



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SERGIPE
PRÓ-REITORIA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL



USO DO BIOCARVÃO NO TRATAMENTO DE EFLUENTE DE REATOR UASB

Íkaro Damião Hora Sousa

São Cristóvão

2024

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SERGIPE
PRÓ-REITORIA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

USO DO BIOCARVÃO NO TRATAMENTO DE EFLUENTE DE REATOR UASB

Íkaro Damião Hora Sousa

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil como requisito à obtenção do título de MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL.

Orientador(a): Prof. Dra. Luciana Coêlho Mendonça

São Cristóvão

2024

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus por ter me dado forças e sabedoria para poder concluir essa etapa tão importante na minha vida acadêmica.

À minha família, em especial à minha mãe Áurea e à minha Avó Raimunda, pelo apoio desde o início desse mestrado me ajudando para conseguir os materiais para realização dessa pesquisa e me dando incentivos para não desistir dessa fase que foi muito difícil na minha vida.

À minha professora Luciana Coêlho Mendonça, pela orientação, apoio e persistência para que pudéssemos concluir essa pesquisa cheia de desafios desde o princípio. À professora Taísa por toda troca de conhecimento realizada e contribuição acerca da temática do biocarvão.

Aos professores Denise Michelan (PROEC), Eliana Midori (PPGQ), Roberta Menezes (CLQM), Michelline Freitas (DEC) e Daniel Lima (PROEC) pelas contribuições para realização dessa pesquisa.

Aos técnicos de Laboratórios, em especial à Tamires (SAMA) pela ajuda diária, Thiago e Wendel (Departamento de Engenharia Agrícola), Matheus (LAMCE), Jéssica (CLMDCEM) e Leina (Estação de Tratamento da UFS) pelo auxílio na construção dos filtros e na realização dos ensaios de laboratório.

Aos meus colegas de pesquisa Mellany, Thiago e Diego que foram excepcionais para a execução e conclusão desse projeto.

Por fim, agradeço a todos que contribuíram direta ou indiretamente para a realização desse trabalho. Enfim, Mestre em Engenharia Civil.

**FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CENTRAL
UNIVERSIDADE FEDERAL DE SERGIPE**

S725u Sousa, Íkaro Damião Hora
 Uso do biocarvão no tratamento de efluente de reator UASB /
 Íkaro Damião Hora Sousa ; orientadora Luciana Coêlho Mendonça.
 - São Cristóvão, 2024.
 115 f. : il.

 Dissertação (mestrado em Engenharia Civil) – Universidade
 Federal de Sergipe, 2024.

 1. Adsorção. 2. Biomassa. 3. Resíduos agrícolas. 4. Resíduos
 industriais. 5. Esgotos. I. Mendonça, Luciana Coêlho Orient. II.
 Título.

CDU 628.31



PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO
PROEC
EM ENGENHARIA CIVIL | UFS
UNIVERSIDADE FEDERAL DE SERGIPE
PRÓ-REITORIA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

ATA DE DEFESA DE DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Aos dezoito dias do mês de julho de 2024, às 8h (oito horas), reuniram-se, por webconferência e de forma totalmente remota, os membros da Comissão Examinadora formada pelos doutores LUCIANA COELHO MENDONÇA (orientadora-presidente), DENISE CONCEIÇÃO DE GOIS SANTOS MICHELAN (Examinadora interna- PROEC/UFS), GREGORIO GUIRADA FACCIOLI (Examinador externo ao Programa/UFS) para a realização da defesa de dissertação de mestrado do trabalho intitulado 'USO DO BIOCARVÃO NO TRATAMENTO DE EFLUENTE DE REATOR UASB', do mestrando ÍKARO DAMIÃO HORA SOUSA. Após a apresentação do candidato e a arguição dos membros da supracitada Comissão, o candidato foi considerado APROVADO com menção honrosa. Não havendo nada mais a tratar, eu, Luciana Coelho Mendonça, presidente da Comissão, lavrei a presente ata, que será assinada por mim e pelos demais membros da Comissão Examinadora. São Cristóvão, Cidade Universitária "Prof. José Aloísio de Campos", 18 de julho de 2024.

Documento assinado digitalmente
LUCIANA COELHO MENDONÇA
Data: 19/07/2024 15:02:14-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

LUCIANA COELHO MENDONÇA
(Presidente - Orientadora)

Documento assinado digitalmente
DENISE CONCEIÇÃO DE GOIS SANTOS MICHELAN
Data: 19/07/2024 15:24:30-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

DENISE CONCEIÇÃO DE GOIS SANTOS MICHELAN
(Examinadora interna)

Documento assinado digitalmente
GREGORIO GUIRADA FACCIOLI
Data: 22/07/2024 08:27:29-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

GREGORIO GUIRADA FACCIOLI
(Examinador externo ao Programa)

UFS/CCET/DEC/PROEC – Cidade Universitária "Prof. José Aloísio de Campos". Av. Marcelo Deda Chagas, s/n, Bairro Rosa Elze. CEP 49107-230. São Cristóvão – SE. Tel: (79) 3194-7576. E-mail: proec@academico.ufs.br; www.posgraduacao.ufs.br/proec

SOUSA, I. D. H. Uso do biocarvão no tratamento de efluente de reator UASB. 2024. 115 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão: UFS, 2024.

