	Magnésio
mg	Miligrama
min	Minuto
MJ	Megajoule

mL	Mililitro
mm	Milímetros
Mn-54	Isótopo de massa 54 do Manganês
N	Nitrogênio
Na	Sódio
O	Oxigênio
P	Fósforo
Pb	Chumbo
PCI	Poder Calorífico Inferior
PCS	Poder Calorífico Superior
pH	Potencial hidrogeniônico
rpm	Rotações por minuto
S	Enxofre
Si	Silício
T	Temperatura
TiO <sub>2</sub>	Dióxido de titânio
Zn-65	Isótopo de massa 65 do Zinco
ΔC	Variação de temperatura na escala Celsius

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO.....</b>	<b>16</b>
<b>2</b>	<b>OBJETIVOS.....</b>	<b>19</b>
<b>3</b>	<b>REVISÃO BILIOGRÁFICA .....</b>	<b>20</b>
3.1	ÁGUAS RESIDUÁRIAS .....	20
<b>3.1.1</b>	<b>Esgoto sanitário.....</b>	<b>21</b>
<b>3.1.2</b>	<b>Problemas de saneamento básico no Brasil.....</b>	<b>22</b>
3.2	BIOMASSA.....	25
<b>3.2.1</b>	<b>Bioenergia .....</b>	<b>29</b>
<b>3.2.2</b>	<b>Biocarvão .....</b>	<b>31</b>
<b>3.2.3</b>	<b>Pirólise.....</b>	<b>33</b>
<b>3.2.4</b>	<b>Isotermas de Langmuir .....</b>	<b>34</b>
<b>4</b>	<b>MATERIAL E MÉTODOS .....</b>	<b>37</b>
<b>5</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO.....</b>	<b>40</b>
5.1	CARACTERÍSTICAS FÍSICAS E QUÍMICAS DO BIOCARVÃO .....	40
<b>5.1.1</b>	<b>Grafeno nos biocarvões .....</b>	<b>41</b>
5.2	FONTES DE RESÍDUOS DE BIOMASSA .....	44
<b>5.2.1</b>	<b>Resíduos agrícolas e florestais .....</b>	<b>44</b>
5.2.1.1	Bagaço de laranja.....	44
5.2.1.2	Cascas de coco verde .....	47
5.2.1.3	Folhas de amendoeira-da-praia .....	50
<b>5.2.2</b>	<b>Resíduos vegetais lenhosos precursores da madeira .....</b>	<b>54</b>
5.2.2.1	Serragem .....	54
5.2.2.2	Finos de carvão (madeira).....	58
<b>5.2.3</b>	<b>Lodo.....</b>	<b>59</b>
5.2.3.1	Lodo anaeróbio .....	59
5.3	CASCAS DE COCO VERDE VERSUS FINOS DE CARVÃO (MADEIRA).....	62
5.4	ANÁLISE DOS ESTUDOS .....	64
5.5	IMPACTOS AMBIENTAIS E ECONÔMICOS.....	69
<b>6</b>	<b>CONCLUSÃO.....</b>	<b>71</b>
	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>72</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Ao longo das últimas décadas, observa-se um aumento significativo no consumo de água e sua utilização em diversos processos de produção. Essa crescente demanda por água ressalta a importância de sistemas de abastecimento que garantam a disponibilidade de água para os usos pretendidos, atendendo também aos requisitos de qualidade. Entretanto, diante do aumento da demanda por recursos hídricos, torna-se necessário que o governo e outras partes interessadas invistam nos setores de saneamento básico, especialmente no tratamento de esgoto sanitário, a fim de ampliar a recuperação da qualidade das águas e reduzir os impactos ambientais negativos das águas residuárias (LEONETI; PRADO; OLIVEIRA, 2011).

O crescimento acelerado da industrialização e da urbanização tem comprometido a disponibilidade dos recursos hídricos, em termos qualitativos e quantitativos. Somente 1% de todo o volume de água disponível no planeta é adequado para as atividades humanas e, desse volume, cerca de 35% é descartado em esgotos, prejudicando o meio ambiente e aumentando a escassez de água potável (ALMEIDA, 2011). No Brasil, o déficit de saneamento básico afeta não somente a qualidade de vida, mas também os setores como trabalho, ambiente, educação e saúde (LEONETI; PRADO; OLIVEIRA, 2011). Segundo dados do Sistema Nacional de Informações de Saneamento (SNIS), o índice médio nacional de atendimento com redes de coleta de esgotos é de 55%, enquanto o índice de tratamento dos esgotos gerados é de 50,8% (BRASIL, 2021).

Pimenta *et al.* (2002) ressalta que aproximadamente 80% das águas de abastecimento utilizadas para fins hospitalares, domésticos, entre outros, retornam à rede coletora de esgoto. O esgoto contém cerca de 99,92% de água e a parcela restante é constituída de sólidos inorgânicos e orgânicos. Esses sólidos inorgânicos tendem a conter microrganismos patogênicos, prejudiciais à saúde humana. O autor também destaca que a seleção da tecnologia mais adequada para o tratamento do esgoto gerado deve levar em consideração a qualidade desejada para o efluente tratado, com base na destinação final pretendida, além de outros fatores como a disponibilidade de área e a legislação do local.

Entre as tecnologias de tratamento de água e de efluentes, a adsorção em carvão ativado tem sido muito utilizada, principalmente no setor industrial, em função de sua eficiência na remoção de contaminantes emergentes (e.g., herbicidas, fármacos, cosméticos) (SOPHIA; LIMA, 2018). O carvão ativado possui uma estrutura porosa que lhe permite a capacidade de funcionar como um filtro, adsorvendo em seus poros impurezas variadas, sejam elas sólidas, líquidas ou gasosas (SCHMIDT, 2011). Com isso, ele pode ser utilizado tanto no processo do

tratamento de água, por ser considerado um bom elemento filtrante, quanto no processo de tratamento de efluentes (VELHO, 2012). O emprego do carvão ativado é especialmente indicado durante a etapa de floculação, pois a sua aplicação propicia a formação de flocos densos, que sedimentam facilmente. Isso possibilita uma remoção mais eficiente das partículas indesejáveis, contribuindo para a obtenção de água de melhor qualidade (SCHMIDT, 2011).

Diante da importância do tratamento de efluentes, especialmente no cenário brasileiro, o uso de biocarvão surge como uma alternativa sustentável e econômica para a remediação das questões ambientais, colaborando para a remoção de contaminantes. Estudos comprovam que, apesar dos sistemas modernos de tratamento de águas residuárias apresentarem resultados satisfatórios na remoção de poluentes orgânicos e na redução da contaminação nos cursos d'água, os altos gastos requeridos com energia e materiais podem torná-los menos viáveis quando comparados a sistemas que visam reutilizar a água com menores custos de operação, sendo, portanto, opções mais sustentáveis (HUGGINS *et al.*, 2016). Diversos estudos evidenciam as vantagens do uso do biocarvão para a remoção de contaminantes nas águas e correção de propriedades do solo, colaborando para a redução do aquecimento global e para o sequestro de carbono da atmosfera. Esses efeitos positivos são possíveis devido às propriedades do biocarvão, incluindo sua superfície porosa formada de numerosos compostos aromáticos e outros grupos funcionais ativos, que permite seu uso como adsorvente. O biocarvão também tem a vantagem de ser produzido a partir de matérias-primas abundantemente disponíveis no meio ambiente, especialmente resíduos sólidos e biomassas agrícolas (TAN *et al.*, 2015). Esse aspecto amplia a viabilidade econômica da produção de biocarvão, além de contribuir para a circularidade e a sustentabilidade (MORE *et al.*, 2019).

Apesar de existirem muitas variações nas propriedades específicas do biocarvão, devido à diversidade das biomassas de origem, as principais características determinantes na remoção de poluentes em soluções aquosas são, segundo Mrad e Chehab (2019): elevada área de superfície específica, maior quantidade de carbono fixo em comparação com a matéria-prima, alta capacidade de troca iônica, alta porosidade microestrutural e variação de pH de quase neutro a alcalino. Com isso, o biocarvão forma uma estrutura celular micro, meso ou macroporosa que se caracteriza pela constituição de fibras interconectadas. Essa estrutura fornece a capacidade de absorver quantidades consideráveis de água, o que ressalta o seu papel na purificação de soluções aquosas.

O presente trabalho visa avaliar, por meio de uma revisão crítica da literatura científica, o uso do biocarvão proveniente de resíduos agrícolas, vegetais lenhosos e lodo para o tratamento de águas residuárias do tipo esgoto sanitário. Essas fontes são abundantes no

território nacional e podem constituir adsorventes eficientes na remoção de contaminantes em águas residuárias. Em geral, quando comparado ao carvão ativado, o biocarvão surge como uma alternativa promissora para ser empregada durante processos industriais, apresentando menor consumo de energia, baixo custo operacional e simples manuseio e execução, além de colaborar com a preservação ambiental (GWENZI *et al.*, 2015). Adicionalmente, pretende-se analisar de que forma o processo produtivo do biocarvão influencia em suas propriedades, a fim de contribuir para a escolha da biomassa com melhores resultados para a finalidade pretendida.

## 2 OBJETIVOS

O presente trabalho tem como objetivo efetuar uma revisão crítica da literatura, através de artigos científicos recentes disponíveis em bases de dados científicas, sobre o uso do biocarvão no tratamento de águas residuárias no cenário nacional. Especificamente, focou-se neste trabalho na aplicação do biocarvão para tratar esgotos sanitários, visando a sua recuperação para reuso em atividades humanas. Além disso, foi analisada a aplicação de biocarvão produzido a partir de matérias-primas distintas. A partir deste estudo, busca-se entender a viabilidade e a sustentabilidade da implementação do biocarvão no tratamento de esgoto sanitário, visando identificar a necessidade de políticas públicas, incentivos e financiamentos, especialmente em regiões que carecem de tratamento adequado de esgotos ou que possuam empresas interessadas em reutilizar esse produto ou fornecer esse serviço.

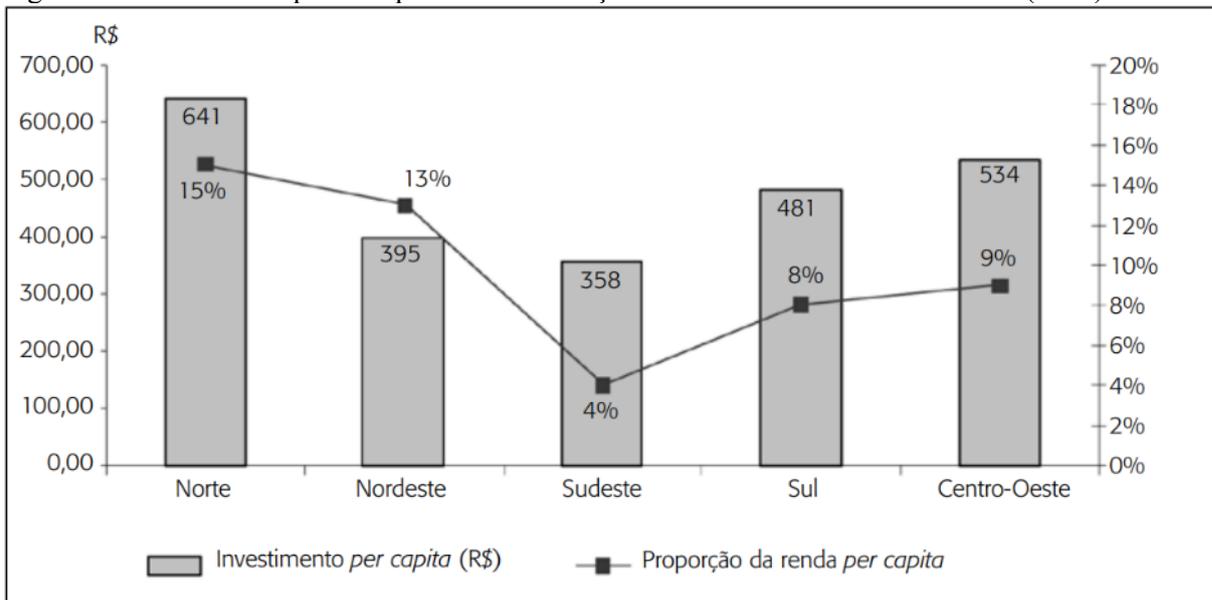
### 3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 3.1 ÁGUAS RESIDUÁRIAS

São denominadas águas residuárias ou residuais todas as águas que, ao serem utilizadas nos mais variados empregos, são descartadas, podendo ser classificadas como domésticas, como as resultantes de cozinhas e banhos; de infiltração; urbanas e industriais. Essas águas, se não tratadas adequadamente, afetam negativamente a fauna e a flora do meio em que são despejadas, uma vez que carregam consigo uma ampla gama de contaminantes. O ideal seria que toda água residual gerada fosse devidamente coletada e direcionada a uma Estação de Tratamento de Águas Residuais (ETAR), onde seria submetida a processos de tratamento biológicos e físico-químicos. Esse tratamento visa a remoção de substâncias indesejáveis, em conformidade com a qualidade requerida para a destinação final pretendida (CETESB, 2023).

No Brasil, o investimento em saneamento básico ocorreu com maior relevância a partir da década de 1970 e, como consequência, o país apresenta déficit de acesso em muitas regiões, o que evidencia uma grande desigualdade. Um estudo realizado pela Associação Brasileira das Empresas Estaduais de Saneamento (AESBE) em 2006 indica qual seria o investimento necessário para a universalização do saneamento básico no Brasil (Figura 1). De acordo com esse estudo, a região Norte demanda quase o dobro do investimento em comparação com a região Sudeste, ressaltando a desigualdade nos recursos disponíveis no território brasileiro (LEONETI; PRADO; OLIVEIRA, 2011).

Figura 1 – Investimento previsto para universalização do saneamento básico no Brasil (2006)



Fonte: Leoneti, Prado e Oliveira (2011)

### 3.1.1 Esgoto sanitário

O esgoto possui 98% de água em sua composição, contendo diversos compostos orgânicos (como óleos, graxas, proteínas e carboidratos), sólidos suspensos, metais, nutrientes, compostos não biodegradáveis, sólidos inorgânicos dissolvidos, microrganismos patogênicos, sólidos grosseiros e inertes, bem como contaminantes tóxicos que podem advir de processos industriais ou acidentais (CAMPOS, 1999).

Segundo a norma brasileira NBR 9648 (ABNT, 1986), os esgotos domésticos e industriais são definidos, respectivamente, como o despejo líquido resultante do uso da água para fins higiênicos e proveniente de processos industriais. Esses despejos, antes de serem descartados, devem estar em conformidade com os padrões de lançamento estabelecidos na legislação. A contribuição pluvial parasitária se refere à parcela do escoamento superficial que é inevitavelmente absorvida pela rede de esgoto sanitário, enquanto a água de infiltração representa todo fluxo indesejável ao sistema coletor do subsolo, permeando as tubulações. Ressalta-se que todos esses despejos são contemplados no termo “esgoto”.

O sistema de esgotamento sanitário define-se como a coleta e tratamento dos efluentes líquidos domésticos e industriais, contribuição fluvial parasitária e água de infiltração. O acesso ao saneamento básico, incluindo o sistema de esgotamento sanitário, é um direito garantido pela Lei nº 11.445/2007, uma vez que se reconhece a importância do saneamento para o bem-estar humano. Essa lei define o saneamento básico como o conjunto de infraestruturas e instalações operacionais de abastecimento de água potável, limpeza urbana, drenagem e manejo de águas pluviais urbanas e esgotamento sanitário (BRASIL, 2007).

A implementação adequada dos sistemas de esgotamento sanitário desempenha um papel fundamental na manutenção da saúde humana e na preservação do meio ambiente, pois tem o potencial de reduzir doenças de veiculação hídrica, preservar os recursos naturais e prevenir a poluição e a contaminação das águas. No entanto, quando esse sistema não possui eficiência adequada de remoção de contaminantes, ocorre a poluição das águas dos mananciais superficiais. Em muitos casos, o esgoto é lançado em rios e córregos sem tratamento prévio, comprometendo a qualidade da água e ameaçando a vida aquática (CASTANHETTI, 2017).

É preocupante que uma parcela da população brasileira ainda não possua acesso aos sistemas de esgotamento sanitário, apesar de ser um direito garantido por lei. Essa problemática atinge principalmente a população mais pobre do país, resultando em impactos à saúde pública e contribuindo para o aumento de doenças como a poliomielite, esquistossomose e amebíase.

Além disso, a escassez de acesso à água potável está diretamente relacionada ao aumento da mortalidade infantil (PIRES, 2018).

A coleta e o tratamento do esgoto se iniciam pela conexão das residências às redes coletoras, que o encaminham aos interceptores e, em seguida, ao sistema de tratamento de esgotos. Inicialmente, os esgotos passam por um tratamento preliminar para a remoção dos resíduos grosseiros, através de gradeamento ou peneiramento, e da areia. Em seguida, os esgotos são conduzidos para o tratamento primário, que pode ocorrer em decantadores primários, onde a fase sólida sedimenta, formando o lodo (SABESP, 2023). A fase líquida flui para decantadores secundários ou outras unidades de tratamento secundárias, onde o esgoto é submetido a processos biológicos para oxidação da matéria orgânica dissolvida. O lodo resultante do processo de tratamento se dirige para os digestores, formando placas que são destinadas aos aterros sanitários, podendo ser utilizadas como adubos.

### **3.1.2 Problemas de saneamento básico no Brasil**

Estudos demonstram que o Brasil, de fato, direcionou investimentos ao setor de saneamento nas décadas de 1970 e 1980; porém, esses investimentos ocorreram em momentos específicos e de maneira seletiva, não abrangendo todo o território nacional. Nesse período, prevalecia a percepção de que a redução das taxas de mortalidade estaria diretamente relacionada aos avanços nos setores de esgotamento sanitário e abastecimento de água (SOARES; BERNARDES; CORDEIRO NETTO, 2002). Atualmente, o papel do saneamento na proteção à saúde pública continua em destaque. A Pesquisa Nacional de Saneamento Básico, realizada pelo Sistema IBGE de Recuperação Automática (SIDRA, 2017), aponta que três dos 17 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) definidos pelas Nações Unidas em 2015 são relacionados ao saneamento.

O Plano Nacional de Saneamento (Planasa), criado em 1970, buscava o desenvolvimento de políticas eficazes para o saneamento básico, com ênfase no abastecimento de água em áreas urbanas que recebeu cerca de 61,2% dos investimentos. Os investimentos destinados para drenagem urbana e esgotamento sanitário foram em torno de 13,6% e 25,2%, respectivamente (SOUSA, 2006). Na década de 1990, foram implementados programas federais com a finalidade de fomentar e apoiar o setor de saneamento, contando com financiamentos do Banco Interamericano de Desenvolvimento (BID), Banco Mundial (Bird), Orçamento Geral da União (OGU), entre outros (Quadro 1) (LEONETI, PRADO, OLIVEIRA, 2011).

Quadro 1 – Programas federais com investimento em saneamento na década de 1990

<b>Programa</b>	<b>Período</b>	<b>Financiamento</b>	<b>Beneficiário/Desdobramentos</b>
Pronurb	1990-1994	Fundo de Garantia do Tempo de Serviço (FGTS) e contrapartida	População urbana em geral, com prioridade à baixa renda
Pró-Saneamento	1995	FGTS e contrapartida	Sobretudo áreas com famílias com renda de até 12 salários mínimos (s.m.)
Pass	1996	Orçamento Geral da União (OGU) e contrapartida, Banco Interamericano de Desenvolvimento (BID) e Banco Mundial (Bird)	População de baixa renda em municípios com maior concentração de pobreza
Prosege	1992-1999	BID e contrapartida	População de baixa renda, privilegiando comunidades com renda até 7 s.m.
Funasa - SB		OGU e contrapartida	Apoio técnico e financeiro no desenvolvimento de ações com base em critérios epidemiológicos e sociais
PMSS I	1992-2000	Bird e contrapartida	Estudos e assistência técnica aos estados e municípios em âmbito nacional; investimentos em modernização empresarial e aumento de cobertura dirigidos à Casan, Embasa e Sanesul
PMSS II	1998-2004	Bird e contrapartida	Passa a financiar companhias do Norte, Nordeste e Centro-Oeste e estudos de desenvolvimento institucional
PNCDA	1997	OGU e contrapartida	Uso racional de água em prestadores de serviço de saneamento, fornecedores e segmentos de usuários
FCP/SAN	1998	FGTS, Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social (BNDES) e contrapartida	Concessionários privados em empreendimentos de ampliação de cobertura em áreas com renda de até 12 s.m.
Propar	1998	BNDES	Estados, municípios e concessionários contratando consultoria para viabilização de parceria público-privada
Prosab	1996	Finep, CNPq, Capes	Desenvolvimento de pesquisa em tecnologia de saneamento ambiental

Fonte: adaptado de Leoneti, Prado e Oliveira (2011)

Quando se analisam os padrões brasileiros de atendimento e qualidade, as questões sanitárias são classificadas pelo Plano Nacional de Saneamento Básico (Plansab) em três grupos: atendimento adequado, atendimento precário e sem atendimento. No setor de esgotamento sanitário, a classificação de atendimento adequado inclui a coleta de esgotos, o tratamento e a utilização de fossa séptica (seguida por pós-tratamento ou unidade de disposição final) que esteja devidamente projetada. Por outro lado, o atendimento precário engloba a coleta de esgoto sem tratamento subsequente e o uso de fossa rudimentar. A categoria sem atendimento inclui as demais situações, tais como ausência de sanitários, lançamento do esgoto diretamente nas vias hidráulicas, entre outras.

Entre os anos de 2015 e 2021, a região norte do país apresentou a menor porcentagem de população com acesso à água tratada (58,9%), à rede de esgoto (13,1%) e à coleta de resíduos sólidos domiciliar (80,7%), quando comparada a outras regiões brasileiras, principalmente a região sudeste, que, por sua vez, apresentou os melhores índices do país para os mesmos índices (91,3%, 80,5% e 96,1%, respectivamente) (MELO; CORDOVA, 2022). Alguns estudos apontam que as desigualdades de acesso ao saneamento básico nas regiões brasileiras prejudicam principalmente as zonas rurais, uma vez que não há o investimento adequado nessas regiões. Os estudos evidenciam que, na zona rural, a separação do esgoto em águas cinzas e águas do vaso sanitário é recorrente, além de haver a presença de fossas absorventes ou rudimentares nesses locais (FIGUEIREDO, 2020).

Segundo informações da Síntese de Indicadores Sociais, aproximadamente 13,5 milhões de brasileiros vivem em condições de extrema pobreza (NERY, 2019). O gerente desse estudo, André Simões, destaca essa parcela da população em extrema pobreza é mais vulnerável, com menores condições e oportunidades de se inserirem no mercado de trabalho. Aproximadamente 56% da população que se encontra abaixo da linha de pobreza não possui acesso ao esgotamento sanitário, 21,1% não é atendida pelo serviço de coleta de lixo, e 25,8% não possui acesso ao abastecimento de água por redes de distribuição. Esse estudo indica, ainda, que a maior parte da população que sofre com a ausência de saneamento e com más condições habitacionais é formada por pretos e pardos (NERY, 2019). Nesse sentido, a implementação de políticas públicas de saneamento é fundamental para superar as desigualdades sociais brasileiras.

Como já abordado anteriormente, as condições habitacionais e a ocupação do espaço urbano desempenham papéis significativos na análise das questões associadas ao saneamento básico. Isso se deve ao fato de que o saneamento se inicia no momento em que os indivíduos usam a águas em suas atividades domésticas, acarretando a geração de resíduos e esgotos (WARTCHOW, 2009). Assim, é necessário um sistema público de qualidade para a gestão das

águas, visando combater as desigualdades econômicas e sociais presentes no Brasil. Para isso, requer-se a colaboração da população para que haja um controle social efetivo (WARTCHOW; DARONCO, 2014).

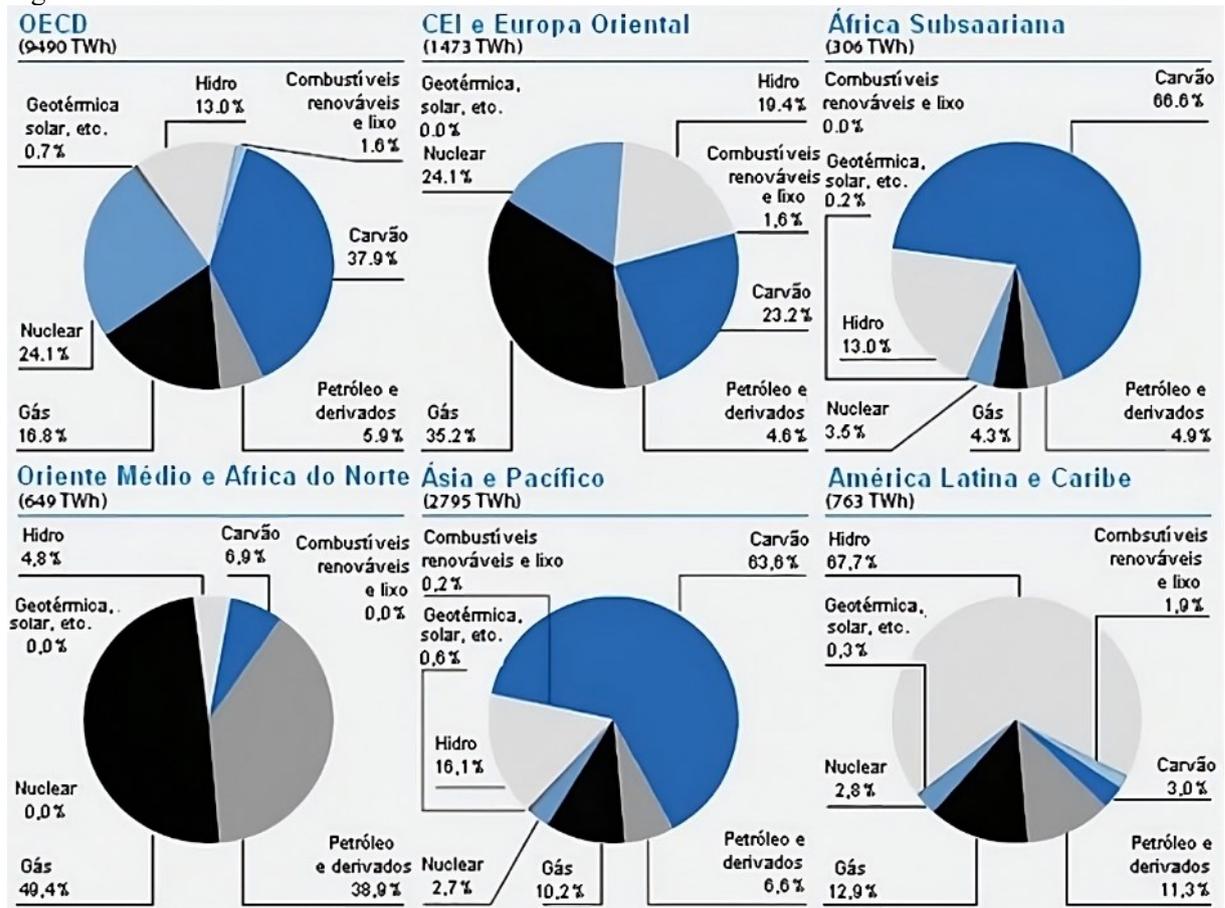
Segundo a Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA), existem 60 agências reguladoras infranacionais no Brasil, que têm o objetivo de regular os serviços de limpeza urbana, drenagem pluvial, abastecimento de água, coleta e destinação adequada de resíduos sólidos, e coleta e tratamento de esgotos. Dentro desse conjunto, seis são agências intermunicipais, uma é distrital, 25 são estaduais e 28 são municipais. O Atlas Esgotos: Despoluição de Bacias Hidrográficas, publicado em 2017 pela ANA em parceria com o Ministério do Desenvolvimento Regional, indica que aproximadamente 38,6% do volume de esgoto total produzido no Brasil não é coletado e tratado, enquanto 18,8% é coletado e despejado sem tratamento em cursos d'água. Em relação à disposição de resíduos sólidos, há 1.037 lixões, 607 aterros sanitários e 540 aterros controlados, segundo dados do Diagnóstico do Manejo de Resíduos Sólidos Urbanos. Além disso, cerca de 9.098 toneladas de carga orgânica são geradas diariamente no país (ANA, 2017).

Dado o aumento exponencial da população, que interfere diretamente na disponibilidade de água, na distribuição igualitária de água, no tratamento e disposição adequada dos efluentes líquidos, se faz necessário priorizar o tratamento do esgoto e incentivar políticas de reuso (CARVALHO *et al.*, 2014). Para que os serviços sejam eficientes e adequados em todo país, o Atlas Esgoto indica que R\$ 149,5 bilhões deverão ser investidos, sendo que em torno de R\$ 101,9 bilhões deveriam ser destinados à coleta do esgoto sanitário (ANA, 2017).

### 3.2 BIOMASSA

Até o início do século 21, em torno de 80% da energia produzida no mundo era proveniente de combustíveis fósseis, como petróleo, carvão e gás. Uma pequena parcela dessa produção correspondia à energia hidroelétrica e nuclear, assim como a fontes renováveis, como a energia solar, geotérmica e eólica. Apesar da importância das energias renováveis para a preservação do meio ambiente, elas contribuíram com apenas 10% da produção energética global. A biomassa é a responsável pelos 10% restantes da produção de energia, podendo ser utilizada na forma não sustentável, ou por meio de tecnologias que geram eletricidade ou produzem carvão vegetal. A participação da biomassa na matriz energética varia ao redor do mundo, conforme demonstrado na Figura 2 (GOLDEMBERG, 2009).

Figura 2 – Frações da participação de diferentes tipos de fontes na matriz energética em diferentes regiões do mundo

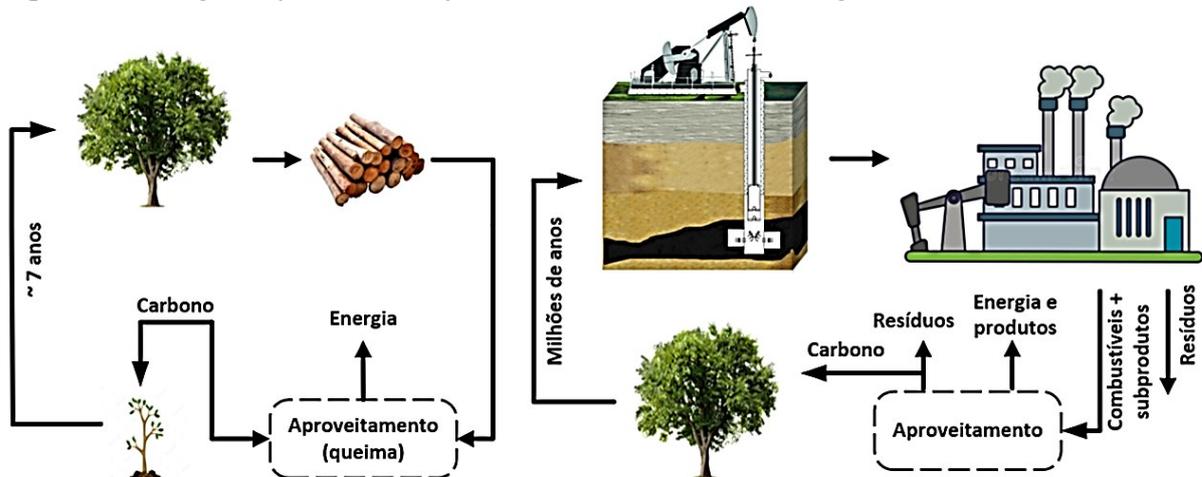


Fonte: Goldemberg (2009)

Após o ano 2000, a biomassa passou a ter maior participação na matriz energética do Brasil como fonte renovável para a geração de energia elétrica. Esse avanço se deu notadamente pelo reaproveitamento da lixívia e do bagaço de cana-de-açúcar, resultando em um aumento na participação da biomassa na matriz energética de 2% para 8%, em comparação às demais fontes (MME, 2018).

A biomassa corresponde a toda matéria orgânica de origem animal ou vegetal, produzida através da combustão direta, processos biológicos ou termoquímicos. Essa biomassa pode ser usada para produzir energia que, por sua vez, pode ser aplicada em sistemas de aquecimentos ou em sistemas térmicos de geração de energia elétrica. Na Figura 3 é apresentada uma ilustração que compara o uso da biomassa ao uso do petróleo para a produção de energia, enfatizando a diferença entre fontes renováveis e não renováveis (SEBRAE, 2022).

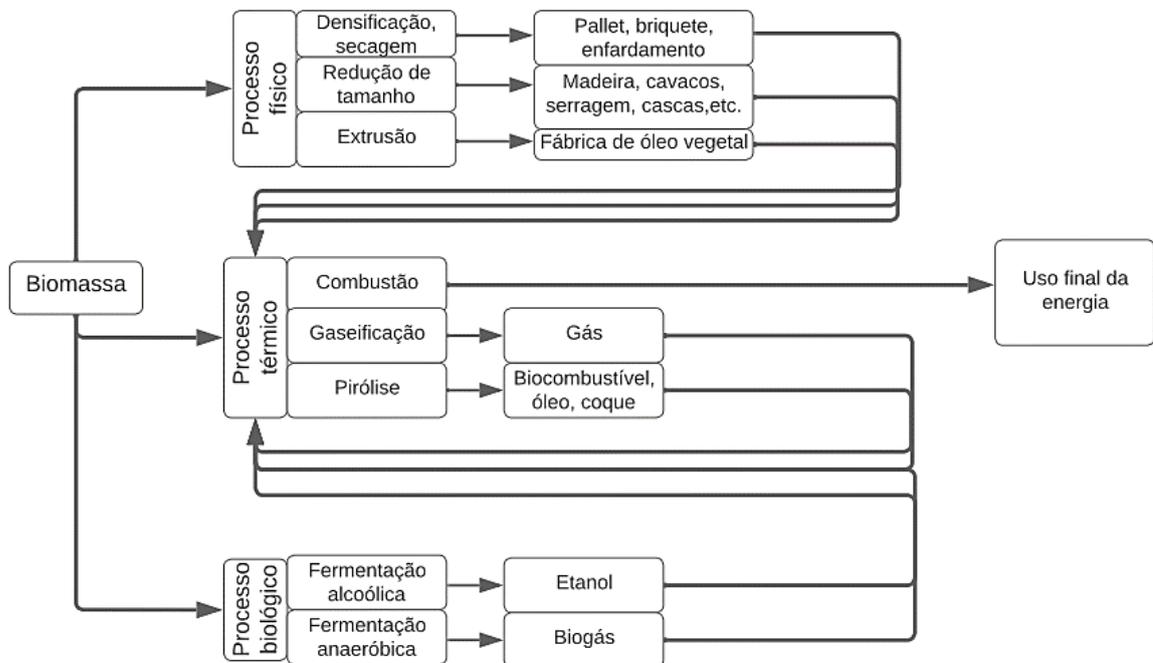
Figura 3 – Exemplificação da diferença entre o ciclo da biomassa e do petróleo



Fonte: SEBRAE (2022)

A biomassa apresenta a vantagem de gerar energia com custos reduzidos e baixo índice de poluição em comparação com outras fontes de energia, além de possibilitar o reuso de resíduos. O processamento da biomassa varia de acordo com sua aplicabilidade, podendo envolver processos físicos, térmicos ou biológicos, como representado na Figura 4.

Figura 4 – Esquema da conversão da biomassa em energia

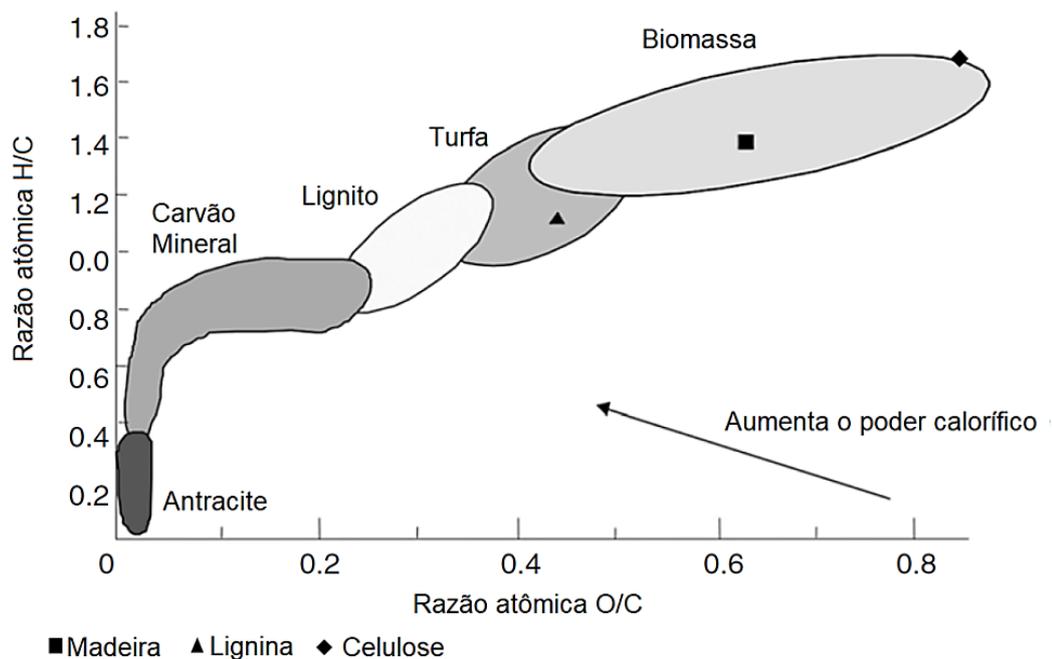


Fonte: adaptado de Lippel (2022)

Alguns autores dividem a biomassa em duas principais categorias: a “virgem”, que corresponde a biomassa advinda de locais como campos, florestas, vegetação aquática e cultivos de alimentos; e os “resíduos de biomassa”, que são os derivados da biomassa “virgem”. Os resíduos de biomassa podem ser classificados como resíduos florestais (folhas e cascas), resíduos industriais, resíduos urbanos e resíduos sólidos da agricultura (rebanhos e esterco). Vale ressaltar que a biomassa in natura, ou seja, a biomassa que não teve suas características modificadas por algum processo, apresenta elevado teor de umidade, em torno de 90% de sua massa. Isso se justifica pelo fato de a planta necessitar de água para seu desenvolvimento (BASU, 2010).

A Figura 5 apresenta o Diagrama de van Krevelen, que representa a comparação da razão atômica de oxigênio/carbono (O/C) e hidrogênio/carbono (H/C) da biomassa com o carvão mineral, lignito e turfa. Esse diagrama ilustra que a biomassa, quando comparada ao carvão mineral, possui maiores razões atômicas O/C e H/C. Assim, propende a produzir concentrações molares maiores de oxigênio e hidrogênio. Vale ressaltar que o poder calorífico do combustível cresce inversamente ao aumento da razão O/C (BASU, 2010).

Figura 5 – Diagrama de van Krevelen da biomassa e outros combustíveis



Fonte: Castro (2020)

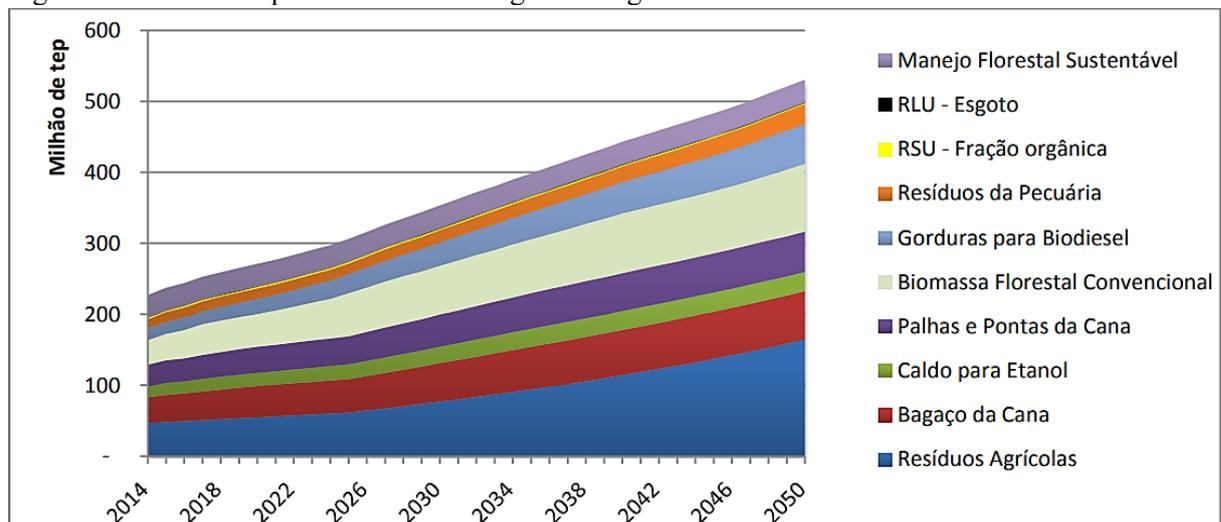
Entre as diversas formas de biomassa, aquelas com potencial para serem utilizadas como combustível incluem a madeira e seus resíduos, como a serragem; resíduos animais; biossólidos; espécies herbáceas; óleos residuais; resíduos agrícolas; e gorduras e bagaços, como

os provenientes de cana-de-açúcar e frutas. É importante ressaltar que a seleção da biomassa, considerando seu uso energético, não apenas aproveita sua vasta disponibilidade, como também colabora com o desenvolvimento de regiões economicamente desfavorecidas. A sua utilização possibilita a geração de renda através do surgimento de novos empregos, ameniza o êxodo rural, além de fomentar o uso de uma fonte de energia sustentável (VIRMOND, 2007).

### 3.2.1 Bioenergia

Como mencionado no tópico 3.2, as biomassas podem ser usadas para a geração de energia diretamente, tal como as que são provenientes de resíduos agrícolas, ou podem requerer um processo preliminar, a exemplo dos resíduos urbanos (como resíduos sólidos e esgoto). O potencial de produção de biogás a partir das biomassas fornece uma estimativa do seu potencial energético. A Figura 6 indica o potencial de energia para diferentes biomassas ao longo dos anos, conforme apresentado na Nota Técnica PR 04/18 da Empresa de Pesquisa Energética (EPE) (MME, 2018).

Figura 6 – Análise do potencial de bioenergia ao longo dos anos



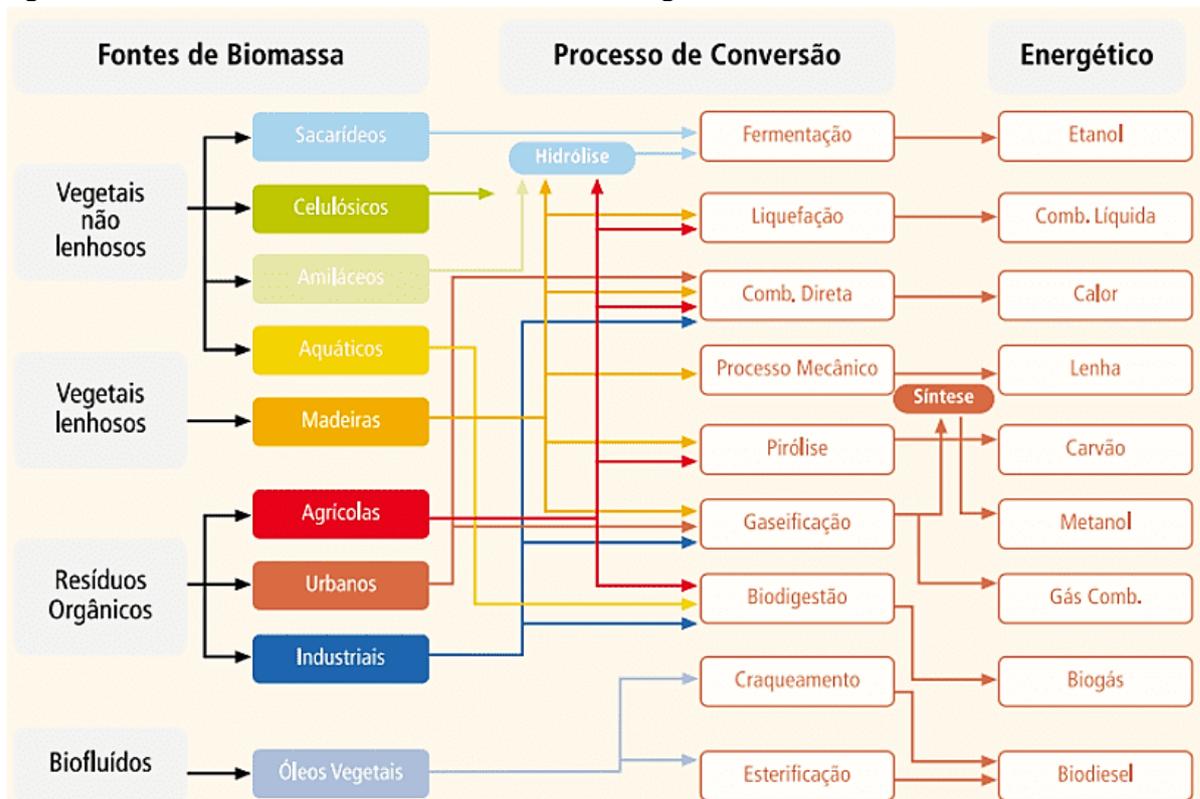
Fonte: MME (2018)

Diversos estudos apontam que, em 2050, a biomassa residual pode se tornar a principal fonte para geração de energia, totalizando em torno de 165 milhões de toneladas equivalentes de petróleo (tep) de toda produção de biomassa, estimada em aproximadamente 530 milhões tep. Os subprodutos da cana-de-açúcar são identificados como a segunda maior fonte em termos de potencial de geração de bioenergia (Figura 6) (MME, 2018).

Segundo a Nota Técnica PR 04/18 da EPE (MME, 2018), com o intuito de melhorar a compreensão sobre a importância da bioenergia, uma análise foi realizada para comparar duas tecnologias de combustão. Uma delas foi advinda do bagaço de cana, coletado durante o período de safra, enquanto a outra foi proveniente de cavaco de madeira, com elevado fator de capacidade. Os resultados indicaram que o cavaco de madeira apresentou altos fatores de despesas analisando o investimento na usina e os gastos com combustível. Por outro lado, o bagaço de cana resultou, nos casos simulados, em pelo menos o dobro da potência instalada em comparação com o ano base. Assim, apesar de a biomassa ser, de forma geral, importante e eficiente como vetor de energia, é essencial destacar a relevância da escolha de sua fonte, conforme as aplicações pretendidas.

Com o intuito de usufruir do potencial energético das biomassas, são aplicados processos termoquímicos que incluem pirólise, liquefação e gaseificação, processos biológicos que englobam fermentação e digestão anaeróbia, transesterificação, entre outros (Figura 7) (VIRMOND,2007).

Figura 7 – Processos de conversão de biomassa em energia



Fonte: MORELLO *et al.* (2020)

O conhecimento das propriedades físico-químicas das biomassas é importante para definir a tecnologia mais adequada para a sua transformação em energia. Vale ressaltar que,

entre os processos apresentados na Figura 7, a combustão direta se destacada como uma das principais contribuintes para a produção mundial de bioenergia (VIRMOND, 2007). O bagaço de cana-de-açúcar é um dos resíduos de biomassa mais utilizados no mundo devido às suas vantagens ambientais, como a natureza renovável, e vantagens econômicas, principalmente para as indústrias de açúcar e etanol (LOPES SILVA *et al.*, 2014).

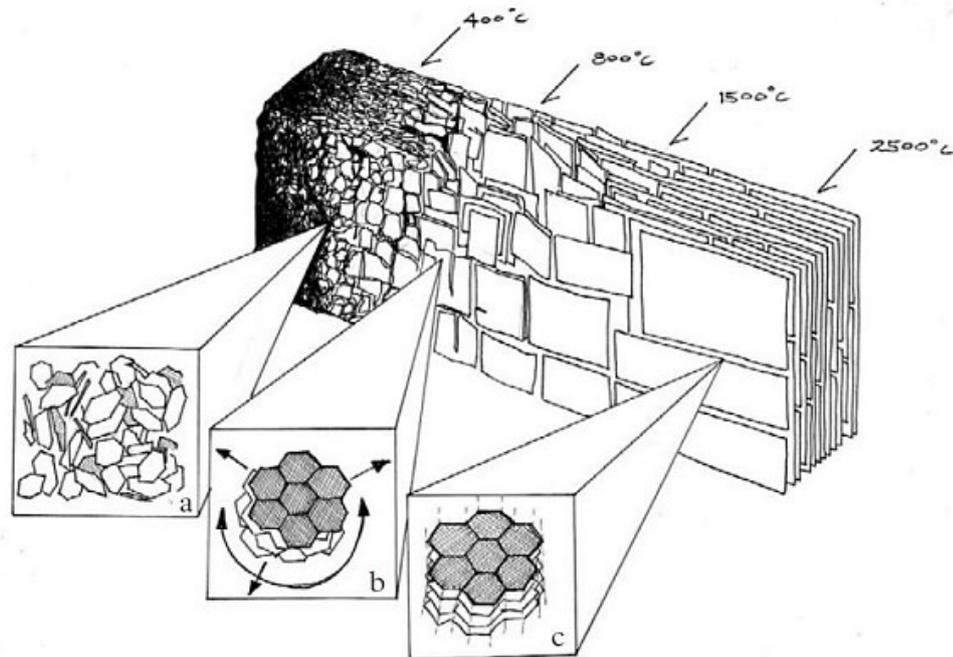
### 3.2.2 Biocarvão

O biocarvão apresenta benefícios como a redução dos efeitos do aquecimento global, a captura de carbono, a remoção de contaminantes em soluções aquosas e a correção de propriedades do solo. Essas aplicações são possíveis devido às suas propriedades, em especial sua superfície porosa que influencia no seu papel de adsorvente. Outra vantagem do uso do biocarvão é que sua matéria-prima é proveniente majoritariamente de resíduos agrícolas e biomassa agrícola (TAN *et al.*, 2015).

O processo de produção do biocarvão envolve a pirólise da biomassa a temperaturas entre 300 °C e 1000 °C, apresentando estruturas de carbono orgânico (VERHEIJEN *et al.*, 2010). A pirólise da biomassa ocorre em um meio com ausência parcial ou total de oxigênio, para que a reação não entre em combustão e se inicie com o aquecimento da biomassa (WOOLF, 2008). A pirólise corresponde à modificação da biomassa em condições de limitada disponibilidade de oxigênio e temperaturas moderadamente baixas. A composição estrutural e química do biocarvão varia de acordo com as condições do processo de pirólise e da matéria-prima utilizada (TRAZZI *et al.*, 2018). Assim, a escolha das condições do processo de pirólise e das propriedades da matéria-prima deve ser avaliada dependendo da finalidade do uso do biocarvão (JINDO *et al.*, 2014). Vale evidenciar que todos os biocarvões, independente da matéria-prima da qual ele é produzido, compartilham algumas propriedades, como o grau de aromaticidade e o elevado teor de carbono orgânico (TRAZZI *et al.*, 2018).

O biocarvão é um material evidentemente heterogêneo e, devido à sua elevada área superficial específica, pH variando de neutro e alcalino, alta capacidade catiônica e grande quantidade de carbono em comparação à matéria-prima, tem sua aplicação garantida na remoção de contaminantes (GWENZI, 2017). A Figura 8 ilustra a estrutura ideal do biocarvão, produzida por processos em alta temperatura, que evidencia (a) o aumento da proporção de carbono aromático (sendo o material amorfo), (b) o aumento gradativo das lamelas de carbonos aromáticos conjugados e (c) a transformação da estrutura em grafite com lamelas ordenadas espacialmente (LEHMANN; JOSEPH, 2015).

Figura 8 – Representação de uma estrutura ideal do biocarvão



Fonte: Lehmann e Joseph (2015)

Estudos apontam que o biocarvão proveniente da pirólise de resíduos agrícolas é vantajoso para remover contaminantes, uma vez que possui grupos funcionais de superfície e estrutura porosa, além de ser possível realizar tratamentos como ativação física ou química na superfície do biocarvão para que sua capacidade de sorção seja otimizada, aumentando sua área superficial, grupos funcionais e porosidade (SILVA, 2022).

De modo geral, o biocarvão pode ser produzido a partir de qualquer fonte de biomassa. Contudo, devido às diferenças na composição química de cada fonte, como teores de lignina, celulosas, extrativos e hemicelulosas, bem como na morfologia e nas condições de pirólise, o biocarvão apresenta características químicas e físicas variáveis, que são influenciadas pela biomassa escolhida. Essa escolha afeta propriedades como pH, porosidade, capacidade de troca iônica, superfície específica, entre outras (MAIA, 2011).

De acordo com o estudo de Almeida (2019) que analisou, em escala laboratorial, o balanço energético e a viabilidade econômica dos produtos gerados pela pirólise do lodo de esgoto, a fórmula usada para calcular o consumo de energia na pirólise foi a Equação 1:

$$Q_{\text{pirólise}} = \text{Pot.pir} \times h \quad (1)$$

Onde: Pot.pir se trata da potência da máquina de pirólise (em kW) e h é o tempo de duração da pirólise (em horas).

Almeida (2019) utilizou essa equação considerando que o lodo foi seco em um forno elétrico do tipo FTT - HI/40 10P Bipartido e, segundo o fabricante EDG equipamentos, com potência igual a 400 W. Foi calculado o consumo de energia, segundo a Equação 1, para cada condição de pirólise avaliada no estudo. Dessa forma, quanto menor o tempo em que a biomassa é submetida ao reator pirolítico, menor é o consumo de energia e mais economicamente viável é a sua aplicação.

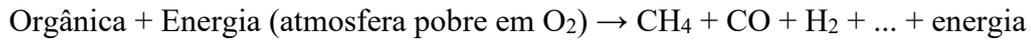
O biocarvão é um produto importante para a sustentabilidade, pois possui propriedades singulares que interferem na qualidade biológica do solo. Ele possui a capacidade de capturar no solo o dióxido de carbono da atmosfera por um intervalo de tempo duradouro, o que contribui para a mitigação do aquecimento global. Segundo alguns estudos, cerca de 12% dos gases de efeito estufa poderiam ser reduzidos com o uso do biocarvão (WOOLF *et al.*, 2010).

### 3.2.3 Pirólise

Devido à abundância de biomassa no Brasil e suas características que agregam valor, têm-se destacado cada vez mais a sua importância socioambiental e socioeconômica. Por esse motivo, ao longo dos anos, pesquisadores têm explorado uma alternativa viável para sua aplicação, sendo a pirólise uma rota interessante tanto para as biomassas residuais quanto não residuais. Resumidamente, a pirólise corresponde à degradação térmica do material orgânico, como hidrocarbonetos, na ausência total ou parcial de oxigênio, com temperatura entre 400 °C e 700 °C. Estudos apontam que essa rota, além de apresentar eficiência energética, também representa uma alternativa positiva pelo uso de recursos renováveis (VIEIRA *et al.*, 2014).

Durante o processo de aquecimento em um meio na ausência de oxigênio, os compostos de cadeia longa, que se tratam dos polímeros de origem sintética ou biológica, fracionam via craqueamento térmico e reações de condensação, quando expostos a altas temperaturas. Como a produção de energia é superior ao consumo, esse processo gera um balanço energético positivo (FEAM, 2012).

O processo de pirólise consiste na formação de água, através da desidratação de furfural e xilose; de metanol, a partir de grupos metoxilas e ácido urônico; de ácido fórmico, a partir de grupos carboxílicos do ácido urônico; e de ácido acético, uma vez que ocorre a eliminação do grupo acetila que estava ligado a unidades de xilose. O ácido acético é o principal produto de decomposição térmica de algumas biomassas (GUEDES *et al.*, 2010). A pirólise, uma reação endotérmica (em torno de 100 kJ/kg), pode ser representada pela seguinte reação (KHIARI *et al.*, 2004):



A pirólise gera produtos de grande relevância, podendo ser usados como fonte de combustível, o que a diferencia de outros processos (PEDROZA, 2011). Os principais parâmetros operacionais incluem temperatura, tempo de permanência e taxa de aquecimento (ZHANG *et al.*, 2017). Além disso, a pirólise pode ser classificada como lenta, instantânea ou rápida, como apresentado no Quadro 2 (CALLEGARI; CAPODAGLIO, 2018).

Quadro 2 – Classificação dos tipos de pirólise

Parâmetros	Tipos de pirólise		
	Lenta	Instantânea	Rápida
Temperatura	> 400 °C	800-1300 °C, sob pressão	500-1200 °C
Taxa de aquecimento	$\Delta C < 1^\circ\text{C/s}$	$\Delta C > 1000^\circ\text{C/s}$	$10 < \Delta C < 300^\circ\text{C/s}$
Tempo de residência	> 7 min	< 0,5 s	< 20 s
Produtos (em massa)	35% biochar 35% syngas 30% óleo	60% biochar 40% voláteis	50-70% bio-óleo 10-30% biochar 15-20% syngas
Separação de vapor	Geralmente não	Sim	Sim
Recuperação de calor	Geralmente não	Geralmente sim	Sim
Escape	Para a atmosfera, como está, ou queimada	Controlada	Controlada
Geração de energia	Da combustão ou escapamento	De voláteis	De syngas
Uso	Países principalmente em desenvolvimento (carvão vegetal) Aplicabilidade limitada de substratos	Maximização da produção de biocarvão Aplicável a uma ampla variedade de matérias-primas	Maximização de bio-óleo Aplicável a uma ampla variedade de matérias-primas

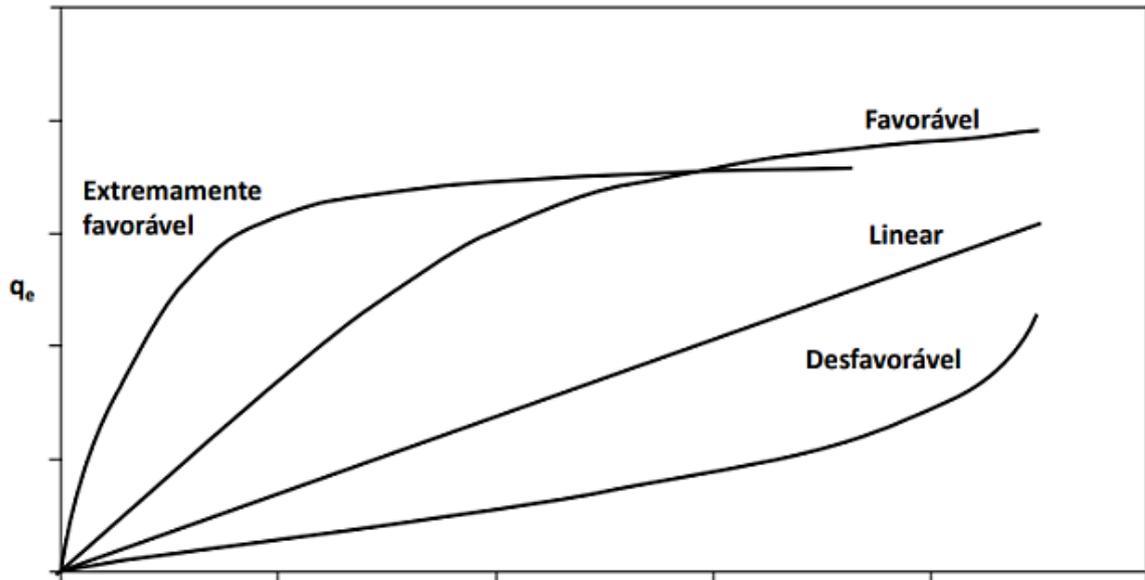
Fonte: adaptado de Callegari e Capodaglio (2018)

### 3.2.4 Isotermas de Langmuir

O processo de adsorção é entendido pelo estudo do equilíbrio de adsorção. Quando o adsorvato entra em contato com o adsorvente, os íons e moléculas tendem a se acumular na superfície do adsorvente até que a concentração da fase líquida ( $C_e$ ) alcance um valor constante. Nesse ponto, determina-se a capacidade de adsorção do adsorvente ( $q_e$ ), que corresponde a eficiência do material em adsorver em sua superfície. Assim, gráficos de capacidade de adsorção do adsorvente versus a concentração da fase líquida são construídos a partir dos dados experimentais a temperatura constante. Esses gráficos são chamados de isotermas e

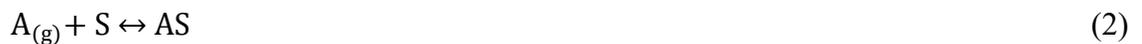
proporcionam resultados importantes a respeito do mecanismo de adsorção. Um exemplo é o gráfico da Figura 9, em que a região onde  $C_e$  é baixo e  $q_e$  é alto representa que o processo é favorável pelo fato do adsorvato apresentar maior afinidade com o adsorvente e, conseqüentemente, não ficar disponível na fase líquida (BARRETO, 2018).

Figura 9 – Esquematização dos tipos de isotermas



Fonte: Nascimento *et al.* (2014)

Um dos tipos de isotermas de adsorção é o modelo da Isoterma de Langmuir, o mais simples e mais utilizado. Esse modelo considera que todos os sítios têm a mesma entalpia de adsorção, que a adsorção ocorre em monocamada, e que as moléculas de adsorvato não interagem entre si, sendo o equilíbrio dado pela Equação 2 (ATKINS, 2004; NASCIMENTO *et al.*, 2014).



Na Equação 2, A é o adsorvato, S é o adsorvente com sítios vazios e AS é o adsorvente com os sítios ocupados pelo adsorvato. Esses sítios são denominados como  $\theta$ , de forma que os sítios vazios são denominados como  $1 - \theta$ . No equilíbrio, as velocidades de adsorção e dessorção e a constante de equilíbrio ( $K_L$ ) correspondem a razão entre a constante de adsorção ( $k_{ads}$ ) e a constante de dessorção ( $k_{des}$ ), conforme as Equações 3 e 4.

$$\text{Velocidade}_{ads} = k_{ads} \cdot [A] \cdot (1-\theta) \quad (3)$$

$$\text{Velocidade}_{\text{des}} = k_{\text{des}} \cdot \theta \quad (4)$$

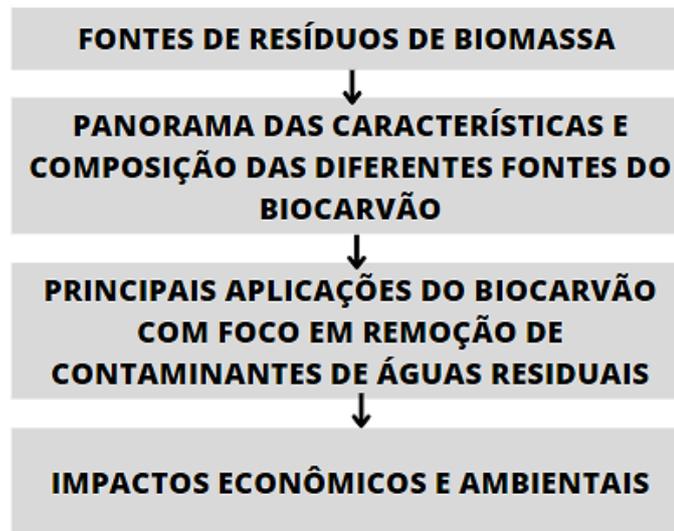
$$\theta = K_L \cdot [A] / K_f \cdot [A] + 1 \quad (5)$$

A Equação 5 representa a equação da Isoterma de Langmuir, onde  $[A]$  é a concentração do adsorvato líquido ( $C_e$ ) e  $\theta$  é a capacidade de adsorção do adsorvente ( $q_e$ ) sobre a capacidade máxima de adsorção ( $q_{\text{máx}}$ ). Vale destacar que essa equação costuma ser linearizada com o objetivo de obter valores da capacidade máxima de adsorção e da constante de equilíbrio (ATKINS, 2004; NASCIMENTO *et al.*, 2014).

#### 4 MATERIAL E MÉTODOS

Foi conduzida no presente trabalho uma revisão crítica de literatura, através da análise de artigos e documentos científicos publicados nos últimos 10 anos nas bases de dados Scielo, Periódicos CAPES e Google Acadêmico. A revisão de literatura foi realizada conforme as etapas ilustradas na Figura 10.

Figura 10 – Fluxograma com as etapas realizadas no presente trabalho



Fonte: elaborado pela autora

Inicialmente, foram analisadas as fontes de resíduos de biomassa a fim de compreender sua importância, disponibilidade no ambiente, sustentabilidade e aplicabilidade. Em seguida, foi realizado um levantamento das características e composição das diferentes fontes de biocarvão para, a partir desses dados, avaliar as principais aplicações e determinar as fontes que apresentaram melhores resultados na remoção de contaminantes em águas residuárias. Por fim, foi realizada uma análise dos impactos econômicos e ambientais da aplicação do biocarvão como alternativa em sistemas de tratamento de águas residuárias, com foco em esgoto sanitário.

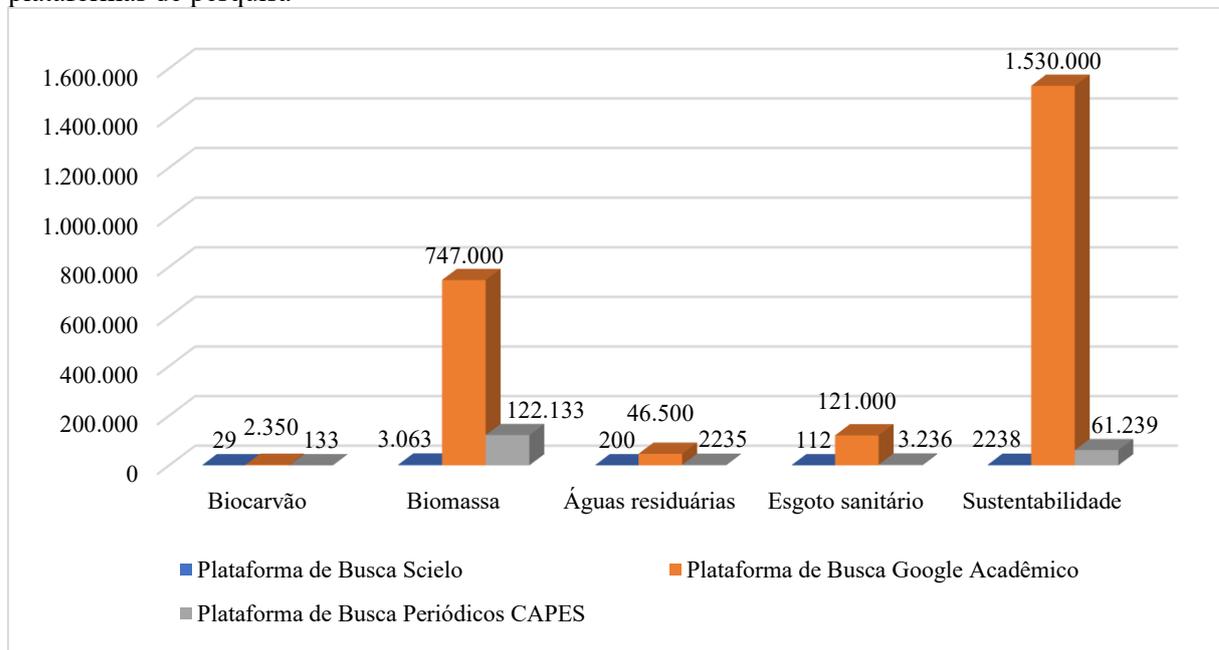
As palavras-chave escolhidas para direcionar as buscas nas bases de dados foram: biocarvão, biomassa, tratamento de águas residuárias, esgoto sanitário, e sustentabilidade. A Tabela 1 e a Figura 11 indicam a volumetria de artigos e documentos científicos para cada palavra-chave nas bases de dados utilizadas.

Tabela 1 – Quantidade de dados encontrados para as palavras-chaves em todas as plataformas de pesquisa

Palavras-chave	Plataforma de Pesquisa		
	Scielo	Google Acadêmico	Periódicos CAPES
Biocarvão	29	2.350	133
Biomassa	3.063	747.000	122.133
Águas residuárias	200	46.500	2235
Esgoto sanitário	112	121.000	3.236
Sustentabilidade	2238	1.530.000	61.239

Fonte: elaborado pela autora

Figura 11 – Comparativo da quantidade de dados encontrados para as palavras-chaves em todas as plataformas de pesquisa



Fonte: elaborado pela autora

A partir da pesquisa bibliográfica e dos dados levantados, foram selecionados estudos que avaliaram a eficiência do uso do biocarvão, obtidos a partir de diferentes resíduos de biomassa, no tratamento de águas residuárias no contexto nacional. Os resultados desses estudos foram tabulados a fim de se compreender as condições de pirólise de cada experimento, incluindo fatores como as temperaturas aplicadas, tempo, modelo cinético e tempo de equilíbrio. Essas informações permitiram avaliar a aplicabilidade de cada biomassa para cada uso específico, contribuindo para o entendimento sobre a importância da escolha da matéria-prima para a produção do biocarvão de acordo com o uso pretendido (e.g., remoção de metais, corantes, fármacos livres). No Quadro 3 é possível verificar o portfólio de periódicos e outras bases de dados pertinentes na área de estudo e que fundamentaram a presente pesquisa, cujo foco foi o uso do biocarvão proveniente de diferentes resíduos de biomassa.

Quadro 3 – Portfólio do estudo

<b>Revista ou repositório</b>	<b>Autor</b>	<b>Título</b>
<b>Revista Matéria</b>	Carvalho et. al. (2021)	Utilização do biocarvão de bagaço de laranja na remoção de tetraciclina em água residuária
<b>Repositório UTFPR</b>	Ribeiro (2016)	Estudo do uso de biochar no tratamento de esgoto sanitário
<b>Repositório Institucional da Ufal</b>	Silveira (2018)	Viabilidade técnica da pirólise da biomassa do coco: produção de bioóleo, biocarvão e biogás
<b>Scielo</b>	Souza <i>et al.</i> (2021)	Estudo de propriedades físico-químicas na avaliação da adsorção em biocarvão produzido com folhas de amendoeira-da-praia
<b>CONTECC</b>	Magnano <i>et al.</i> (2018)	Remoção de cromo hexavalente de soluções aquosas utilizando biochar obtido do fruto da amendoeira ( <i>Terminalia catappa</i> Linn)
<b>Scielo</b>	Krebs (2014)	Caracterização do biochar de pirólise rápida
<b>Agropecuária científica no semiárido</b>	Delatorre <i>et al.</i> (2020)	Insights acerca do uso de finos de carvão vegetal para geração de bioenergia
<b>Revista Matéria</b>	Cuba <i>et al.</i> (2021)	Biocarvão ativado produzido a partir de lodo anaeróbio de estação de tratamento de efluentes para remoção do corante tartrazina

Fonte: elaborado pela autora

Além disso, a pesquisa também teve como objetivo avaliar a importância do biocarvão como alternativa sustentável no tratamento de águas residuárias, por meio da análise dos impactos ambientais e econômicos de seu uso.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.1 CARACTERÍSTICAS FÍSICAS E QUÍMICAS DO BIOCARVÃO

O biocarvão corresponde a um material produzido a partir da queima da biomassa em um meio com ausência parcial ou total de oxigênio (LEHMANN; JOSEPH, 2015). Sua estrutura morfológica geralmente reflete as características das matérias-primas lignocelulósicas, principalmente quando as condições de pirólise não são muito severas, o que desempenha um papel significativo em suas propriedades estruturais, micro e macroporosidade. Com o aumento da temperatura durante o processo de pirólise, as estruturas aromáticas progressivamente se ordenam, havendo um aparelhamento nas lamelas de anéis aromáticos, que resulta em um aumento da superfície. Além disso, o aumento da temperatura interfere diretamente no aumento da microporosidade. Vale ressaltar que as características físicas do biocarvão, além de serem influenciadas pelas condições do processo de pirólise e pela matéria-prima (e sua transformação), também dependem do manuseio antes e depois da carbonização (CHIA; DOWNIE; MUNROE, 2015).

A estrutura do biocarvão apresenta camadas de anéis aromáticos que se assemelham à estrutura do grafite, determinando o esqueleto do material e contribuindo para as suas características eletrônicas. Os grupos funcionais que se encontram na superfície do biocarvão também cooperam para o seu caráter adsorptivo, pela possibilidade de ligações  $\pi$  e pela carga superficial (LEHMANN; JOSEPH, 2015). A adsorção promovida pelo biocarvão possibilita a aplicação no tratamento de água e efluentes, por conta de sua capacidade de remoção de metais pesados e de nutrientes, por exemplo (CHEN *et al.*, 2014).

É importante ressaltar que o aumento da área superficial específica do biocarvão influencia diretamente no aumento da capacitância específica (JIANG *et al.*, 2013) e que suas características químicas de superfície, assim como a porosidade, forma e área específica superficial, são determinantes para definir a eficácia de adsorção (CLEMENTINO *et al.*, 2021).

Diversas pesquisas têm explorado a aplicação do biocarvão considerando as suas propriedades físico-químicas, como é o caso do estudo de Ribeiro (2016), que comparou o biocarvão proveniente de cascas de coco verde e de finos de carvão para a remoção de sólidos totais fixos e voláteis, fósforo, nitrogênio e matéria orgânica do esgoto sanitário, em escala de bancada. Esse estudo avaliou as condições do processo de pirólise, bem como a eficiência de cada biocarvão nessa aplicabilidade. Outra aplicação com o mesmo objetivo foi realizada por Cuba *et al.* (2021), que avaliou a eficiência do uso do biocarvão de lodo anaeróbico na remoção de tartrazina em um sistema de efluentes. Tanto o estudo de Ribeiro (2016) como o de Cuba *et*

*al.* (2021) avaliaram o uso do biocarvão sob diferentes condições de pirólise, alterando as temperaturas para verificar qual isoterma e modelo cinético mais favoreceram cada processo, uma vez que as propriedades do biocarvão são influenciadas pela temperatura.

### 5.1.1 Grafeno nos biocarvões

De acordo com a pesquisa conduzida por Fang *et al.* (2020), o biocarvão contendo grafeno de resíduos sólidos pode contribuir para a eficiência e a viabilidade econômica de suas aplicações ambientais. Isso se deve à melhoria das propriedades físico-químicas, como volume dos poros, grupos funcionais de superfície, área de superfície, atividade catalítica, capacidade de transferência catalítica e estabilidade térmica, em comparação com o biocarvão bruto. O biocarvão contendo grafeno pode ser dividido em três categorias: composto de grafeno-biocarvão, biocarvão com grafeno microcristalino e biocarvão semelhante ao grafeno. Ao analisar a aplicação do biocarvão para remediações ambientais, categorizadas em catálise ou sorção, o biocarvão semelhante ao grafeno e o composto de grafeno-biocarvão têm sido mais estudados. Existem poucos estudos a respeito do grafeno microcristalino devido à dificuldade para a identificação desses cristais (FANG *et al.*, 2020).

Ao analisar a remoção de poluentes por absorção, os estudos mostraram que houve uma capacidade de sorção relativamente alta para fenantreno, naftaleno e 1-naftol, alcançada através de materiais semelhantes ao grafeno convertido em cana-de-açúcar, devido à área de superfície elevada e às nanofolhas de grafeno (XIAO; CHEN, 2017). Outra pesquisa concluiu que as folhas de grafeno executaram um papel fundamental da remoção de sulfametazina (JIA *et al.*, 2018). Segundo Abdul, Zhu e Chen (2017), a adição de nanofolhas de grafeno age diretamente em locais de sorção e desempenha uma importante função na modificação da estrutura porosa do biocarvão e dos grupos funcionais de superfície, aumentando em 1,47 vezes a área superficial, 1,1 vezes a aromaticidade, 1,26 vezes o volume de poros e 1,08 vezes os grupos OC=O do compósito grafeno-biocarvão quando comparado ao biocarvão. Além disso, o grafeno-biocarvão apresenta capacidade de sorção dos ésteres de ácido ftálico (PAEs) 1,5 vezes maior que o biocarvão. Também foi evidenciado pelos estudos que os poluentes como atrazina, PAEs e sulfametazina foram bem ajustados com cinética de pseudo-segunda ordem em biocarvão contendo grafeno. Com isso, constatou-se que o processo de sorção foi influenciado pela sorção química. Observou-se também que o efeito do pH foi insignificante quando a carga do sorbato se alterou insignificamente. Quando o pH da solução se alterou de 3,0 para 6,0, a capacidade de sorção da sulfametazina no biocarvão envolto com óxido de grafeno permaneceu quase constante (HUANG *et al.*, 2017). Com o aumento do pH de 7,0 para 9,0,

notou-se a redução da capacidade de sorção devido à desprotonação da sulfametazina em pH alcalino (FANG *et al.*, 2020).

Em comparação com o biocarvão bruto, o biocarvão contendo grafeno apresentou ótima capacidade de sorção dos poluentes inorgânicos, sendo eles: nitrato, cromo hexavalente [Cr(VI)] e chumbo ( $Pb^{+2}$ ) (ZHANG *et al.*, 2019). Além disso, verificou-se que os dados de sorção de poluentes inorgânicos foram melhores ajustados pelo modelo de isoterma de Langmuir (FANG *et al.*, 2020). O pH da solução interferiu de forma significativa na carga superficial do biocarvão contendo grafeno e do sorbato inorgânico (SHANG *et al.*, 2019). Dessa forma, concluiu-se que houve uma melhoria significativa na capacidade de sorção de poluentes orgânicos e inorgânicos do biocarvão contendo grafeno, por conta de suas propriedades físico-químicas únicas, que ilustra bons desempenhos recicláveis (FANG *et al.*, 2020).

A remoção catalítica de poluentes indicou que, além de serem reduzidos, também poderiam ser degradados ou oxidados diretamente pelo processo avançado de oxidação ativado pelo biocarvão contendo grafeno. Para a remoção de poluentes orgânicos, o biocarvão contendo grafeno apresentou alta eficiência na ativação do persulfato e tende a apresentar boa aplicabilidade no processo de ativação (FANG *et al.*, 2020). O biocarvão contendo grafeno constitui ótimo suporte para fotocatalisadores e baixo custo. Como por exemplo, pode-se destacar o biocarvão  $TiO_2$ /grafeno produzido a partir de bambu que, após quatro ciclos de reciclagem, apresentou degradação fotolítica promovida de azul de metileno, durabilidade fotoquímica sem degradação óbvia da atividade e boa estabilidade (WU *et al.*, 2015).

Quanto ao pH da solução, alguns estudos concluíram que ele pode afetar consideravelmente a decomposição de poluentes catalisados por biocarvão contendo grafeno, como fotocatalise, foto-Fenton e catalise a base de persulfato (FANG *et al.*, 2020). Um exemplo é o biocarvão contendo grafeno/fotocatalisador, que em uma ampla faixa de pH pode exibir bom desempenho de oxidação oxidativa. Inclusive, os estudos obtiveram ótimas taxas de degradação oxidativa para a amoxicilina tanto em meios ácidos, com  $pH = 3,0$ , quanto em meios alcalinos, com  $pH = 11,0$  (LI *et al.*, 2019).

Os mecanismos de sorção do biocarvão podem ser classificados em três categorias, sendo eles: (1) interações eletrostáticas, ligações de hidrogênio e complexação induzida por grupos funcionais de oxigênio de superfície; (2) interação doador-aceptor de elétrons  $\pi$ - $\pi$  (EDA) e interação catiônica  $\pi$  induzida por elétron  $\pi$ ; e (3) efeito hidrofóbico e difusão nos poros induzida por nanofolhas de grafeno. É importante destacar que os grupos funcionais que possuem oxigênio da superfície do biocarvão possuindo grafeno executam papel dominante no mecanismo de interação eletrostática (LI *et al.*, 2017). Em um experimento em que houve o

aumento da temperatura de pirólise, ocorreu a remoção de grupos funcionais de oxigênio, o que desencadeou o aumento da capacidade de sorção de índigo carmim aniônico, determinando que os grupos funcionais de oxigênio são fundamentais para a interação eletrostática. Ademais, devido à presença de grupos funcionais contendo oxigênio no biocarvão com a presença de grafeno, a ligação de hidrogênio tende a ser um mecanismo de sorção interessante, em especial para poluentes contendo grupos anilina e sulfonil (HUANG *et al.*, 2017).

A complexação pode atuar na remoção de metais tóxicos, como, por exemplo, os complexos de mercúrio podem ser formados com grupos funcionais de superfície no composto biocarvão/grafeno, como -OH, CO e O=CO (TANG *et al.*, 2015). Devido à estrutura do grafeno possuir hibridização  $sp^2$ , a interação doador-aceptor de elétrons  $\pi$ - $\pi$  tende a ser uma força motriz relevante para a adsorção de poluentes no biocarvão contendo grafeno (FANG *et al.*, 2020). O caráter bidimensional do grafeno também poderia contribuir para a área de superfície aumentada, a fim de melhorar sua capacidade de sorção de poluentes, conforme evidenciado pelo estudo de Xiao e Chen (2017), que obteve uma área de superfície BET de  $2280 \text{ m}^2 \text{ g}^{-1}$  para o biocarvão semelhante ao grafeno e elevada capacidade de sorção para moléculas aromáticas.

As interações hidrofóbicas no compósito de biocarvão/grafeno atuam na sorção de poluentes orgânicos não polares (XIAO; CHEN, 2017). No estudo de Abdul, Zhu e Chen (2017), a hidrofobicidade apresentou um papel importante na remoção de PAEs de cadeia longa de alquila (dibutil ftalato). Em alta temperatura pirolítica, há um aumento dos microporos no biocarvão devido à formação de nanofolha de grafeno. Logo, a capacidade de sorção do biocarvão com a presença de grafeno é contribuída pelo mecanismo de difusão, por exemplo, poluentes que possuem diâmetro muito menor que microporos ( $< 2 \text{ nm}$ ), como a atrazina e os PAEs, são capazes de serem difundidos na estrutura do poro e adsorvidos pelo mecanismo de preenchimento de poros (ZHANG *et al.*, 2018).

Devido ao efeito sinérgico da catálise com a sorção, uma eficiente taxa de remoção de contaminantes tende a ser obtida, além do fato do biocarvão contendo grafeno apresentar uma área de superfície consideravelmente maior que a do biocarvão bruto e, com isso, apresentar mais locais catalíticos redox e de sorção, fazendo com que os poluentes sejam adsorvidos e tenham fácil acesso aos locais catalíticos (LI *et al.*, 2019). Além disso, o compósito biocarvão/grafeno se aplica especialmente como doador de elétrons na degradação catalítica de poluentes orgânicos. Os possíveis grupos doadores de elétrons, como elétrons  $\pi$ , metais de transição, entre outros, estão inseridos nas reações catalíticas induzidas pelo grafeno (FANG *et al.*, 2020).

Portanto, o biocarvão contendo grafeno trata-se de um eficiente adsorvente e apresenta baixos custos na remoção de poluentes tóxicos, principalmente pelo fato de a produção de biocarvão contendo grafeno proveniente de resíduos biológicos colaborar com a remediação de ambientes contaminados a custo relativamente baixo (FANG *et al.*, 2020).

## 5.2 FONTES DE RESÍDUOS DE BIOMASSA

### 5.2.1 Resíduos agrícolas e florestais

A biomassa advinda de resíduos agrícolas corresponde às culturas que geram resíduos com potencial energético, como o bagaço de laranja e o coco verde. Por outro lado, a biomassa florestal engloba os resíduos de serrarias, indústrias de papel e celulose, plantios florestais, entre outros. A maioria desses resíduos agrícolas e florestais não é reutilizada e, em vez disso, é descartada de forma inadequada, causando problemas ambientais e desperdiçando oportunidades de geração de renda para as empresas produtoras. Para lidar com essas e outras questões relacionadas à gestão de resíduos, a Lei nº 12.305, de 02 de agosto de 2010, regulamentada pelo Decreto nº 4.404, de 23 de dezembro de 2010, institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos (BRASIL, 2010). Essa lei apresenta princípios, objetivos, diretrizes, metas e ações a fim de garantir a gestão e gerenciamento ambiental integrados e adequados dos resíduos, enfatizando a importância da destinação correta e de buscar alternativas de aplicação para esses resíduos (NONES *et al.*, 2017).

#### 5.2.1.1 Bagaço de laranja

O processo industrial de produção de suco de laranja, D-Limoneno, óleo essencial, entre outros subprodutos, gera resíduos agrícolas denominados industrialmente de bagaço de laranja. Esse bagaço é composto por membranas, sementes, polpa (resíduos de vasos de suco) e pela casca composta pelo flavedo e pelo albedo. O primeiro corresponde à pele exterior (epicarpo) e apresenta cor amarelada, enquanto o segundo é a parte interior (mesocarpo) com aspecto de esponja e de cor branca (BAMPIDIS; ROBINSON, 2006).

Devido ao seu alto teor de água, em torno de 85% (em base úmida, b.u.), o resíduo da laranja pode ocasionar problemas ambientais e econômicos, uma vez que apresenta elevada fermentação (TRIPODO *et al.*, 2004). Uma opção para utilizar esse resíduo consiste em sua aplicação como adsorvente no tratamento de efluentes, uma vez que a adsorção é um método de separação de substâncias presentes no meio líquido (FIORENTIN *et al.*, 2010). O carvão ativado é um adsorvente amplamente utilizado para essa finalidade (CORRÊA *et al.*, 2006).

Nos últimos anos, pesquisadores têm avaliado alternativas com características adsorptivas semelhantes ao carvão ativado, mas que apresentam elevada disponibilidade e baixo custo. Com isso, o bagaço de laranja tem sido estudado como um possível adsorvente e seu uso apresentou boa eficiência (ARAMI *et al.*, 2005). Vale destacar que, segundo dados do Ministério da Agricultura, o Brasil produz em torno de 18 milhões de toneladas de laranja, o que representa em torno de 30% da safra mundial (CARVALHO *et al.*, 2021).

Um estudo realizado por Carvalho *et al.* (2021) analisou a remoção de tetraciclina, um fármaco livre, de água residuária por meio da adsorção em carvão ativado obtido a partir do bagaço de laranja. O experimento, realizado em escala de bancada, utilizou massas de biocarvão entre 0,03 a 0,5 gramas em 25 mL de solução de tetraciclina com concentração inicial de 59,11 mg L<sup>-1</sup>. A solução ficou em contato com o biocarvão em um *shaker* com agitação de 200 rpm por um período de 10 minutos. Os resultados obtidos (Tabela 2) indicaram que a eficiência de remoção da tetraciclina presente na água residuária aumentou proporcionalmente à massa de biocarvão, o que pode ser justificado pelo maior volume de poros e centro ativos do carvão, favorecendo a adsorção.

Tabela 2 – Fração de tetraciclina removida em função da massa de biocarvão

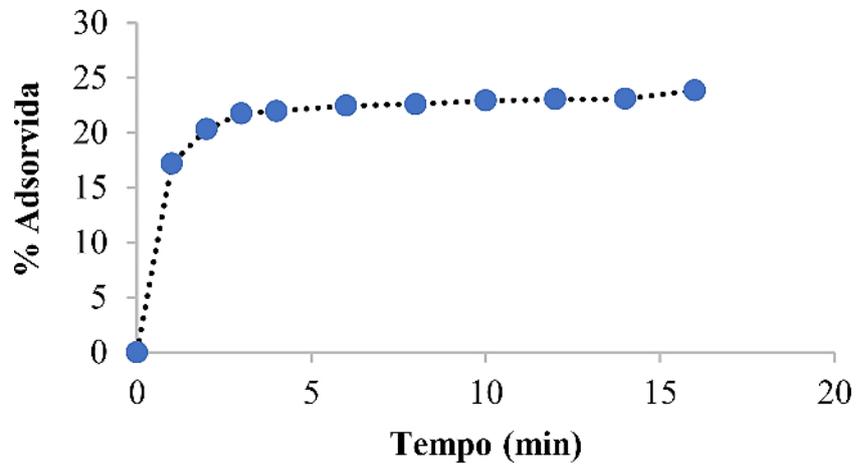
<b>Massa de carvão (g)</b>	<b>Remoção de tetraciclina (%)</b>
0,0305	24,01
0,0528	27,38
0,1017	29,13
0,3016	42,71
0,5072	57,69

Fonte: Carvalho *et al.* (2021)

A pesquisa de Carvalho *et al.* (2021) comprovou que o modelo cinético que mais favoreceu o processo de adsorção do biocarvão obtido a partir do bagaço de laranja foi o de pseudo-segunda ordem. O tempo de equilíbrio estimado para o biocarvão foi de oito minutos (Figura 12), que foi determinado como ótimo período para a utilização como biossorvente na remoção de contaminantes. Além disso, o modelo de Langmuir foi considerado o mais adequado para descrever o comportamento do biocarvão durante o processo de adsorção (Figura 13) (CARVALHO *et al.*, 2021). Vale ressaltar que o aumento da temperatura beneficiou a adsorção, pois houve interação física, evidenciando a probabilidade de regeneração do biocarvão à base de bagaço de laranja e seu reuso como adsorvente. O método utilizando o biocarvão apresentou 100% de capacidade de adsorção do fármaco em águas residuárias

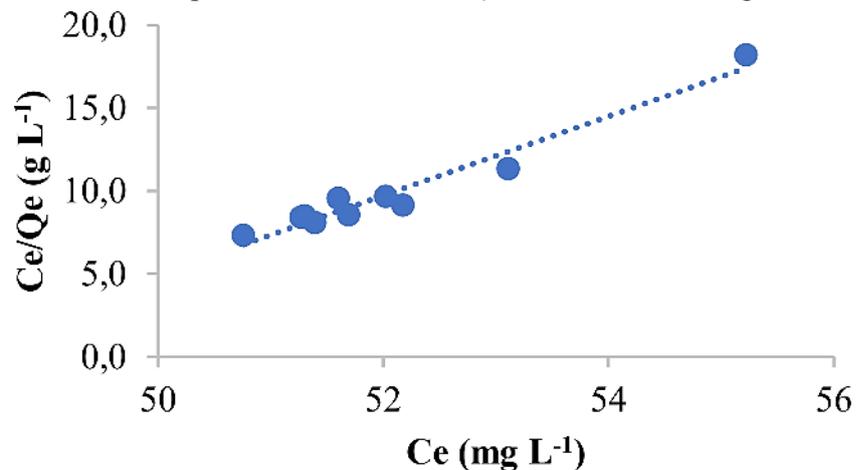
domésticas, sendo cerca de 25% mais eficiente em relação ao carvão comercial em termos de eficiência de filtração.

Figura 12 – Concentração de tetraciclina em função do tempo de adsorção



Fonte: Carvalho *et al.* (2021)

Figura 13 – Ajustes realizados para a isoterma de adsorção do modelo de Langmuir



Fonte: Carvalho *et al.* (2021)

De acordo com Fiorentin *et al.* (2012), é importante realizar um pré-tratamento de secagem da biomassa antes do processo de pirólise, principalmente no caso do bagaço da laranja, que apresenta alto teor de umidade, em torno de 85% (b.u.). Essa etapa de secagem influencia significativamente na qualidade do produto (ESPINDOLA, 2014).

No estudo conduzido por Santana *et al.* (2021) para a obtenção do biocarvão de bagaço de laranja, os resíduos foram primeiramente submetidos a um processo de secagem em estufa a 60 °C por 24 horas. Em seguida, os resíduos foram submetidos ao processo de pirólise em forno do tipo mufla, em cilindros fechados para restringir o fluxo de oxigênio (O<sub>2</sub>) e permitir a saída dos gases do processo. Foram aplicadas temperaturas de 300 °C por 35 minutos e de 500

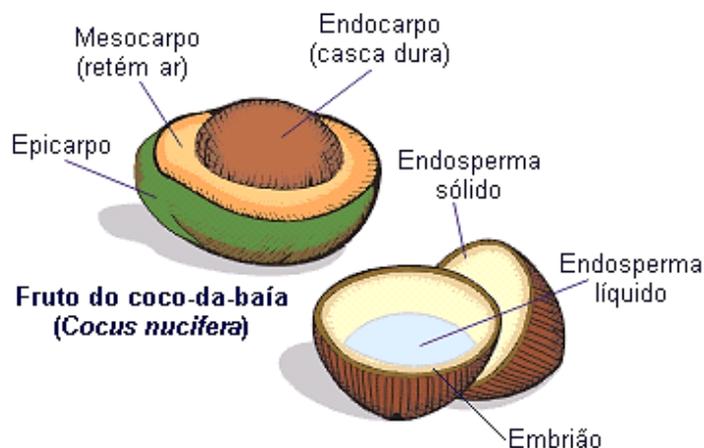
°C por 28 minutos. Por fim, uma parte dos resíduos seguiu para as etapas de resfriamento, peneiramento e armazenamento, enquanto outra parte foi lavada. Os biocarvões resultantes foram posteriormente secos e seguiram para as etapas de moagem e peneiramento.

Os resultados obtidos no estudo de Santana *et al.* (2021) indicaram que, de maneira geral, todas as amostras apresentaram alto teor de carbono fixo, sendo que as amostras produzidas a 500 °C e submetidas à lavagem exibiram teores superiores a 60%. Esse foi um ótimo resultado, indicando que o teor de carbono fixo está diretamente relacionado ao aumento da temperatura da pirólise. Isso ocorre porque, com o aumento da temperatura, há a perda de água higroscópica e de compostos como CO e CO<sub>2</sub>, que são volatilizados durante a pirólise (RÓZ *et al.*, 2015). Além disso, a condutividade elétrica aumentou com o aumento da temperatura, mas seu valor foi reduzido após a lavagem dos biocarvões (SANTANA *et al.*, 2021). Isso pode ser explicado pela presença de cinzas compostas por uma quantidade significativa de sais solúveis que geram corrente elétrica (FEITOSA *et al.*, 2020).

#### 5.2.1.2 Cascas de coco verde

O coco é o fruto do coqueiro e corresponde a uma drupa composta por três camadas: a epiderme lisa (epicarpo); o mesocarpo fibroso e espesso; e o endossarão, que é uma camada dura (pétrea) localizada no interior do fruto (Figura 14). O coco é envolto por uma casca externa que pode ser amarelada ou esverdeada e, com o tempo, essa casca fica seca e escurece, assumindo tons amarronzados (SILVA, 2014). O mesocarpo possui uma espessura de 3 a 5 cm e entre o endocarpo e o epicarpo há uma fração de fibras (ROSA *et al.*, 2001). No interior do fruto encontra-se o albúmen líquido, conhecido como água de coco, que com o tempo se solidifica, tornando-se um albúmen sólido (ARAGÃO, 2002).

Figura 14 – Morfologia do fruto do coco-da-baía



Fonte: EducaBras (2023)

O coco verde é amplamente comercializado no Brasil devido à sua vasta disponibilidade e baixo custo. No território brasileiro, há uma ampla distribuição de cultivos de coqueiro, totalizando cerca de 290 mil hectares de cultivo com produção em torno de dois bilhões de frutos/anos. A perspectiva é que essa produção continue crescendo, ampliando o mercado (FAO, 2014). Porém, o descarte acumulado dos resíduos de coco impacta o meio ambiente, pois mesmo sendo transportado com dificuldades logísticas (devido ao seu peso e volume) para lixões ou aterros sanitários, o coco verde apresenta um longo período de decomposição (SILVA, 2014). Nesse sentido, Ribeiro (2016) avaliou a eficiência do biocarvão obtido através de cascas de coco verde (*Cocos nucifera*) para a remoção de matéria orgânica, sólidos totais fixos e voláteis, fósforo e nitrogênio do esgoto sanitário com o uso de colunas de filtração, a fim de ser um recurso alternativo ou complementar de tratamento a baixo custo.

A produção do biocarvão consistiu na introdução das cascas de coco verde em um forno convencional de carvão, onde foram pirolisadas a uma temperatura de cerca de 300 °C durante 24 horas. Após três dias de resfriamento no forno desligado, os resíduos foram coletados e encaminhados ao laboratório, onde foram moídos em moinho de facas e peneirados em uma peneira granulométrica de 2 mm. Em seguida, as cascas de coco verde foram secas em uma estufa a cerca de 70 °C por 24 horas e foi realizada a análise granulométrica por peneiramento, utilizando peneiras de 0,25 mm, 0,60 mm, 1,18 mm e 26 mm e amostras de 150 gramas. O processo foi realizado em escala de bancada, utilizando uma coluna de filtração, que passou por lavagens de água até que o filtrado estivesse consideravelmente limpo e foi posicionada abaixo do galão contendo esgoto sanitário bruto, com uma torneira para controlar a vazão manualmente. A coluna foi preenchida com 3 cm de brita para conter os meios filtrantes, cerca de 60 cm de biocarvão e, para a entrada do efluente, se manteve um espaçamento livre de 7 cm. O fundo da coluna foi fechado com Tecido Não-Tecido (TNT) envolto por uma borracha elástica para evitar a passagem de materiais juntamente com o filtrado. Foram realizados 11 ensaios de filtração, onde foram coletados 500 mL de amostra do esgoto filtrado em fluxo descendente em um béquer de 600 mL.

O processo de pirólise para a produção de biocarvão a partir de cascas de coco verde é considerado lento, por resultar em um produto sólido. A pesquisa de Silveira (2018) avaliou o processo de pirólise das cascas de coco verde para a obtenção de bio-óleo, biogás e biocarvão em temperaturas de 400 °C e de 600 °C. Ao elevar a temperatura de 400 °C para 600 °C, observou-se uma redução superior a 100% da umidade do mesocarpo. Houve alteração nos valores de pH do mesocarpo (de 11,51 para 12,30) e do endocarpo (de 11,90 para 12,57) com o aumento da temperatura. Esse aumento no pH do biocarvão torna a sua aplicação promissora

para corrigir a acidez de solos intemperizados em regiões tropicais (ANDRADE *et al.*, 2016). A Tabela 3 apresenta as variáveis do processo e como o aumento da temperatura influenciou as propriedades do biocarvão.

Tabela 3 – Propriedades do biocarvão para temperaturas de 400 °C e 600 °C

Variáveis	Unidade	T 400 °C		T 600 °C	
		Mesocarpo	Endocarpo	Mesocarpo	Endocarpo
Umidade	%	5,80	4,20	2,75	1,55
pH	-	11,51	11,90	12,30	12,57
Condutividade	$\mu\text{S cm}^{-1}$	1,21	1,30	1,42	1,48
Cinzas	%	9,70	2,90	9,61	3,38
Densidade	$\text{g L}^{-1}$	320	300	270	255
Cloretos	$\text{mg kg}^{-1}$	2.991,60	44,35	6.091,38	89,53
Fósforo	$\text{mg kg}^{-1}$	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002
PCS	$\text{MJ kg}^{-1}$	26,587	31,062	27,020	32,406
PCI	$\text{MJ kg}^{-1}$	26,298	30,773	26,731	32,114

Nota: PCI – Poder Calorífico Inferior, PCS – Poder Calorífico Superior.

Fonte: Silveira (2018)

Silveira (2018) realizou também uma análise econômica, utilizando dados do Levantamento Sistemático da Produção Agrícola do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2017), para estimar a quantidade anual de frutos produzidos no Brasil. Analisou-se o aproveitamento energético de 10% da biomassa do coco, o que corresponde a 3.391 toneladas por ano, provenientes do estado de Alagoas, utilizando o processo de pirólise. O processamento considerou uma taxa de 400 kg/h de biomassa do coco, levando em conta preços médios do mercado, além de custos de mão de obra, material, desembolsos fixos e variáveis, logística, manutenção e encargos tributários. Com isso, foi possível analisar a possibilidade da implementação desse processo, incluindo indicadores econômicos como a Taxa Interna de Retorno (TIR), o Valor Presente Líquido (VPL), o Payback simples e descontado, os quais indicaram uma rota promissora de viabilidade. Conforme indicado na Tabela 4, foram utilizados os rendimentos médios das frações de bio-óleo, biocarvão e biogás obtidos a partir do processo de pirólise, visando um lucro operacional de 6% com capacidade de 283 toneladas por mês em uma unidade de pirólise. A Tabela 5 fornece uma estimativa de investimento para essa unidade, totalizando R\$ 981.750,00 (novecentos e oitenta e um mil setecentos e cinquenta reais), incluindo despesas com galpão industrial, tanque de armazenagem, unidade de pirólise, entre outras.

Tabela 4 – Avaliação econômica preliminar

Seq	Item	Und	diversos			%	Referências
<b>1</b>	<b>Potencial de geração de Biomassa</b>						
1.1	Frutos produzidos	frutos		6.278.833	75.346.000		IBGE-2017
1.2	Estimativa de Biomassa	kg/fruto	0,45	2.825.475	33.905.700		
1.3	Aproveitamento da Biomassa	kg	10%	282.548	3.390.570		
1.4	Aproveitamento energético da biomassa	MJ	17,932	5.067	60.800		
<b>2</b>	<b>Estimativa de produtos da biomassa</b>						
2.1	Bioóleo	kg	41,8%	118.105	1.417.258		Rendimento médio
2.2	Biocarvão	kg	34,4%	97.196	1.166.356		Rendimento médio
2.3	Biogás	kg	23,8%	67.246	806.956		Rendimento médio
<b>3</b>	<b>Estimativa de Receita</b>						
3.1	Bioóleo	RS/kg	RS0,60	RS70.863	RS850.355	47%	
3.2	Biocarvão	RS/kg	RS0,60	RS58.318	RS699.814	39%	
3.3	Biogás	RS/m <sup>3</sup>	RS0,30	RS20.174	RS242.087	14%	
3.7	Total de receita	RS		RS149.355	RS1.792.255	100%	
<b>4</b>	<b>Estimativa de Despesas</b>						
4.1	Investimento	RS.kg/h					
4.1.2	Custo total amortização	RS		RS19.533	RS234.391	14%	
4.2	Mão de Obra	RS/percapita	nº	RS3.500	RS3.000		
4.2.3	Custo total mão de obra	RS		RS55.500	RS666.000	39%	
4.3	Operação						
4.3.3	Custo total manutenção	RS		RS8.961	RS107.535	6%	
4.4	Material						
4.4.4	Custo total material	RS		RS4.481	RS53.768	3%	
4.5	Logística						
4.5.3	Custo total logística	RS/kg		RS70.637	RS847.643	50%	
4.6	Encargos tributários						
4.6.2	Custo encargos tributários	%	25%	RS37.339	RS448.064	26%	
<b>5</b>	<b>Custo Total</b>	RS		RS140.950	RS1.691.400	100%	
<b>6</b>	<b>Resultado Operacional</b>	RS		RS8.405	RS100.855		
<b>7</b>	<b>Lucro Bruto Operacional</b>	%		6%	6%		

Fonte: Silveira (2018)

Tabela 5 – Estimativa de investimento

Item	Tipo	Análise			
		Qtd.	Un.	VU	VT
1	Planta de pirólise	1	Und.	R\$ 450.000	R\$ 450.000
2	Galpão industrial	1.500	m <sup>2</sup>	R\$ 250	R\$ 375.000
3	Gerador de 140 kVA	1	Und.	R\$ 50.000	R\$ 50.000
4	Tanque de 30 m <sup>3</sup>	1	m <sup>3</sup>	R\$ 40.000	R\$ 40.000
5	Licenciamento ambiental	1	Und.	R\$ 20.000	R\$ 20.000
<b>Total</b>					R\$ 935.000
<b>Outros</b>				5%	R\$ 46.750
<b>Total</b>					R\$ 981.750

Nota: Qtd. – Quantidade, Un. – Unidade, VU – Valor Unitário, VT – Valor Total

Fonte: Silveira (2018)

### 5.2.1.3 Folhas de amendoeira-da-praia

A amendoeira-da-praia (*Terminalia catappa*) é uma espécie que se encontra em locais de clima tropical e subtropical. Devido à sua considerável resistência a ventos fortes, alta salinidade e luminosidade, é comum encontrá-la em regiões costeiras do Brasil (MARQUES *et al.*, 2012). A árvore da amendoeira-da-praia é de grande porte e possui entre 25 a 45 m de altura,

com copa densa e ampla, folhas grandes e fruto indeiscente e carnosos. No Brasil, o período de frutificação ocorre entre os meses de novembro e março (IVANI *et al.*, 2008).

Figura 15 – Amendoeira-da-praia



Fonte: Borba (2014)

Em um estudo conduzido por Souza *et al.* (2021), analisou-se o uso de biocarvão proveniente de folhas secas de amendoeira-da-praia no tratamento de águas contaminadas com metais. O biocarvão foi produzido por conversão à baixa temperatura (CBT) e apresentou bandas de CH<sub>2</sub>, C-O, O-H e C-O-C, com teores de 46,6% de oxigênio, 48,8% de carbono, 3,3% de hidrogênio e o restante composto por nitrogênio e enxofre. Os autores também utilizaram um coquetel de radiotraçadores Co-57, Mn-54 e Zn-65. A Tabela 6 apresenta as características desses radiotraçadores, que correspondem a alguns dos metais que compõem a água contaminada para ser adicionado em água deionizada e massas de biocarvão para mensurar parâmetros como tempo de equilíbrio, pH e capacidade de adsorção através das isotermas de Langmuir e Freundlich.

Tabela 6 – Características dos radiotraçadores Co-57, Mn-54 e Zn-65

<b>Radiotraçador</b>	<b>Energia (keV)</b>	<b>Tempo de meia-vida (dias)</b>	<b>Abundância (%)</b>
Co-57	122,06	271,80	87,53
Mn-54	834,85	312,19	99,98
Zn-65	1.115,50	244,10	50,23

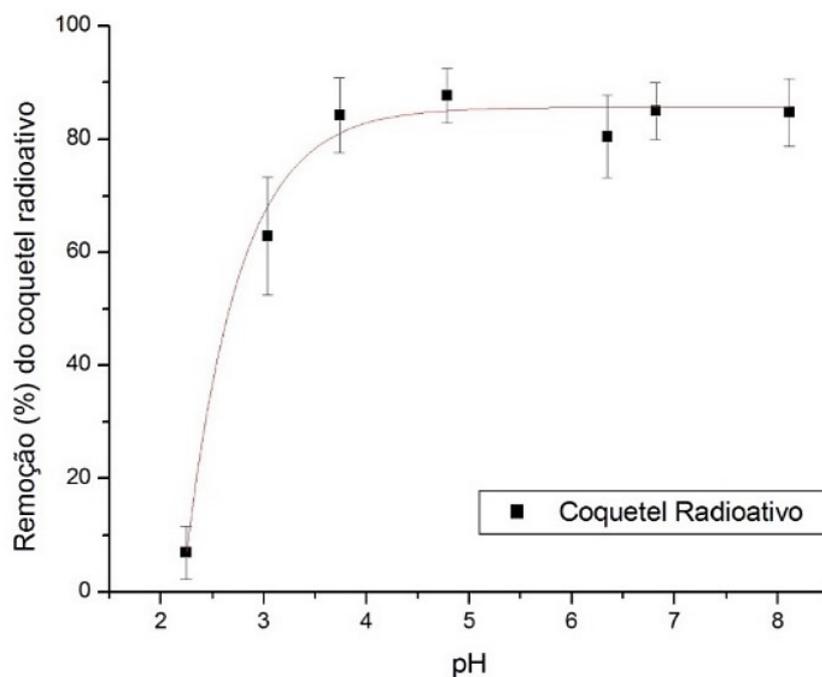
Fonte: LNHB (2016)

Para a produção do biocarvão, a biomassa de folhas secas de amendoeira-da-praia foi inserida em uma caixa metálica, que possuía entrada e saída de gás e estava acoplada a um condensador dos voláteis constituintes da água, gás e óleo da CBT, saturada com atmosfera de

gás carbônico e colocada em uma mufla. As temperaturas usadas foram de 25 °C, 180 °C, 240 °C e 350° C durante 30 minutos. Posteriormente, os voláteis condensados foram mantidos em um balão acoplado ao condensador, o biocarvão foi retirado da caixa e peneirado em peneira de 100 mesh. Em seguida, foram realizados os experimentos em batelada, usando espectrometria gama para medir a atividade dos radiotraçadores. Após a preparação da solução-mãe, foram preparadas as soluções de pH entre 2 e 8 com água deionizada e soluções diluídas de hidróxido de amônio e ácido clorídrico. Nessas soluções, colocadas em frasco acrílico em estufas a 63 °C para que o pH não se alterasse, foram inseridos os radiotraçadores, com posterior adição de alíquotas de solução-mãe. Subsequentemente, 20 mg de biocarvão foram homogeneizados em agitador mecânico e inseridos em uma seringa plástica com a solução preparada na etapa anterior. Em seguida, os conteúdos foram filtrados em uma membrana descartável e estéril. Vale ressaltar que foi preparado um “branco”, ou seja, uma seringa que não possuía o biocarvão, para que fosse possível realizar as análises após o experimento (SOUZA *et al.* 2021).

Os resultados de Souza *et al.* (2021) evidenciaram que, na faixa de pH entre 3,8 e 8,1, os valores de eficiência se mantiveram constantes, em torno de 80% (Figura 16). Esse resultado indica que o biocarvão produzido é favorável à adsorção, uma vez que a maioria das águas naturais possui pH nessa faixa (STUMM; MORGAN, 1996).

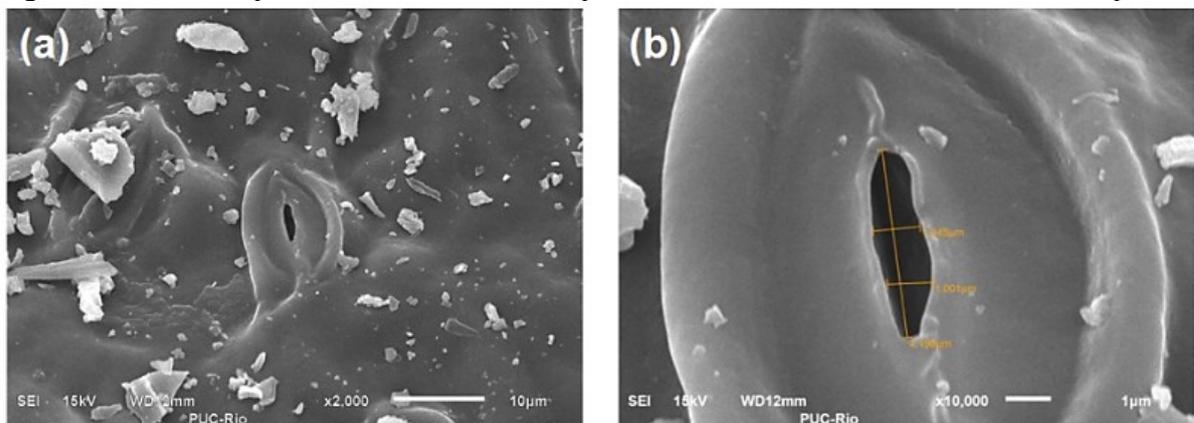
Figura 16 – Curva do pH em função da eficiência da remoção (%) de radiotraçadores em águas contaminadas



Fonte: Souza *et al.* (2021)

Em relação ao tempo de equilíbrio da adsorção, foram determinados os percentuais de remoção dos radiotraçadores Co-57, Mn-54 e Zn-65 pelo biocarvão a partir das isotermas de Freundlich e Langmuir, considerando o pH ideal de 5,1 e tempos de agitação de 5, 10, 15, 20, 30 e 60 minutos. Observou-se que a partir de 30 minutos o tempo de equilíbrio tendeu a ficar constante. O resultado apresentou alto teor de carbono fixo (47,91), que está relacionado com a presença de cadeias carbônicas condensadas de alto peso molecular nos compostos da biomassa advinda de folhas secas da amendoeira-da-praia. Além disso, obteve-se baixo percentual de voláteis (9,47%), que pode ser explicado pelo fato de o biocarvão ter sido produzido em atmosfera de gás carbônico, que é mais oxidante que o nitrogênio. Na Figura 17 é possível observar, macroscopicamente, os poros do biocarvão em atmosfera de gás carbônico. Pelas isotermas de Freundlich e Langmuir constatou-se que os radiotraçadores demonstraram preferência pelo biocarvão, e a capacidade máxima de adsorção pode ser modelada. Dessa forma, o estudo indicou que o biocarvão obtido através de folhas secas de amendoeira-da-praia possui potencial para ser utilizado no tratamento de águas contaminadas com metais, sendo eles manganês, zinco e cobalto, em casos de acidente ou negligência (SOUZA *et al.*, 2021).

Figura 17 – Microscopia eletrônica do biocarvão produzido de folhas secas de amendoeira-da-praia



Fonte: Souza *et al.* (2021)

Outro estudo, realizado por Magnano *et al.* (2018), utilizou o endocarpo da amendoeira para obter o biocarvão e remover cromo hexavalente presente em meio aquoso. O processo de pirólise foi realizado em um forno tubular, com injeção de N<sub>2</sub> a um fluxo de 1 L min<sup>-1</sup>, sob atmosfera inerte e com taxa de aquecimento de 25 °C min<sup>-1</sup> até atingir uma temperatura de 600 °C, mantida constante por uma hora. O material resultante apresentou majoritariamente microporos. O pH<sub>pcz</sub> (pH de ponto de carga zero), que corresponde ao valor de pH em que há a igualdade dos íons H<sup>+</sup> e OH<sup>-</sup>, ou seja, a adsorção de íons determinantes de potencial é igual, foi

igual a 2. Dessa forma, a análise da cinética foi realizada com o pH igual a 2 e apresentou um tempo de equilíbrio de 240 min, utilizando-se 0,05 g de biocarvão em 100 mL de uma solução contendo 50 mg L<sup>-1</sup> de íons Cr (VI). A máxima remoção obtida foi de aproximadamente 14,5 mg g<sup>-1</sup>. Além disso, o modelo de pseudo-segunda ordem apresentou melhor correlação com os dados experimentais, indicando que o processo ocorre por quimissorção.

Ambos os estudos demonstraram a potencialidade do uso do biocarvão da amendoeira-da-praia como um adsorvente eficaz para a remoção de poluentes em meios aquosos contaminados, demonstrando a importância de aproveitar esses resíduos.

### **5.2.2 Resíduos vegetais lenhosos precursores da madeira**

A biomassa lenhosa corresponde a uma fonte primária de energia que apresenta significativa aplicação na preparação de alimentos, aquecimento de habitações e de águas sanitárias (BOMAN; FORSBERG; JÄRVHOLM, 2003). Quando comparada com outras fontes energéticas, como eletricidade e gás natural, a biomassa lenhosa apresenta baixo custo e maior disponibilidade, porém estudos apontam que seu uso foi sendo reduzido nos últimos anos. Trata-se de um recurso com ampla disponibilidade, além de ser renovável se for corretamente utilizado (FERREIRA, 2012). Porém, continua sendo um recurso energético com alta procura por apresentar um processo de obtenção pela combustão direta, apresentando complexidade e econômico custo para geração de energia (QUIRINO *et al.*, 2005).

#### **5.2.2.1 Serragem**

A serragem (Figura 18) é um resíduo de madeira que apresenta partículas de diferentes tamanhos, com graus de umidade e decomposição variados e coloração avermelhada ou amarronzada (SODRÉ; CORÁ; SOUZA JÚNIOR, 2007). A qualidade da serragem é diretamente influenciada pelo teor de tanino presente e pela condição e tempo de armazenamento (BURÉS, 1997). Segundo Dessbesell (2014), somente a Bacia Hidrográfica do Rio Pardo possui uma produção diária de cerca de 69,92 toneladas de serragem. Em 2010, o Inventário Florestal de Biomassa Residual desenvolvido pela Associação Brasileira de Indústrias de Biomassa (ABIB) apontou que o Brasil possuía cerca de 158 milhões de metros cúbicos de resíduos florestais, que possibilitaria a produção de 71 milhões de metros cúbicos de pellets de madeira (OLIVEIRA, 2012).

Figura 18 – Serragem



Fonte: Oseland (2023)

O estudo de Krebs (2014) avaliou a produção de biocarvão através da pirólise rápida de serragem, assim como a influência da temperatura na composição química. A biomassa de serragem, considerada um resíduo sólido, foi triturada com granulometria entre 80 e 100 mesh e submetida ao processo de pirólise a temperaturas de 420 °C, 520 °C e 620 °C. Essas temperaturas foram escolhidas porque correspondem à faixa em que a pirólise rápida apresenta o maior rendimento de produto líquido. O gás de arraste utilizado foi o gás Nitrogênio (N<sub>2</sub>) de alta pureza (99,998%). O leito do reator foi preenchido com areia de granulometria entre 45 e 60 mesh e envolvido com camisa de isolamento térmico de lã de rocha. Foi adicionado um ciclone na saída do reator para a coleta do biocarvão e um Erlenmeyer na base do ciclone para a coleta do material produzido.

O processo conduzido por Krebs (2014) iniciou-se com adição de 10 g de biomassa em um funil de separação, liberando manualmente cerca de 3 g de biomassa no interior do reator para evitar um aumento significativo de temperatura. O aquecimento foi promovido por duas resistências elétricas posicionadas no interior da manta de lã de rocha. Um condensador espiral e um trocador casco-tubo foram adicionados para condensar os compostos voláteis para a recuperação de bio-óleo. O sistema contou com a circulação de água a 4 °C, garantindo o resfriamento. O biocarvão analisado foi coletado no Erlenmeyer, enquanto o biocarvão restante no reator queimava com a troca de gás nitrogênio por ar comprimido nas trocas de temperatura.

Os resultados obtidos pelos autores apontaram que a presença de voláteis diminuiu com o aumento da temperatura, enquanto que a fração de carbono fixo aumentou. Isso se deve ao fato de que a celulose e a hemicelulose, dois dos principais componentes da biomassa, são volatizados acima de 420 °C (YANG et. al, 2007). O biocarvão produzido na temperatura de 620 °C apresentou as melhores características, contendo maior quantidade de carbono

disponível, incluindo carbono fixo e voláteis. Além disso, há uma crescente perda de voláteis relacionada a temperatura, que tende a colaborar para o aumento da área superficial, com elevada porosidade, permitindo a sua aplicação como insumo agrícola e adsorvente. Ademais, a temperatura de 620 °C resultou em maior redução de elementos como alumínio (Al), cálcio (Ca) e magnésio (Mg), o que pode ter tornado mais proeminentes as frações de fósforo (P), cloro (Cl) e oxigênio (O), que não foram identificados nas amostras das outras temperaturas (Tabela 7) (KREBS, 2014).

Tabela 7 – Concentração dos elementos na amostra de biocarvão a 620 °C

<b>Elemento/Linha</b>	<b>Composição (%)</b>
C K	69,98
O K	8,62
Ca K	7,72
Al K	6,84
Mg K	3
S K	1
Na K	0,85
Si K	0,64
Cl K	0,63
K K	0,53
P K	0,2
<b>Total</b>	<b>100,00</b>

Nota: C – Carbono, K – Potássio, O – Oxigênio, Ca – Cálcio, Al – Alumínio, Mg – Magnésio, S – Enxofre, Na – Sódio, Si – Silício, Cl – Cloro, P – Fósforo

Fonte: Krebs (2014)

A partir de microscopia eletrônica de varredura, foi analisada a morfologia do biocarvão em diferentes temperaturas. Após o processo de trituração, a morfologia da biomassa evidenciou a presença de poros, possivelmente devido à tensão de cisalhamento no corte, que pode ter incidido no aquecimento local. Além disso, foi comparada a diferença entre a área superficial do biocarvão (Tabela 8), quantificada pelo método Brunauer-Emmett-Teller (BET), para as temperaturas de 420 °C, 520 °C e 620 °C (KREBS, 2017).

Tabela 8 – Valores de área superficial em função da temperatura

<b>Temperatura</b>	<b>Área superficial (m<sup>2</sup> g<sup>-1</sup>)</b>
420 °C	1
520 °C	3
620 °C	16

Fonte: Krebs (2014)

Em processos de desvolatilização de materiais ligno-celulósicos, o componente volátil é aceleradamente aquecido e, em seguida, liberado. Nesse momento, os gases e vapores

interagem com as resinas da biomassa que estão presentes na superfície da matriz (BIAGINI; NARDUCCI; TOGNOTTI, 2008). O aquecimento dessas resinas ocasiona o derretimento da superfície, alterando seu formato e resultando no aparecimento de bolhas aderidas (Figura 13). Além disso, o tamanho das partículas do biocarvão é reduzido com o surgimento de rupturas e fragmentações com a quebra de ligações químicas. Os macroporos apresentam uma importante função na infiltração e aeração de água no solo, sendo capazes de remover contaminantes. Foi verificado que o aumento da temperatura interferiu nas propriedades do biocarvão, aumentando significativamente a área superficial. Porém, o aumento da temperatura também ocasionou a perda de grupos funcionais que podem ser importantes dependendo da aplicação futura do biocarvão (KREBS, 2014).

Figura 19 – Macroporos do biocarvão na temperatura de 620 °C



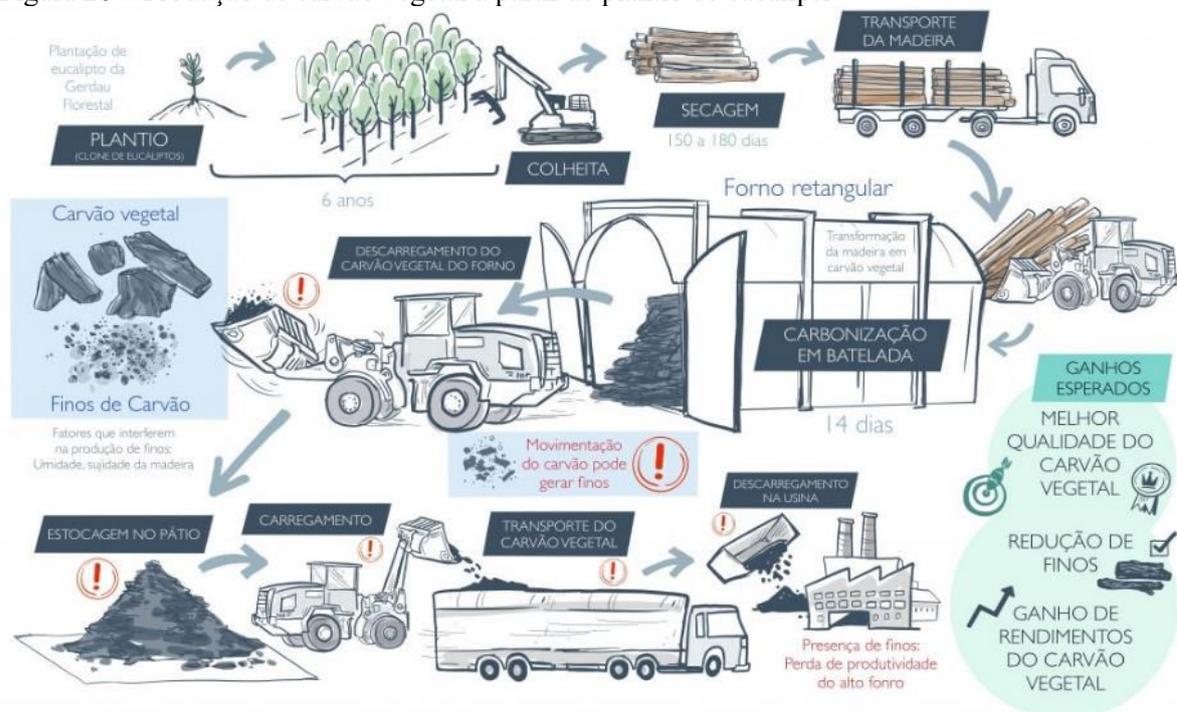
Fonte: Krebs (2014)

Outro estudo, realizado por Lara (2018), avaliou a remoção de atrazina, um herbicida amplamente utilizado no Brasil, em meio aquoso. A análise realizada utilizando matrizes de adsorventes provenientes da compostagem de dejetos suínos e finos de carvão demonstrou que a implementação dessas matrizes é economicamente viável. O estudo utilizou um reator de compostagem de 500 L, com um custo aproximado de R\$ 183,90, juntamente com substratos de maravalha e serragem, os quais possuíam um custo de cerca de R\$ 5,00/quilo. Além disso, a produção da matriz com 18% (m/m) de biocarvão apresentou um custo de cerca de R\$ 2,18/kg, inferior ao custo do carvão ativado que é comercialmente utilizado, que é de aproximadamente R\$ 7,00/kg. As observações do estudo de Krebs (2014) sustentam a hipótese de que o biocarvão proveniente da serragem também oferece uma alternativa eficiente na remoção de contaminantes de águas residuárias, sendo economicamente mais viável em comparação ao carvão ativado.

### 5.2.2.2 Finos de carvão (madeira)

Os finos de carvão (derivados da madeira) correspondem ao resíduo sólido proveniente da carbonização parcial de madeira, sendo o material fino que se acumula no fundo do forno após o processo (LUCON; COSCIONE; ANDRADE, 2016). O Brasil contribui com um terço da produção mundial de carvão vegetal, do qual corresponde a 30% da produção nacional de ferro-gusa (BERNARDINI, 2020). A empresa Gerdau, responsável por essa produção, destaca-se como a maior produtora de carvão vegetal do mundo. A obtenção do carvão vegetal ocorre através da carbonização da madeira, a partir do cultivo de eucaliptos, conforme ilustrado na Figura 20. Esse processo resulta em finos de carvão devido a diversos fatores, como a umidade da madeira, temperatura de carbonização, manuseio do carvão, taxa de aquecimento, qualidade da madeira, resíduos de colheita e focos de fogo. A presença de finos de carvão pode ocupar os espaços vazios entre os pedaços de carvão, prejudicando a circulação dos gases e, conseqüentemente, a marcha do forno, o que acarreta um aumento no consumo específico de carvão (FIEMG LAB, 2022).

Figura 20 – Produção de carvão vegetal a partir de plantio de eucalipto



Fonte: FIEMG Lab (2022)

Ribeiro (2016) realizou um estudo sobre a eficiência do biocarvão proveniente de finos de carvão (derivados de madeira), produzido por diferentes tipos de madeira e resultante do peneiramento da produção do carvão vegetal, no tratamento de esgoto sanitário. O biocarvão

de madeira também passou pelas etapas de secagem, análise granulométrica, peneiramento e pelo mesmo processo experimental que o coco verde (descrito no item 5.2.1.2).

O estudo de Delatorre *et al.* (2020) analisou o biocarvão proveniente de finos de carvão vegetal através do processo de pirólise rápida a temperaturas de 400 °C, 600 °C e 800 °C, a uma taxa de aquecimento de 10 °C min<sup>-1</sup> e com tempo de permanência de 120 min. O material apresentou uma granulometria média de 270 mesh (0,053 mm) após passar por um moinho de bolas (modelo MA-500). Os finos de carvão que foram submetidos a 800 °C resultaram no melhor potencial energético, uma vez que o aumento da temperatura aumentou a densidade energética e os percentuais de carbono fixo. Dessa forma, foi comprovado que o biocarvão advindo de finos de carvão vegetal possui aplicabilidade energética. É importante destacar que a densidade é uma propriedade relevante da madeira, pois está diretamente relacionada com a energia estocada por unidade de volume, ou seja, quanto maior a sua densidade, maior a eficiência como combustível, uma vez que aumenta a produção de energia.

### 5.2.3 Lodo

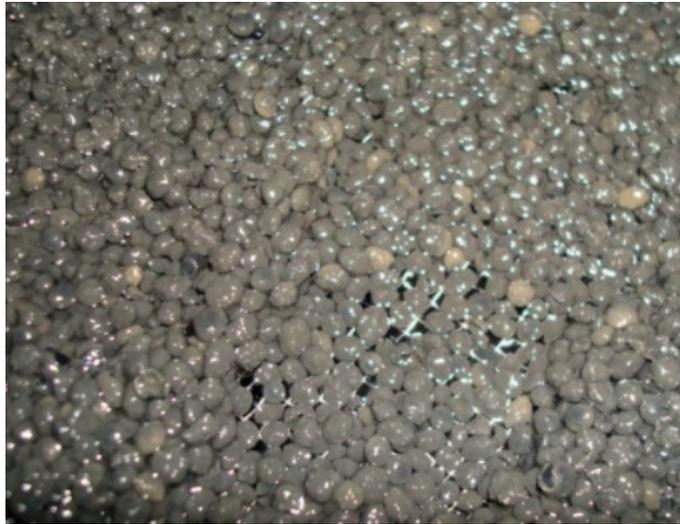
O lodo é classificado como um resíduo sólido e é originário de sistemas de tratamento de efluentes sanitários e industriais, sendo que esse tipo de resíduo representa um expressivo problema mundial (COSTA, 1995). Uma alternativa para minimizar essa problemática envolve a utilização do lodo como matéria-prima, oferecendo uma solução economicamente viável e ambientalmente adequada (BOROWSKI *et al.*, 2002). Quando utilizado de forma adequada, o lodo pode contribuir para a produção de energia térmica e elétrica. É importante ressaltar que o uso de resíduos sólidos como biomassa e como combustível alternativo depende de suas propriedades químicas e físicas (ZHENG; KOZIŃSKI, 2000). Anualmente, o Brasil produz em torno de 220.000 toneladas de lodo seco (IWAKI, 2018).

#### 5.2.3.1 Lodo anaeróbio

Um estudo realizado por Cuba *et al.* (2021) analisou a adsorção de tartrazina em biocarvão produzido a partir de lodo biológico, gerado em um sistema de tratamento de efluentes, assistido por energia de micro-ondas e ativado com ácido fosfórico. A Figura 21 demonstra um lodo biológico anaeróbio. Estudos anteriores apontam que o biocarvão obtido através da pirólise do lodo biológico apresenta quantidades consideráveis de minerais e carbonos, uma estrutura porosa amplamente desenvolvida e uma significativa quantidade de sítios para troca de cátions e adsorção (ZIELINSKA; OLESZCZUK, 2015). Vale destacar que o despejo de corantes (como a tartrazina) nos corpos d'água é um problema ambiental crítico,

pois essas substâncias, muito utilizadas em diversos setores industriais, não apenas causam contaminação, mas também provocam o escurecimento da água (LIMA, 2020).

Figura 21 – Lodo anaeróbio



Fonte: adaptado de Longaretti *et al.* (2019)

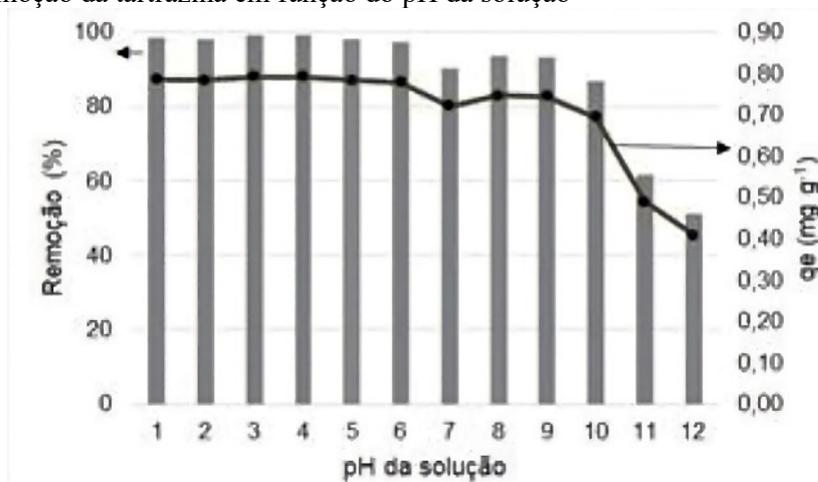
O lodo anaeróbio utilizado no estudo de Cuba *et al.* (2021) foi obtido a partir de um reator de manta de lodo (UASB). Os grânulos de lodo foram lavados com água destilada, filtrados e secados a 105 °C até obter massa constante. Em seguida, o lodo foi imerso em 85% de ácido fosfórico na proporção 3:1 (g de ácido/g de lodo) e, posteriormente, passou por secagem em um micro-ondas por 30 segundos. Para produzir o biocarvão, o lodo passou pela etapa de pirólise em forno mufla sob atmosfera de gás nitrogênio, onde foi mantido por 1 hora, com taxa de aquecimento de 10 °C m<sup>-1</sup> até a temperatura de 250 °C. Após a pirólise, o material foi lavado com água deionizada até apresentar pH neutro e foi seco em estufa a uma temperatura de 105 °C por 24 horas.

As análises realizadas por Cuba *et al.* (2021) incluíram o uso de Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) para analisar a morfologia superficial do biocarvão e a técnica de titulação de Boehm para quantificar os grupos funcionais. Além disso, os ensaios foram processados em batelada com temperatura ambiente em torno de 24 °C e agitação constante de 100 rpm, para que houvesse a determinação do pH, cinética e equilíbrio de adsorção. Todos os ensaios foram realizados em triplicata e envolveram a adição de 25 g L<sup>-1</sup> de adsorvente em 50 mL de solução de tartrazina (75 mg L<sup>-1</sup>), ajustando o pH entre 1 e 12 com solução de NaOH 0,1 M e H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 0,1 M, e mantendo sob agitação por 24 horas para determinar o pH de adsorção. Para avaliar a remoção de tartrazina em função do tempo de contato com o adsorvente, foram adicionados 3 g L<sup>-1</sup> de biocarvão ativado (BCA) em 2 L de solução de tartrazina (30 mg L<sup>-1</sup>), a qual foram

coletadas alíquotas de 5 mL. Para a determinação do equilíbrio de adsorção, 1,25 g ( $25 \text{ g L}^{-1}$ ) de BCA foi adicionado a 50 mL de solução de tartrazina em concentrações de 13, 30, 60, 75 e  $100 \text{ mg L}^{-1}$ . As soluções foram agitadas por 4 horas e os dados obtidos foram ajustados aos modelos de Langmuir, Freundlich, Temkin e Dubinin Raduskevich (CUBA *et al.*, 2021).

Os resultados dos ensaios indicaram que o aumento do pH resultou em uma redução da remoção de tartrazina. A alteração do pH da solução da faixa de 3-4 para a de 11-12 fez com que a porcentagem média de remoção de tartrazina fosse reduzida de 99% para 56%, como observado na Figura 22. O estudo constatou que a molécula de tartrazina apresenta três grupos funcionais ionizáveis, sendo eles o grupo carboxilato ( $-\text{COO}^-$ ), o sulfonado ( $-\text{SO}_3^-$ ) e azo ( $-\text{N}=\text{N}-$ ), com valores de  $pK_a$ , que corresponde ao logaritmo de base 10 negativo da constante de dissociação ácida ( $k_a$ ) de uma solução ( $pK_a = -\log_{10}k_a$ ), de 5,0, 2,0 e 10,86, respectivamente. Devido ao processo de produção a partir de lodo biológico e ativação com ácido fosfórico em indução pela energia de micro-ondas, o biocarvão apresentou grande quantidade de grupos hidroxilas resultantes da presença de ácido carboxílico, o que possibilitou interações com a tartrazina do tipo ligação de hidrogênio. Além disso, foi observado que a adsorção do corante ocorreu de maneira rápida, atingindo 46% de remoção ( $9,20 \text{ mg g}^{-1}$  foram adsorvidos) nos primeiros 45 minutos. O equilíbrio de adsorção foi alcançado em 210 minutos, com máxima remoção de 49,3% (máxima adsorção de  $9,20 \text{ mg g}^{-1}$ ). Os dados se ajustaram aos modelos de pseudo-primeira ordem, pseudo-segunda ordem e Elovich, sugerindo que a adsorção de tartrazina no biocarvão ocorre por diferentes mecanismos. Através da aplicação do modelo intrapartícula foi possível constatar que esses mecanismos são o efeito de camada limite e, posteriormente, a difusão intrapartícula (CUBA *et al.*, 2021).

Figura 22 – Remoção da tartrazina em função do pH da solução



Fonte: Cuba *et al.* (2021)

Segundo Callegari e Capadoglio (2018), o valor estimado para o biocarvão proveniente do lodo de esgoto é em torno de US\$ 246/tonelada, cerca de R\$ 1.264,45/tonelada. Em comparação com o custo do carvão ativado, que é comercializado a um valor de US\$ 1.500/tonelada, aproximadamente R\$ 7.710/tonelada, conclui-se que o biocarvão de lodo de esgoto é economicamente mais viável, com um custo seis vezes inferior.

### 5.3 CASCAS DE COCO VERDE VERSUS FINOS DE CARVÃO (MADEIRA)

Ribeiro (2016) comparou os resultados obtidos para o biocarvão proveniente de cascas de coco verde com aqueles obtidos para o biocarvão produzido por finos de carvão. Verificou-se que o biocarvão de coco verde apresentou maior compactação do material filtrante, bem como uma saturação mais rápida quando comparado ao biocarvão de finos de carvão. Essas diferenças podem ser justificadas pelo fato de o biocarvão de coco verde conter maior quantidade de partículas finas, o que influenciou na velocidade do fluxo através do material, que foi em torno de seis vezes maior que o ensaio de filtração mais duradouro utilizando o biocarvão de madeira. Na Figura 23 é possível observar a diferença os biocarvões produzidos.

Figura 23 – Biocarvão de finos de carvão (madeira) e biocarvão de coco verde

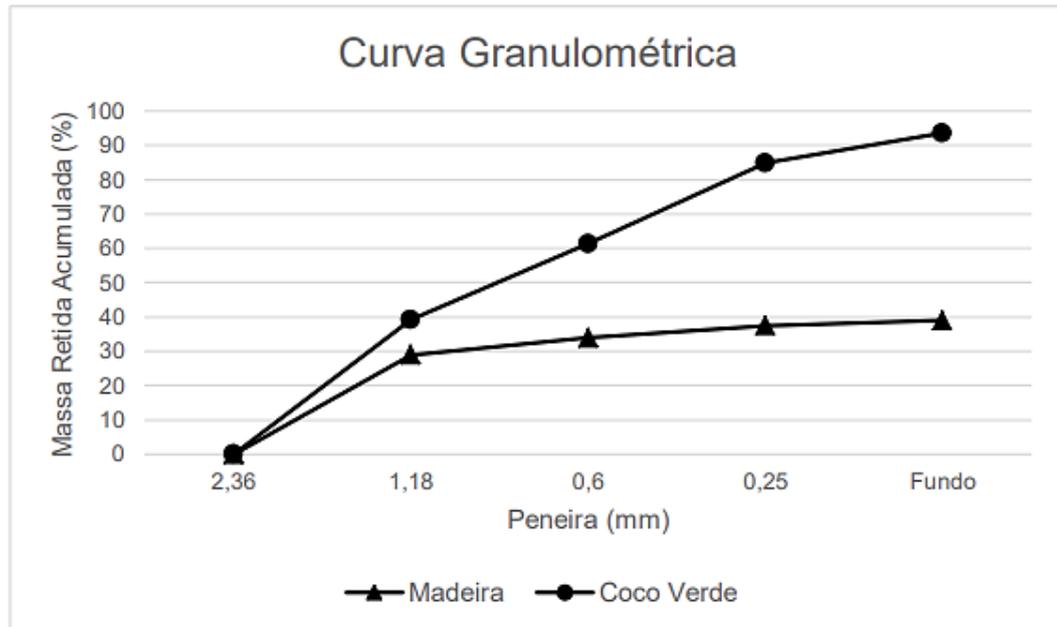


Fonte: Ribeiro (2016)

Após o processo de moagem, ambos os biocarvões foram peneirados em peneira de malha de 2 mm. Na peneira de 2,36 mm não houve acúmulo de material em nenhum dos casos. A Figura 24 apresenta a curva granulométrica correspondente a cada tipo de biocarvão e é possível notar que o diâmetro da peneira influencia diretamente na deposição de material do

biocarvão de coco verde, uma vez que, quanto menor o diâmetro (de 1,18 a 0,25 mm), maior é o acúmulo de partículas. Nota-se que a maior quantidade de partículas é removida na peneira de 0,25 mm (RIBEIRO, 2016).

Figura 24 – Curva granulométricas dos biocarvão de madeira e coco verde



Fonte: Ribeiro (2016)

Pela análise granulométrica, Ribeiro (2016) constatou que o biocarvão derivado das cascas de coco verde contém partículas com dimensões menores em comparação ao biocarvão de finos de carvão. De acordo com Olhero e Ferreira (2004), o biocarvão de coco verde possui taxas de deformação menores que as do biocarvão de madeira. Além disso, quanto mais partículas finas o biocarvão apresentar, maior será a viscosidade das suspensões, resultando em menor taxa de deformação em relação às suspensões de partículas grossas. Consequentemente, o biocarvão de coco verde obstaculiza a passagem do efluente pela formação de flocos e/ou pela compactação que retém os sólidos presentes no esgoto bruto. Esses sólidos tendem a colaborar com a aceleração da saturação do meio filtrante.

Em relação à demanda química de oxigênio (DQO), o biocarvão de madeira apresentou a maior eficiência de remoção (71%) em 19 minutos. Em contrapartida, o biocarvão de coco verde apresentou eficiência inferior quando comparado ao de madeira, pois a remoção máxima de DQO foi de apenas 26% após 5 horas. Isso ocorreu devido ao arraste de partículas finas do biocarvão juntamente com o filtrado, resultando no aumento dos valores de DQO. Além disso, o biocarvão de madeira também apresentou elevadas eficiências de remoção de nitrogênio total (100%), fósforo (69,6%), sólidos fixos (81,6%), sólidos totais (83,5%) e sólidos voláteis (96%).

O biocarvão de coco verde também apresentou 100% de eficiência de remoção de nitrogênio total, mas não foi eficiente na remoção de fósforo e de sólidos fixos e as eficiências máximas de remoção de sólidos totais e sólidos voláteis foram 47,4% e 51,6%, respectivamente. Portanto, o biocarvão de finos de carvão foi o que apresentou maior eficiência na remoção dos parâmetros analisados no esgoto sanitário (RIBEIRO, 2016).

#### 5.4 ANÁLISE DOS ESTUDOS

A partir da revisão dos estudos analisados no tópico 5.2, que explora diferentes fontes de biomassa utilizadas na produção de biocarvão com foco na sua aplicabilidade na remoção de metais, corantes e outros contaminantes presentes em águas residuais, constatou-se que o biocarvão constitui uma alternativa potencialmente eficaz e sustentável. Os estudos apontam que o aumento da temperatura tende a favorecer o processo de adsorção, uma vez que aumenta a porosidade e a área superficial. Em geral, o modelo de adsorção de Langmuir e o modelo cinético de pseudo-segunda ordem foram os que melhor se ajustaram aos dados obtidos nos experimentos, sugerindo que o processo ocorre predominantemente por quimissorção.

Analisando o estudo de Carvalho *et al.* (2021), que utiliza o bagaço de laranja para a produção de biocarvão, nota-se que o tempo de equilíbrio para a remoção de tetraciclina em água residual foi alcançado em oito minutos. O uso de biocarvão apresentou uma capacidade de adsorção de 100% do fármaco livre. Além disso, observou-se a probabilidade de regeneração, sendo factível o reuso do adsorvente. O estudo de Krebs (2014) utilizando a serragem como biomassa para a obtenção do biocarvão constatou que o aumento da temperatura melhora as características do material, aumentando o número de carbono disponível e a área superficial.

O estudo de Ribeiro (2016) trouxe o comparativo entre o uso da biomassa de coco verde e de finos de carvão (derivado da madeira), sendo um estudo de grande relevância para comprovar a necessidade de se avaliar a matéria-prima mais adequada para a produção de biocarvão, de acordo com os resultados esperados. Portanto, embora o uso de biocarvão seja reconhecido, de forma geral, como uma opção viável do ponto de vista econômico e ambiental, deve-se estudar a biomassa mais adequada e/ou as melhores condições de pirólise para a finalidade pretendida. No caso do estudo de Ribeiro (2016), a biomassa de madeira foi a mais adequada para a remoção de matéria orgânica, fósforo, sólidos totais fixos e voláteis, e nitrogênio presentes no esgoto sanitário, com uma eficiência de 71% na remoção de DQO em 19 minutos, comparada à eficiência de 26% do biocarvão de coco verde em 5 horas.

O uso de biocarvão de lodo biológico para a remoção de tartrazina em efluentes, estudado por Cuba *et al.* (2021), indicou que o pH influencia na remoção do corante, sendo a faixa de pH entre 3 e 4 a mais eficiente. Além disso, o estudo apresentou uma rápida adsorção, com 46% de remoção em cerca de 45 minutos. Por fim, no que tange ao uso de grafeno na produção de biocarvão, os resultados obtidos por Fang *et al.* (2020) foram promissores, apontando uma ótima capacidade de sorção de poluentes inorgânicos em comparação com o biocarvão bruto e sugerindo, ainda, a possibilidade de reciclagem do biocarvão produzido por grafeno.

O Quadro 4 apresenta as diferentes condições de pirólise utilizadas nos estudos avaliados. De modo geral, apesar de se tratarem de biomassas diferentes, foi possível notar em todos os experimentos que o aumento da temperatura influenciou consideravelmente os resultados. Como já discutido, o aumento da temperatura é diretamente proporcional ao aumento da condutividade elétrica, do pH, da quantidade de carbono disponível e do potencial energético. Assim, é importante considerar a finalidade do uso do biocarvão para identificar a faixa de temperatura adequada. Por exemplo, se o intuito é remover fármaco livre em água residuária usando biocarvão de bagaço de laranja, recomenda-se temperaturas em torno de 500 °C para aumentar a condutividade elétrica, que colabora na remoção desse contaminante. Porém, se o biocarvão de lodo for utilizado para remover tartrazina em efluentes, recomenda-se temperaturas em torno de 105 °C, uma vez que a remoção de tartrazina é mais eficiente em pH mais baixo.

Quadro 4 – Condições de pirólise de cada estudo analisado

Biomassa	Produção	Condições de Pirólise										Tempo de Equilíbrio (min)		
		Temperatura 1 (°C)	Tempo 1 (min)	Temperatura 2 (°C)	Tempo 2 (min)	Temperatura 3 (°C)	Tempo 3 (min)	Temperatura 4 (°C)	Tempo 4 (min)	Temperatura 5 (°C)	Tempo 5 (min)		Modelo Cinético	
Bagaço de Laranja	18 milhões ton/ano	300	35	500	28	N/C	N/C	N/C	N/C	N/C	N/C	N/C	pseudo-segunda ordem	8
Cascas de coco verde	2 bilhões de fruto/ano	400	N/C	500	N/C	N/C	N/C	N/C	N/C	N/C	N/C	N/C	N/C	N/C
Folhas de amendoieira-da-praia	-	25	30	180	30	240	30	350	30	600	60	60	pseudo-segunda ordem	240
Serragem	71 milhões de pallets de madeira/ano	420	N/C	520	N/C	620	N/C	N/C	N/C	N/C	N/C	N/C	N/C	N/C
Finos de carvão (madeira)	158 milhões de m <sup>3</sup> de resíduos florestais	400	120	600	120	800	120	N/C	N/C	N/C	N/C	N/C	N/C	N/C
Lodo	220 mil toneladas de lodo/ano	250	60	105	60	N/C	N/C	N/C	N/C	N/C	N/C	N/C	-	120

N/C: Não consta nos estudos

Fonte: elaborado pela autora

O Quadro 5 resume as principais informações dos estudos analisados para facilitar a comparação entre as diferentes biomassas e os resultados obtidos com o uso de cada biocarvão. Apesar de cada estudo ter um objetivo de análise específico, utilizando diferentes procedimentos experimentais, materiais e parâmetros, todos apresentaram uma ótima eficiência na utilização de biocarvão com diferentes fontes de biomassa para a remoção de substâncias indesejáveis em águas contaminadas ou no esgoto sanitário. Alguns desses estudos também avaliaram a possibilidade do reuso do adsorvente, o que reforça o papel sustentável do biocarvão no tratamento de águas residuais e seu potencial competitivo frente ao carvão ativado comumente utilizado para o mesmo propósito.

Quadro 5 – Resumo dos principais resultados dos estudos analisados na revisão de literatura

(continua)

<b>Estudos</b>	<b>Biomassa</b>	<b>Objetivo</b>	<b>Experimento</b>	<b>Principais Resultados</b>
Carvalho <i>et al.</i> (2021)	Bagaço de laranja	Avaliar a remoção de tetraciclina em efluentes	Ensaio de bancada para a remoção de tetraciclina (fármaco livre)	A eficiência de remoção da tetraciclina aumentou proporcionalmente à massa de biocarvão e à temperatura. O biocarvão apresentou probabilidade de regeneração, capacidade de adsorção de 100% do fármaco e eficiência de filtração 25% maior que a do carvão comercial.
Ribeiro (2016)	Cascas de coco verde	Avaliação da viabilidade do uso do biocarvão no tratamento de esgoto sanitário	Ensaio de filtração para análise da remoção de DQO, nitrogênio, fósforo, sólidos totais fixos e voláteis	O biocarvão foi eficiente na remoção de nitrogênio total, porém não foi eficiente na remoção dos demais parâmetros analisados por ter ocorrido o arraste das partículas finas junto ao filtrado.
Ribeiro (2016)	Finos de carvão	Avaliação da viabilidade do uso do biocarvão no tratamento de esgoto sanitário	Ensaio de filtração para análise da remoção de DQO, nitrogênio, fósforo, sólidos totais fixos e voláteis	O biocarvão obteve ótimos resultados de eficiência de remoção para todos os parâmetros analisados.
Silveira (2018)	Casca de coco verde	Análise da viabilidade da pirólise no aproveitamento da biomassa residual do coco para a produção de bioóleo, biogás e biocarvão.	Coleta de amostras da biomassa, trituração dos resíduos e processo de pirólise (reator tubular) para a obtenção de bio-óleo, biogás e biocarvão.	Ao aumentar a temperatura de pirólise de 400°C para 600°C houve o aumento do pH do biocarvão, indicando que seu uso é promissor para a correção da acidez de solos intemperizados em regiões tropicais.
Souza <i>et al.</i> (2021)	Folhas de amendoeira-da-praia	Avaliação das propriedades físico-químicas do uso do biocarvão proveniente de folhas de amendoeira-da-praia no processo de adsorção de metais em solução aquosa.	A biomassa foi produzida em uma atmosfera de gás carbônico em diferentes temperaturas. A análise das propriedades físico-químicas foi realizada por experimentos em batelada com um coquetel contendo radiotraçadores, cuja atividade foi determinada por espectrometria gama.	Foi analisado que no intervalo entre 3,8 e 8,1 de pH, os valores de eficiência ficaram em torno de 80%, indicando que o biocarvão produzido é favorável para a remoção de metais em solução aquosa, uma vez que as águas em ambientes naturais se encontram nessa faixa de pH.

Quadro 5 – Resumo dos principais resultados dos estudos analisados na revisão de literatura

(conclusão)

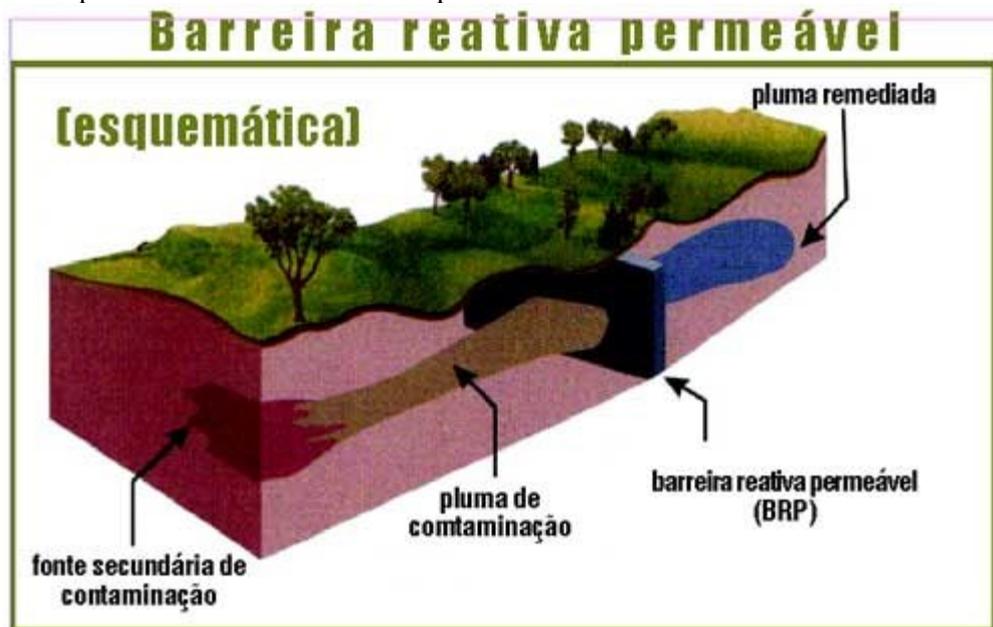
<b>Estudos</b>	<b>Biomassa</b>	<b>Objetivo</b>	<b>Experimento</b>	<b>Principais Resultados</b>
Magnano <i>et al.</i> (2018)	Fruto da amendoeira	Avaliação do uso do biocarvão proveniente do fruto da amendoeira para a remoção de cromo hexavalente em soluções aquosas.	Método da pirólise (forno tubular com injeção de N <sub>2</sub> ) e análise da cinética.	A máxima remoção de cromo hexavalente ocorreu no tempo de equilíbrio de 240 min. O modelo de pseudo-segunda ordem apresentou melhor correlação com os dados experimentais, indicando que o processo ocorre por quimissorção.
Krebs (2014)	Serragem	Análise da influência da temperatura nas propriedades físico-químicas do biocarvão pelo processo de pirólise rápida de serragem.	A biomassa de serragem foi submetida ao processo de pirólise a temperaturas de 420 °C, 520 °C e 620 °C. Foi utilizada uma planta laboratorial utilizando o nitrogênio como gás de arraste. O leito do reator foi composto de areia e um ciclone foi adicionado na saída para a coleta do biocarvão. A área superficial do biocarvão foi quantificada pelo método Brunauer-Emmett-Teller (BET).	A temperatura interfere nas propriedades do biocarvão, havendo um aumento significativo da área superficial com o aumento da temperatura, porém houve a perda de grupos funcionais que são importantes dependendo da aplicação futura do biocarvão.
Delatorre <i>et al.</i> (2020)	Finos de carvão vegetal	Análise do uso de finos de carvão vegetal para fins energéticos sob diferentes condições de temperatura.	Processo de pirólise rápida a temperaturas de 400 °C, 600 °C e 800 °C, a uma taxa de aquecimento de 10 °C min <sup>-1</sup> e tempo de permanência de 120 min.	O aumento da temperatura aumentou o potencial energético do biocarvão, pois houve o aumento da densidade energética e dos percentuais de carbono fixo.
Cuba <i>et al.</i> (2021)	Lodo anaeróbio	Avaliação do uso do biocarvão proveniente de lodo anaeróbio para a remoção de tartrazina em um sistema de efluentes.	O experimento envolveu a produção e ativação do biocarvão de lodo, sua caracterização, e ensaio de adsorção com tartrazina e biocarvão, considerando diferentes faixas de pH.	A alteração do pH da solução da faixa de 3-4 para a de 11-12 fez com que a porcentagem média de remoção de tartrazina fosse reduzida de 99% para 56%

Fonte: elaborado pela autora

## 5.5 IMPACTOS AMBIENTAIS E ECONÔMICOS

O biocarvão pode ser considerado um adsorvente escalável e promissor para ser utilizado em escala industrial e na remediação ambiental, uma vez que sua produção é mais simples e apresenta menor custo quando comparado ao carvão ativado. Um exemplo da aplicabilidade em larga escala é o desenvolvimento de barreiras permeáveis reativas constituídas principalmente por biocarvão (Figura 25) e utilizadas para o tratamento de águas subterrâneas e superficiais contaminadas (GWENZI *et al.*, 2015).

Figura 25 – Esquema de uma barreira reativa permeável



Fonte: Nobre e Nobre (2003)

Atualmente, em torno de 95% a 97% da bioenergia mundial é produzida através da combustão direta de biomassa. Estudos avaliam o aumento em larga escala da combustão de combustíveis fósseis sólidos (como turfa, carvão e petróleo coque), da biomassa natural e sua co-combustão com semi-biomassa. Em muitos países, esse aumento tende a ser um dos principais fatores para a progressão do uso dos biocombustíveis nos próximos anos (VASSILEV *et al.*, 2015). Um ponto relevante a respeito da vantagem de se utilizar a biomassa está associada à sua natureza renovável, o que possibilita o aproveitamento do gás carbônico emitido para o cultivo da próxima geração de biomassa por meio do ciclo da fotossíntese (FARRET, 2014).

Quando comparado com o carvão ativado comercialmente utilizado, os resíduos de origem agrícola e de vegetais lenhosos provenientes de madeira, assim como o lodo de Estações de Tratamento de Esgoto (ETE), apresentam melhores viabilidades econômicas. Isso porque o carvão ativado custa cerca de R\$ 7.000/tonelada, equivalente a R\$ 7,00/kg, enquanto a serragem custa em torno de R\$ 5,00/kg, o biocarvão de coco verde tem um custo de cerca de R\$ 0,50/kg e o biocarvão proveniente do lodo de esgoto custa aproximadamente R\$ 1,26/kg.

Nesse contexto, o biocarvão pode desempenhar um papel fundamental na resolução de diversas questões, incluindo a melhoria da qualidade do solo, o tratamento de águas residuárias e a captura de carbono. Sua aplicação é considerada eficaz e de baixo custo, o que tende a atrair o interesse do setor. Além de colaborar com as questões ambientais, o biocarvão também é uma alternativa de uso de matéria-prima, uma vez que a cultura e o solo explorados variam de acordo com o material escolhido, pois a economia é influenciada pela flutuação do preço do petróleo. Portanto, o biocarvão colabora para a preservação do meio ambiente e também para a gestão de resíduos sólidos (ZHENG *et al.*, 2010).

## 6 CONCLUSÃO

Este trabalho teve como objetivo avaliar o uso de biocarvões provenientes de diferentes fontes de resíduos de biomassas, incluindo resíduos agrícolas, vegetais lenhosos e lodo, e sua aplicabilidade na remoção de contaminantes em águas residuárias, através de uma revisão crítica de literatura. Concluiu-se que o uso do biocarvão é uma alternativa promissora para o tratamento de esgotos sanitários, uma vez que os estudos analisados apresentaram boas eficiências de remoção de contaminantes em águas residuárias. Além disso, o uso do biocarvão apresenta custos inferiores em comparação a outras alternativas e pode ser aplicado por meio de sistemas simplificados. Sua aplicabilidade também pode ser interessante para contribuir com o tratamento de esgotos no Brasil, que apresenta déficits no setor de saneamento básico, especialmente no que diz respeito à coleta e tratamento adequado dos esgotos em todo o território nacional, com destaque para algumas regiões como norte e nordeste. Essa problemática atinge principalmente as pessoas que vivem em extrema pobreza e possuem menores oportunidades, sendo necessária a criação de políticas públicas que colaborem para reverter essa situação.

Além disso, o biocarvão pode ser proveniente de resíduos de biomassa que prejudicam o meio ambiente caso não sejam descartadas adequadamente. Com isso, este trabalho analisou os resíduos de biomassa que são abrangentes no Brasil, sendo eles bagaço de laranja, cascas de coco verde, folhas de amendoeira-da-praia, serragem, finos de carvão e lodos de ETE. Concluiu-se que, apesar de não serem amplamente utilizados no tratamento de águas residuárias e como geradores de energia, os biocarvões tendem a ser uma opção futura de aplicação, principalmente porque o uso de biomassa na matriz energética tem crescido anualmente em muitas regiões do mundo. Vale ressaltar que, dentre os 17 ODSs, três estão diretamente relacionados às questões de saneamento básico (ODS 6, 11 e 14). Ademais, há uma tendência de maior conscientização da população, que tende a optar cada vez mais pelo uso de energias renováveis.

Como sugestão para a continuação do estudo, recomenda-se avaliar o uso do biocarvão no estado de São Paulo, analisando qual resíduo de biomassa teria maior potencial para ser utilizado, quais os custos para essa implementação e qual seria a eficiência na remoção de contaminantes específicos.

## REFERÊNCIAS

- ABDUL, G.; ZHU, X.; CHEN, B. Structural Characteristics of Biochar-Graphene Nanosheet Composites and Their Adsorption Performance for Phthalic Acid Esters. **Chemical Engineering Journal**, v. 319, p. 9–20, jul. 2017.
- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 9648: Estudo de concepção de sistemas de esgoto sanitário**. Rio de Janeiro: ABNT, 1986.
- ALMEIDA, R. G. D. Aspectos legais para a água de reúso. **Revista Vértices**, v. 13, n. 2, p. 31–43, 2011. Disponível em: <http://www.gnresearch.org/doi/10.5935/1809-2667.20110012>. Acesso em: 25 fev. 2023.
- ALMEIDA, W. M. S. **Estudo do balanço energético do processo de pirólise de lodo de esgoto em escala laboratorial**. Dissertação (Mestrado em Agroenergia) – Universidade Federal do Tocantins, Palmas, 2019.
- ANA – Agência Nacional de Águas. **Atlas Esgotos: Despoluição de Bacias Hidrográficas**. Brasília, 2017. Disponível em: <http://atlasesgotos.ana.gov.br/>. Acesso em: 20 jan. 2023.
- ANDRADE, R. S.; CARVALHO JÚNIOR, J. I. T.; SILVA, M. I.; LIMA, I. S.; NASCIMENTO, A. Produção e Caracterização de biocarvão de diferentes resíduos orgânicos. *In: III REUNIÃO NORDESTINA DE CIÊNCIA DO SOLO*, 2016, Aracaju. Anais [...] Aracaju, 2016.
- ARAGÃO, W. M. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Coco: Pós-colheita. Série Frutas do Brasil**. Brasília: EMBRAPA Informação Tecnológica, 2002.
- ARAMI, M.; LIMAE, N. Y.; MAHMOODI, N. M.; TABRIZI, N. S. Removal of Dyes from Colored Textile Wastewater by Orange Peel Adsorbent: Equilibrium and Kinetic Studies. **Journal of Colloid and Interface Science**, v. 288, n. 2, p. 371–376, 15 ago. 2005.
- ATKINS, P.W. **Físico-Química**. Vol. 3. 7ª ed. Rio de Janeiro: LTC Editora, 2004. 159 p.
- BAMPIDIS, V. A.; ROBINSON, P. H. Citrus By-Products as Ruminant Feeds: A Review. **Animal Feed Science and Technology**, v. 128, n. 3, p. 175–217, 28 jun. 2006.
- BARRETO, M. **Adsorção de metais em biocarvão: uma revisão de estudos envolvendo o uso de radiotraçadores**. 2018. Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado em Química Industrial) – Universidade Federal Fluminense, Niterói, 2018.
- BASU, P. **Biomass Gasification and Pyrolysis: Practical Design and Theory**. Boston: Academic Press, 2010.
- BERNARDINI, L.; MELO, A. R.; CAMPOS, D. de P.; NEVES, J. da R. S. das; COELHO, J. L.; FARACO, M. N. S. **Valorização dos finos de carvão vegetal no desenvolvimento de frita cerâmica para formulação de engobe**. *Ceram. Ind.*, vol. 25, n. 1, p. 43-60, 2020.
- BIAGINI, E.; NARDUCCI, P.; TOGNOTTI, L. Size and structural characterization of lignin-cellulosic fuels after the rapid devolatilization. **Fuel**, v. 87, n. 2, p. 177-186, 2008.

BOMAN, B. C.; FORSBERG, A. B.; JÄRVHOLM, B. G. Adverse health effects from ambient air pollution in relation to residential wood combustion in modern society. **Scandinavian journal of work, environment & health**, p. 251-260, 2003.

BORBA, C. **Amendoeira da praia**. Flickr, 26 de agosto de 2014. Disponível em: <https://www.flickr.com/photos/108296684@N04/14857778057>. Acesso em: 08 ago. 2023.

BOROWSKI, H. C., SILVEIRA, J. L., EBINUMA, C. D., FERREIRA, E. D. Análise de um modelo de co-geração a partir de resíduos sólidos urbanos. **Revista de Tecnologia**, v. 23, n. 1, p. 26-27, dez. 2002.

BRASIL. **Lei nº 11.445 de 5 de janeiro de 2007**. Estabelece as diretrizes nacionais para o saneamento básico. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 2007. Disponível em: [https://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_ato2007-2010/2007/lei/111445.htm](https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2007/lei/111445.htm). Acesso em: 25 fev. 2023.

BRASIL. **Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010**. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei nº 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 2010. Disponível em: [https://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_ato2007-2010/2010/lei/112305.htm](https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/112305.htm). Acesso em: 25 fev. 2023.

BRASIL. Ministério do Desenvolvimento Regional. Secretaria Nacional de Saneamento (SNS). **Panorama do Saneamento Básico no Brasil**. 2021. Brasília: SNS, 2021. Disponível em: [http://antigo.snis.gov.br/downloads/panorama/PANORAMA\\_DO\\_SANEAMENTO\\_BASIC\\_O\\_NO\\_BRASIL\\_SNIS\\_2021.pdf](http://antigo.snis.gov.br/downloads/panorama/PANORAMA_DO_SANEAMENTO_BASIC_O_NO_BRASIL_SNIS_2021.pdf). Acesso em: 25 fev. 2023.

BURÉS, S. **Sustratos**. Madrid: Ediciones Agrotécnicas, 1997. 341 p.

CALLEGARI, A.; CAPODAGLIO, A. G. Properties and beneficial uses of (bio) chars, with special attention to products from sewage sludge pyrolysis. **Resources**, v. 7, n. 1, p. 20, 2018.

CAMPOS, J. R (coord.). **Tratamentos de Esgotos Sanitários por Processos Anaeróbios e Disposição Controlada no Solo**. Projeto PROSAB. 1 Ed. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental (ABES), 1999.

CARVALHO, N. L.; HENTZ, P.; SILVA, J. M.; BARCELLOS, A. L. Reutilização de águas residuárias. **Revista Monografias Ambientais**, p. 3164–3171, 14 mar. 2014.

CARVALHO, R. S. de; ARGUELHO, M. de L. P. de M.; FACCIOLI, G. G.; OLIVEIRA, R. A. de; PASSOS, E. S.; SILVA, A. V.; SANTOS, B. F. S. dos. Utilização do biocarvão de bagaço de laranja na remoção de tetraciclina em água residuária. **Matéria (Rio de Janeiro)**, v. 26, 24 maio 2021.

CASTANHETI, F. **A Falta de Sistemas de Tratamento de Esgoto Doméstico em Zona Rural e suas Consequências**. 2017. Monografia (Especialização em Direito Ambiental) – Universidade do Sul de Santa Catarina, Itajaí, 2017.

CASTRO, V. E. M. **Avaliação de estratégias para a gaseificação de resíduos de biomassa conforme aspectos logísticos e tecnológicos**. 2020. Dissertação (Mestrado em Planejamento Energético) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2020.

CETESB – Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. **Águas Interiores: Tipos de águas.** Informações Básicas. 2023. Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br/aguas-interiores/informacoes-basicas/tpos-de-agua/>. Acesso em: 14 jan. 2023.

CHEN, T.; ZHANG, Y.; WANG, H.; LU, W.; ZHOU, Z.; ZHANG, Y.; REN, L. Influence of Pyrolysis Temperature on Characteristics and Heavy Metal Adsorptive Performance of Biochar Derived from Municipal Sewage Sludge. **Bioresource Technology**, v. 164, p. 47–54, 1 jul. 2014.

CHIA, C. H.; DOWNIE, A.; MUNROE, P. Characteristics of biochar: physical and structural properties. *In*: LEHMANN, J.; JOSEPH, S. (eds.). **Biochar for Environmental Management: Science, Technology and Implementation**. 2nd ed. London: Routledge, 2015.

CLEMENTINO, F. de S.; SANTIAGO, J. M.; SOUSA, H. F. de; CONCEIÇÃO, I. G. C. da; SANTOS, H. C. dos. Uso de concreto permeável com aditivos no tratamento de águas residuárias, com enfoque no biocarvão: uma revisão. **Research, Society and Development**, v. 10, n. 10, p. e562101019111–e562101019111, 19 ago. 2021.

CORRÊA, P. C.; A. JÚNIOR, P. C.; RIBEIRO, D. M.; SILVA, F. S. da. Equilíbrio higroscópico de milho, alpiste e painço: obtenção e modelagem. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 10, p. 162–167, mar. 2006.

COSTA, V. R. Plásticos: a caminho da reciclagem. **Ciência Hoje**, v. 18, n. 107, p. 9-15, mar. 1995.

CUBA, R. M. F.; PAULA, B. M. de; VALE, G. B. do; BRAGA, T. C.; TERÁN, F. J. C. Biocarvão ativado produzido a partir de lodo anaeróbico de estação de tratamento de efluentes para remoção do corante tartrazina. **Matéria (Rio de Janeiro)**, v. 26, n. 4, 2021.

DELATORRE, F. M.; CUPERTINO, G. F. M.; JUNIOR, A. J. dos S.; SILVA, Á. M. da; JÚNIOR, A. F. D.; SILVEIRA, M. P. R. Insights acerca do uso de finos de carvão vegetal para geração de bioenergia. **Agropecuária científica no semiárido**, v. 16, n. 3, p. 138–144, 28 dez. 2020.

DESSBESELL, L. **Viabilidade Econômica do Aproveitamento Energético da Serragem na Bacia Hidrográfica do Rio Pardo**. 2014. Dissertação (Mestrado em Recursos Florestais e Engenharia Florestal) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2014.

EDUCABRAS. **Angiospermas**. EducaBras, 2023. Disponível em: <https://www.educabras.com/aula/angiospermas>. Acesso em: 09 ago. 2023.

ESPINDOLA, J. da S. **Desenvolvimento de catalisadores a base de HZSM-5 modificada por metais para o processo de pirólise rápida**. 2014. Tese (Doutorado em Engenharia Química) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2014.

FANG, Z.; GAO, Y.; BOLAN, N.; SHAHEEN, S. M.; XU, S.; WU, X.; XU, X.; HU, H.; LIN, J.; ZHANG, F.; LI, J.; RINKLEBE, J.; WANG, H. Conversion of Biological Solid Waste to Graphene-Containing Biochar for Water Remediation: A Critical Review. **Chemical Engineering Journal**, v. 390, p. 124611, 15 jun. 2020.

FAO – Food and Agriculture Organization of the United Nations. **Report of the FAO high level expert consultation on coconut sector development in Asia and the Pacific**. *In*: FAO-

APCC High Level Expert Consultation on “Coconut Sector Development in Asia – Pacific Region”, 2013, Bangkok, Thailand. Bangkok: FAO, 2014. Disponível em: <http://www.fao.org/fileadmin/templates/rap/files/meetings/2013/Coconut.pdf>. Acesso em: 26 fev. 2023.

FARRET, F. A. **Aproveitamento de pequenas fontes de energia elétrica**. 3ª ed. Santa Maria: Editora UFSM, 2014.

FEAM – Fundação Estadual do Meio Ambiente. Diretoria de Pesquisa e Desenvolvimento. Gerência de Energia e Mudanças Climáticas. **Aproveitamento energético de resíduos sólidos urbanos: Guia de orientações para governos municipais de Minas Gerais**. Belo Horizonte: FEAM, 2012. 163 p.

FEITOSA, A. A.; TEIXEIRA, W. G.; RITTER, E.; REZENDE, F. A. de; KERN, J. Caracterização química de amostras de biocarvão de casca de banana e bagaço de laranja carbonizados a 400 e 600°C. **Revista Virtual de Química**, v. 12, n. 4, p. 901-912, 2020.

FERREIRA, M. **Consumo Doméstico de Biomassa Lenhosa e Emissões Atmosféricas na Cidade de Bragança**. 2012. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Ambiental) – Escola Superior Agrária de Bragança, Bragança, 2012.

FIEMG LAB. **Desafio: redução da geração de finos na produção de carvão vegetal**. Gerdau Challenge FIEMG Lab 2022. 28 de jul. de 2022. Disponível em: [https://fiemglab.com.br/desafio\\_challenge/gerdau-challenge-reducao-da-geracao-de-finos-na-producao-de-carvao-vegetal/](https://fiemglab.com.br/desafio_challenge/gerdau-challenge-reducao-da-geracao-de-finos-na-producao-de-carvao-vegetal/). Acesso em 26 fev. 2023.

FIGUEIREDO, L. M. M. **O papel do Plano Nacional de Segurança Hídrica: a universalização do acesso a água no país, principalmente no Nordeste e Ceará**. 2020. Tese (Mestrado em Gestão e Políticas Públicas) – Fundação Getúlio Vargas, São Paulo, 2020.

FIORENTIN, L. D.; MENON, B. T.; ALVES, J. A.; DAVANTEL DE BARROS, S. T.; PEREIRA, N. C.; MOTTA LIMA, O. C. D.; MODENES, A. N. Análise da secagem do bagaço de laranja em camada fina utilizando modelos semi-teóricos e empíricos. **Engvista**, v. 14, n. 1, p.22-33, abril 2012.

FIORENTIN, L. D.; MENON, B. T.; BARROS, S. T. D. de; PEREIRA, N. C.; LIMA, O. C. da M.; MODENES, A. N. Isotermas de sorção do resíduo agroindustrial bagaço de laranja. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 14, p. 653–659, 2010.

GOLDEMBERG, J. Biomassa e energia. **Química Nova**, v. 32, p. 582–587, 2009.

GUEDES, C. L. B.; ADÃO, D. C.; QUESSADA, T. P.; BORSATO, D.; GALÃO, O. F.; DI MAURO, E.; PÉREZ, J. M. M.; ROCHA, J. D. Avaliação de biocombustível derivado do bio-óleo obtido por pirólise rápida de biomassa lignocelulósica como aditivo para gasolina. **Química Nova**, v. 33, p. 781–786, 2010.

GWENZI, W.; CHAUKURA, N.; MUKOME, F. N. D.; MACHADO, S.; NYAMASOKA, B. Biochar Production and Applications in Sub-Saharan Africa: Opportunities, Constraints, Risks and Uncertainties. **Journal of Environmental Management**, v. 150, p. 250–261, 1 mar. 2015.

GWENZI, W.; CHAUKURA, N.; NOUBACTEP, C.; MUKOME, F. N. D. Biochar-Based Water Treatment Systems as a Potential Low-Cost and Sustainable Technology for Clean Water Provision. **Journal of Environmental Management**, v. 197, p. 732–749, 15 jul. 2017.

HUANG, D.; WANG, X.; ZHANG, C.; ZENG, G.; PENG, Z.; ZHOU, J.; CHENG, M.; WANG, R.; HU, Z.; QIN, X. Sorptive Removal of Ionizable Antibiotic Sulfamethazine from Aqueous Solution by Graphene Oxide-Coated Biochar Nanocomposites: Influencing Factors and Mechanism. **Chemosphere**, v. 186, p. 414–421, 1 nov. 2017.

HUGGINS, T. M.; HAEGER, A.; BIFFINGER, J. C.; REN, Z. J. Granular Biochar Compared with Activated Carbon for Wastewater Treatment and Resource Recovery. **Water Research**, v. 94, p. 225–232, 1 maio 2016.

IVANI, S. de A.; SILVA, B. M. da S. e; OLIVEIRA, C. de; MÔRO, F. V. Morfologia de frutos, sementes e plântulas de castanheira (*Terminalia catappa* L. - COMBRETACEAE). **Revista Brasileira de Fruticultura**, v. 30, p. 517–522, jun. 2008.

IWAKI, G. P. **Tijolos ecológicos de solo cimento: alternativa sustentável à destinação do lodo gerado em estações de tratamento de esgotos**. Portal Saneamento Básico. Acervo Técnico, Esgoto. Novembro 7, 2018. Disponível em: <https://saneamentobasico.com.br/acervo-tecnico/tijolos-ecologicos-lodo-de-esgoto/>. Acesso em: 14 fev. 2023.

JIA, M.; WANG, F.; BIAN, Y.; STEDTFELD, R. D.; LIU, G.; YU, J.; JIANG, X. Sorption of Sulfamethazine to Biochars as Affected by Dissolved Organic Matters of Different Origin. **Bioresource Technology**, v. 248, n. Pt B, p. 36–43, jan. 2018.

JIANG, J.; ZHANG, L.; WANG, X.; HOLM, N.; RAJAGOPALAN, K.; CHEN, F.; MA, S. Highly Ordered Macroporous Woody Biochar with Ultra-High Carbon Content as Supercapacitor Electrodes. **Electrochimica Acta**, v. 113, p. 481–489, 15 dez. 2013.

JINDO, K.; MIZUMOTO, H.; SAWADA, Y.; SANCHEZ-MONEDERO, M. A.; SONOKI, T. Physical and Chemical Characterization of Biochars Derived from Different Agricultural Residues. **Biogeosciences**, v. 11, n. 23, p. 6613–6621, 1 dez. 2014.

KHIARI, B.; MARIAS, F.; ZAGROUBA, F.; VAXELAIRE, J. Analytical Study of the Pyrolysis Process in a Wastewater Treatment Pilot Station. **Desalination**, Desalination Strategies in South Mediterranean Countries. v. 167, p. 39–47, 15 ago. 2004.

KREBS, R. B. **Caracterização do biochar de pirólise rápida**. 2014. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Química) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2014.

LARA, L. Z. **Avaliação do potencial de produtos de compostagem de dejetos suínos e de biocarvão para a remoção do pesticida atrazina em meio aquoso**. 2018. Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Química Industrial) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2018.

LEHMANN, J.; JOSEPH, S. Biochar for Environmental Management: an introduction. *In*: LEHMANN, J.; JOSEPH, S. (eds.). **Biochar for Environmental Management: Science, Technology and Implementation**. 2nd ed. London: Routledge, 2015.

LEONETI, A. B.; PRADO, E. L. do; OLIVEIRA, S. V. W. B. de. Saneamento básico no Brasil: considerações sobre investimentos e sustentabilidade para o século XXI. **Revista de Administração Pública**, v. 45, p. 331–348, abr. 2011.

LI, H.; HU, J.; MENG, Y.; SU, J.; WANG, X. An Investigation into the Rapid Removal of Tetracycline Using Multilayered Graphene-Phase Biochar Derived from Waste Chicken Feather. **The Science of the Total Environment**, v. 603–604, p. 39–48, 15 dez. 2017.

LI, H.; HU, J.; WANG, X.; AN, L. Development of a Bio-Inspired Photo-Recyclable Feather Carbon Adsorbent towards Removal of Amoxicillin Residue in Aqueous Solutions. **Chemical Engineering Journal**, v. 373, p. 1380–1388, 1 out. 2019.

LIMA, A. F. de; FAGNANI, H. M. C.; SANTOS, W. L. F.; BARROS, M. A. S. D. de. Adsorção de azul de metileno em hidrocarvões de resíduos têxteis. **Matéria (Rio de Janeiro)**, v. 25, 11 dez. 2020.

LIPPEL. **O que é Biomassa: Saiba tudo sobre biomassa e como ela é utilizada para geração de energia**. Artigos Acadêmicos. 2022. Disponível em: <https://www.lippel.com.br/artigos-academicos/o-que-e-biomassa/>. Acesso em: 15 dez. 2022.

LONGARETTI, G.; MEIRA, J. A.; SGANDERLA, I. B.; MAGRO, J. D.; FIORI, M. A.; MELLO, J. M. M. de. Estudo da atividade metanogênica específica de diferentes lodos anaeróbios. **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, v. 24, p. 1139–1146, 20 dez. 2019.

LOPES SILVA, D. A.; DELAI, I.; DELGADO MONTES, M. L.; ROBERTO OMETTO, A. Life Cycle Assessment of the Sugarcane Bagasse Electricity Generation in Brazil. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 32, p. 532–547, 1 abr. 2014.

LUCON, I. M.; COSCIONE, A. R.; ANDRADE, C. A. de. Finos de carvão e biocarvão de casca de eucalipto - impacto na fertilidade de solos tropicais. *In: FERTBIO 2016* “Rumo aos novos desafios”. 16 a 20 de outubro de 2016, Goiânia. Embrapa, p. 1-3, 2016. Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/161323/1/2016RA-017.pdf>. Acesso em 26 fev. 2023.

MAGNAGO, T.; RAMOS, V. H. dos S.; SILVA, D. C.; MARQUES, J. J.; JESUS, E. de. Remoção de cromo hexavalente de soluções aquosas utilizando biochar obtido do fruto da amendoeira (*Terminalia catappa* Linn). *In: Congresso Técnico Científico da Engenharia e da Agronomia (CONTECC) 2018*, 21 a 24 de agosto de 2018, Alagoas, Maceió. Anais [...]. Alagoas, 2018.

MAIA, C. Produção de biocarvão a partir de diferentes fontes de biomassa. *In: IX Encontro Brasileiro de Substâncias Húmicas (EBSH)*, 3 a 7 de outubro de 2011, Aracaju, Sergipe. Anais [...]. Aracaju, p. 1-4, 2011. Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/43276/1/2011-ClaudiaM-EBSH-Producao.pdf>. Acesso em 26 fev. 2023.

MARQUES, M. R.; PAZ, D. D.; BATISTA, L. P. R.; BARBOSA, C. de O.; ARAÚJO, M. A. M.; MOREIRA-ARAÚJO, R. S. dos R. Composição física, físico-química, química, análise do teor de fenólicos totais e poder antioxidante in vitro de frutos de Castanhola (*Terminalia Catappa* Linn). **Food Science and Technology**, v. 32, n. 1, p. 209–213, mar. 2012.

MELO, H. C. de O.; CORDOVA, C. A. S. de. Análise da taxa de internações e da mortalidade pela amebíase no Brasil entre 2015 e 2021. **Facit Business and Technology Journal**, v. 2, n. 39, 31 out. 2022.

MME – Ministério de Minas e Energia. Empresa de Pesquisa Energética (EPE). **Nota Técnica PR 04/18: Potencial dos Recursos Energéticos no Horizonte 2050**. Rio de Janeiro: MME, EPE, 2018. Disponível em: [https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-227/topico-416/NT04%20PR\\_RecursoEnergeticos%202050.pdf](https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-227/topico-416/NT04%20PR_RecursoEnergeticos%202050.pdf). Acesso em 25 fev. 2023.

MORÉ, F. B.; OLIVEIRA, C. T. de; TOMASSONI, F.; TAVERES, J. M. R. A PRODUÇÃO DE BIOCHAR: um caminho para a circularidade. 2019. *In: XXI Encontro Internacional sobre Gestão Empresarial e Meio Ambiente – ENGEMA*, 4 a 6 de dezembro de 2019, São Paulo. Anais [...]. São Paulo, 2019.

MORELLO, M.; MORELLO, T. C de M.; MORELLO, M. C.; ADAME, L. F. do N.; MORELLO, M. C. Biomassa para produção de Energia Sustentável. **Revista Científica Multidisciplinar Núcleo do Conhecimento**. Ano 05, Ed. 10, Vol. 16, pp. 81-102. Outubro de 2020.

MRAD, R.; CHEHAB, G. Mechanical and Microstructure Properties of Biochar-Based Mortar: An Internal Curing Agent for PCC. **Sustainability**, v. 11, n. 9, p. 2491, jan. 2019.

NASCIMENTO, R. F. do; LIMA, A. C. A. de; VIDAL, C. B.; MELO, D. de Q.; RAULINO, G. S. C. **Adsorção: aspectos teóricos e aplicações ambientais**. Fortaleza: Imprensa Universitária da Universidade Federal do Ceará (UFC), 2014.

NERY, C. **Síntese de Indicadores Sociais: Extrema pobreza atinge 13,5 milhões de pessoas e chega ao maior nível em 7 anos**. Agência Notícias IBGE. 6 nov. 2019. Editoria: Estatísticas Sociais. Disponível em: <https://agenciadenoticias.ibge.gov.br/agencia-noticias/2012-agencia-de-noticias/noticias/25882-extrema-pobreza-atinge-13-5-milhoes-de-pessoas-e-chega-ao-maior-nivel-em-7-anos>. Acesso em: 15 jan. 2023.

NONES, D. L.; BRAND, M. A.; AMPESSAN, C. G. M.; FRIEDERICHS, G. Biomassa residual agrícola e florestal na produção de compactados para geração de energia. **Revista de Ciências Agroveterinárias**, v. 16, n. 2, p. 155–164, 13 jun. 2017.

OLHERO, S. M.; FERREIRA, J. M. F. Influence of particle size distribution on rheology and particle packing of silica-based suspensions. **Powder Technology**, v. 139, n. 1, p. 69-75, 2004.

OLIVEIRA, C. M. **Wood Pellets Brasil**. Edição eletrônica: Associação Brasileira de Indústrias de Biomassa e Energia, 2012. 53 p. Disponível em: <http://pt.calameo.com/read/00089539002c2bf637402>. Acesso em: 13 jan. 2023.

OSELAND. **Fundo da serragem**. Dreamstime: Fotos de Stock, 2023. Disponível em: <https://pt.dreamstime.com/imagens-de-stock-royalty-free-fundo-da-serragem-image15742209>. Acesso em: 09 ago. 2023.

PEDROZA, M. M. Bio-óleo e biogás da degradação termoquímica de lodo de esgoto doméstico em cilindro rotativo. 2011. 114 f. Tese (Doutorado em Química) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2011.

PIMENTA, H. C. D.; TORRES, F. R. M.; RODRIGUES, B. S.; ROCHA JÚNIOR, J. M. da. O esgoto: a importância do tratamento e as opções tecnológicas. *In: XXII Encontro Nacional de Engenharia de Produção (ENEGEP)*, 23 a 25 de outubro de 2002, Curitiba. Anais [...]. Curitiba: ABREPRO, 2002. p. 1 - 8. Disponível em: [https://abepro.org.br/biblioteca/ENEGEP2002\\_TR104\\_0458.pdf](https://abepro.org.br/biblioteca/ENEGEP2002_TR104_0458.pdf). Acesso em: 13 jan. 2023.

PIRES, M. A. P.; MATOS, W. R. de; PIRES, M. A. **Saneamento básico como instrumento necessário para garantir o direito fundamental à saúde pública nas cidades: necessidade de ampliação**. *Revista Jurídica UNIGRAN*. Dourados, v. 20, n. 39, p. 7-11, 2018.

QUIRINO, W. F.; VALE, A. T. do; ANDRADE, A. P. A. de; ABREU, V. L. S.; AZEVEDO, A. C. dos S. Poder calorífico da madeira e de materiais lignocelulósicos. *Revista da Madeira*, n. 89, p. 100-106, abr. 2005.

RIBEIRO, N. **Estudo do uso de biochar no tratamento de esgoto sanitário**. 2016. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Ambiental) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campo Mourão, 2016.

ROSA, M. F.; SANTOS, F. J. S.; MONTENEGRO, A. a. T.; ABREU, F. a. P.; CORREIA, D.; ARAUJO, F. B. S.; NOROES, E. R. V. **Caracterização do pó da casca de coco verde usado como substrato agrícola**. Comunicado Técnico (CNPAT). Fortaleza: Embrapa Agroindústria Tropical, 2001. Disponível em: <http://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/handle/doc/423156>. Acesso em: 26 fev. 2023.

RÓZ, A. L. da; RICARDO, J. F. C.; NAKASHIMA, G. T.; SANTOS, L. R. O.; YAMAJI, F. M. Maximização do teor de carbono fixo em biocarvão aplicado ao sequestro de carbono. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 19, p. 810–814, ago. 2015.

SABESP – Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo. **Coleta e Tratamento de Esgoto**. Site Sabesp. Disponível em: <https://site.sabesp.com.br/site/imprensa/explicacoes/esgotamento.aspx?secaoId=197>. Acesso em: 15 jan. 2023.

SANTANA, M. J. B.; FIALHO, L. L.; POGGERE, G.; MAGALHÃES, V. L. Influência da temperatura e da lavagem nas características de biocarvões de bagaço de cana-de-açúcar e de laranja. *In: 4º Congresso Sul-Americano de Resíduos Sólidos e Sustentabilidade (CONRESOL)*. 19 a 21 de maio de 2021, Gramado. Anais [...]. Gramado: IBEAS, 2021.

SCHMIDT, C. G. **Desenvolvimento de filtros de carvão ativado para remoção do cloro da água potável**. 2011. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Minas, Metalúrgica e Materiais) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.

SEBRAE – Serviço Brasileiro de Apoio às Micro e Pequenas Empresas. **Aquecimento por biomassa: mais sustentável e vantajoso**. Artigos de Finanças. Atualizado em 08/12/2022. Disponível em: <https://www.sebrae.com.br/sites/PortalSebrae/artigos/aquecimento-por-biomassa-mais-sustentavel-e-vantajoso,65ee147d84ea3810VgnVCM100000d701210aRCRD>. Acesso em: 18 jan. 2023.

SHANG, J.; GAO, J.; XI, J.; WANG, Y.; JI, F.; LI, R. Immobilization of Cr(VI) from Solution by a Graphene Oxide-NZVI/Biochar Composite. *Water Environment Research: A Research Publication of the Water Environment Federation*, v. 91, n. 7, p. 565–572, jul. 2019.

SIDRA – Sistema IBGE de Recuperação Automática. **Pesquisa Nacional de Saneamento Básico 2017**. 2017. Disponível em: <https://sidra.ibge.gov.br/pesquisa/pnsb/pnsb-2017>. Acesso em: 15 jan. 2023.

SILVA, A. C. da. Reaproveitamento da casca de coco verde. **Revista Monografias Ambientais**, p. 4077–4086, 18 dez. 2014.

SILVA, C. K. H. **Biocarvão: um potencial suporte para imobilização de lacase e aplicação na biotransformação de acetaminofeno**. 2022. Tese (Doutorado em Ciência dos Materiais) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2022.

SILVEIRA, A. J. da M. Viabilidade técnica da pirólise da biomassa do coco: produção de bioóleo, biocarvão e biogás. Dissertação (Mestrado em Energia da Biomassa). Universidade Federal de Alagoas, Rio Largo, 2018. 62 f.

SOARES, S. R. A.; BERNARDES, R. S.; CORDEIRO NETTO, O. de M. Relações entre saneamento, saúde pública e meio ambiente: elementos para formulação de um modelo de planejamento em saneamento. **Cadernos de Saúde Pública**, v. 18, p. 1713–1724, dez. 2002.

SODRÉ, G. A.; CORÁ, J. E.; SOUZA JÚNIOR, J. O. Caracterização física de substratos à base de serragem e recipientes para crescimento de mudas de cacaueteiro. **Revista Brasileira de Fruticultura**, v. 29, p. 339–344, ago. 2007.

SOPHIA A., C.; LIMA, E. C. Removal of Emerging Contaminants from the Environment by Adsorption. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, v. 150, p. 1–17, abr. 2018.

SOUSA, A. C. **Por uma política de saneamento básico: a evolução do setor do Brasil**. **Revista de Ciência Política**, vol. 30, 2006.

SOUZA, C. C. de; SUZUKI, K. N.; LATINI, R. M.; CANESIN, F. de P.; TEIXEIRA, A. M. R. de F.; BERNEDO, A. V. B. Estudo de propriedades físico-químicas na avaliação da adsorção em biocarvão produzido com folhas de amendoieira-da-praia. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 26, p. 171–179, 17 mar. 2021.

STUMM, W.; MORGAN, J. J. **Aquatic Chemistry: Chemical Equilibria and Rates in Natural Waters**. New York: John Wiley & Sons, 1996.

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**, v. 125, p. 70–85, 1 abr. 2015.

TANG, J.; LV, H.; GONG, Y.; HUANG, Y. Preparation and Characterization of a Novel Graphene/Biochar Composite for Aqueous Phenanthrene and Mercury Removal. **Bioresource Technology**, v. 196, p. 355–363, 1 nov. 2015.

TRAZZI, P. A.; HIGA, A. R.; DIECKOW, J.; MANGRICH, A. S.; HIGA, R. C. V. Biocarvão: realidade e potencial de uso no meio florestal. **Ciência Florestal**, v. 28, n. 2, p. 875–887, 29 jun. 2018.

TRIPODO, M. M.; LANUZZA, F.; MICALI, G.; COPPOLINO, R.; NUCITA, F. Citrus Waste Recovery: A New Environmentally Friendly Procedure to Obtain Animal Feed. **Bioresource Technology**, v. 91, n. 2, p. 111–115, 1 jan. 2004.

VASSILEV, S. V.; VASSILEVA, C. G.; VASSILEV, V. S. Advantages and Disadvantages of Composition and Properties of Biomass in Comparison with Coal: An Overview. **Fuel**, v. 158, p. 330–350, 15 out. 2015.

VELHO, F. C. de T. G. **Remoção de contaminantes emergentes no tratamento de água para o consumo humano por adsorção em carvões ativados**. 2012. Dissertação (Mestrado em Química) – Universidade de Évora, Évora, 2012.

VERHEIJEN, F.; JEFFERY, S. L.; BASTOS, A. C.; VAN, D. V. M.; DIAFAS, I. **Biochar Application to Soils - A Critical Scientific Review of Effects on Soil Properties, Processes and Functions**. Luxemburg: Office for Official Publications of the European Communities, 2010.

VIEIRA, G. E. G.; NUNES, A. P.; TEIXEIRA, L. F.; COLEN, A. G. N. Biomassa: uma visão dos processos de pirólise. **Revista Liberato**, v. 15, n. 24, p. 167–178, 23 dez. 2014.

VIRMOND, E.; **Aproveitamento do lodo de tratamento primário de efluentes de um frigorífico como fonte de energia**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Universidade Federal de Santa Catarina, Santa Catarina, 2007.

WARTCHOW, D. Serviços de abastecimento de água e de esgotamento sanitário. *In*: BRASIL. Secretaria Nacional de Saneamento. Ministério das Cidades (org.). **Lei Nacional de Saneamento Básico: perspectivas para as políticas e a gestão dos serviços públicos**. Brasília: Secretaria Nacional de Saneamento, 2009. p. 273-283.

WARTCHOW, D.; DARONCO, G. C. Municipal Sanitation Plans in Brazil as a Tool for Planning and Cooperation to Addressing the Millennium Development Goals. *In*: POVEDA, A. C.; MARTÍNEZ, C. I. P. (org.). **Health, Violence, Environment and Human Development in Developing Countries**. Nova York: Nova Science, 2014. p. 15-32.

WOOLF, D. **Biochar as a soil amendment: A review of the environmental implications**. Swansea University, School of the Environment and Society, 2008.

WOOLF, D.; AMONETTE, J. E.; STREET-PERROTT, F. A.; LEHMANN, J.; JOSEPH, S. Sustainable Biochar to Mitigate Global Climate Change. **Nature Communications**, v. 1, n. 1, p. 56, 10 ago. 2010.

WU, F.; LIU, W.; QIU, J.; LI, J.; ZHOU, W.; FANG, Y.; ZHANG, S.; LI, X. Enhanced Photocatalytic Degradation and Adsorption of Methylene Blue via TiO<sub>2</sub> Nanocrystals Supported on Graphene-like Bamboo Charcoal. **Applied Surface Science**, Graphene and C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>-based Photocatalysts. v. 358, p. 425–435, 15 dez. 2015.

XIAO, X.; CHEN, B. A Direct Observation of the Fine Aromatic Clusters and Molecular Structures of Biochars. **Environmental Science & Technology**, v. 51, n. 10, p. 5473–5482, 16 maio 2017.

YANG, H.; YAN, R.; CHEN, H.; LEE, D. H.; ZHENG, C. Characteristics of Hemicellulose, Cellulose and Lignin Pyrolysis. **Fuel**, v. 86, n. 12, p. 1781–1788, 1 ago. 2007.

ZHANG, F.; LI, Y.-H.; LI, J.-Y.; TANG, Z.-R.; XU, Y.-J. 3D Graphene-Based Gel Photocatalysts for Environmental Pollutants Degradation. **Environmental Pollution**, v. 253, p. 365–376, 1 out. 2019.

ZHANG, Y.; CAO, B.; ZHAO, L.; SUN, L.; GAO, Y.; LI, J.; YANG, F. Biochar-Supported Reduced Graphene Oxide Composite for Adsorption and Co-adsorption of Atrazine and Lead Ions. **Applied Surface Science**, v. 427, p. 147–155, 1 jan. 2018.

ZHANG, Y.; MA, Z.; ZHANG, Q.; WANG, J.; MA, Q.; YANG, Y.; LUO, X.; ZHANG, W. Comparison of the Physicochemical Characteristics of Bio-Char Pyrolyzed from Moso Bamboo and Rice Husk with Different Pyrolysis Temperatures. **BioResources**, v. 12, n. 3, p. 4652–4669, 9 maio 2017.

ZHENG, G.; KOZIŃSKI, J. A. Thermal Events Occurring during the Combustion of Biomass Residue. **Fuel**, v. 79, n. 2, p. 181–192, 1 jan. 2000.

ZHENG, W.; GUO, M.; CHOW, T.; BENNETT, D. N.; RAJAGOPALAN, N. Sorption Properties of Greenwaste Biochar for Two Triazine Pesticides. **Journal of Hazardous Materials**, v. 181, n. 1, p. 121–126, 15 set. 2010.

ZIELIŃSKA, A.; OLESZCZUK, P. Evaluation of Sewage Sludge and Slow Pyrolyzed Sewage Sludge-Derived Biochar for Adsorption of Phenanthrene and Pyrene. **Bioresource Technology**, v. 192, p. 618–626, set. 2015.