RESUMO

O tratamento adequado dos esgotos é primordial à promoção da saúde da população e à redução do impacto de seu lançamento em corpos hídricos. Com isso, o desenvolvimento de estudos com novos métodos para adequar os efluentes aos padrões de lançamento nos corpos receptores vem sendo incentivado. Dentre os quais, a adsorção tem sido vista como um método promissor na remoção de poluentes. Nesse sentido, o biocarvão tem atraído a atenção de muitos pesquisadores como um material adsorvente alternativo para remover diferentes tipos de contaminantes. Considerando esse contexto, o presente estudo se propõe a avaliar a eficiência do uso de diferentes biocarvões como meios filtrantes no tratamento complementar de efluentes de reator UASB, comparando-o com um meio filtrante de carvão ativado, comumente utilizado nas ETEs. A parte experimental foi constituída pela produção dos biocarvões advindos de três tipos de biomassas agroindustriais (casca de coco, sabugo de milho e bagaço de cana-de-açúcar); caracterização das biomassas, dos biocarvões e do carvão ativado; montagem de quatro filtros adsorventes para filtração do efluente do reator UASB da ETE da UFS; e, por fim, caracterização físico-química do esgoto bruto, do efluente do reator UASB e das amostras filtradas. Como resultados, observou-se que todos os filtros de biocarvão se mostraram eficientes para remoção de cor aparente e turbidez, com destaque para o filtro do biocarvão da casca de coco (62,50% e 68,54%, respectivamente). Quanto à DQO, para efluentes mais concentrados, todos filtros de biocarvão se mostraram ineficientes, enquanto que para efluentes mais diluídos, os filtros de biocarvão do bagaço da cana-de-açúcar e do sabugo de milho apresentaram perspectivas de remoção de DQO (40,52% e 30,39%, respectivamente). Quanto aos sólidos totais, todos os filtros de biocarvão se mostraram eficientes, com destaque para o filtro do biocarvão da cana-de-açúcar (44,16%). Por fim, para os sólidos suspensos totais, os filtros de biocarvão só se mostraram mais eficientes para efluentes mais diluídos, com destaque para o filtro de biocarvão da casca do coco (40,47%). Diante do exposto, pode-se concluir que o uso de biocarvões provenientes de resíduos agroindustriais pode ser uma boa alternativa para tratamentos complementares de estações de tratamento de esgoto com reatores UASB, a depender das características dos efluentes e dos parâmetros físico-químicos que se desejam reduzir. Assim, os biocarvões produzidos da casca de coco, do sabugo do milho e do bagaço da cana-de-açúcar podem ser aplicados para essa finalidade, pois apresentaram resultados interessantes e próximos dos obtidos na literatura por filtros de carvão ativado.

Palavras-chave: Adsorção. Biomassa. Resíduos agroindustriais. Esgoto.

SOUSA, I. D. H. Uso do biocarvão no tratamento de efluente de reator UASB. 2024. 115 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão: UFS, 2024.

ABSTRACT

The adequate treatment of sewage is essential to secure population's health and reduce the impact of its discharge into water bodies. Consequently, research has been conducted to develop new methods that are acceptable to existing discharge standards. The adsorption technique, for example, has been seen as a promising method in removing pollutants. In this context, biochar has attracted the attention of many researchers as an alternative adsorbent material capable of removing different types of contaminants. Therefore, the present study aimed to evaluate the efficiency of using different biochars filtering sewage as a complementary treatment approach for Upflow Anaerobic Sludge Blanket (UASB) reactor effluents, in comparison with an activated carbon filtering system, commonly used in WWTPs. The experimental phase consisted of producing biochars originated from three types of agro-industrial residues (coconut shells, corn cobs and sugarcane bagasse); characterization of these biomasses, respective biochars, and activated carbon; assembly of four adsorbent filters to filter effluent from the UASB reactor placed at the Universidade Federal de Sergipe (UFS) ETE; and, finally, physical-chemical characterization of the raw sewage, the effluent from UASB reactor, and the filtered samples. According to the results, it was observed that all biochar filters were efficient in removing apparent color and turbidity, with emphasis on the coconut shell biochar filter (62,50% and 68,54%, respectively). In the case of concentrated effluents, all biochar filters proved to be inefficient for removing Chemical Oxygen Demand (COD), while biochar filters from sugar cane bagasse and corn cobs showed prospects for COD removal with diluted effluents (40,52% and 30,39%, respectively). As for total solids, all biochar filters proved to be efficient, with emphasis on the sugar cane biochar filter (44,16%). Finally, for total suspended solids, biochar filters only proved to be efficient with diluted effluents, with emphasis on the coconut shell biochar filter (40,47%). So, it can be concluded that the use of biochars from agro-industrial residues can be a good alternative for complementary treatments in sewage treatment plants, depending on the effluent's characteristics and physical-chemical parameters analysed. Thus, biochars produced from coconut shells, corn cobs and sugarcane bagasse can be applied for this purpose as they presented interesting results that are close to those obtained with activated carbon filters.

Keywords: Adsorption. Biomass. Agroindustrial waste. Wastewater.

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS	iii
RESUMO.....	vi
ABSTRACT	vii
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS	xi
LISTA DE FIGURAS	xiii
LISTA DE TABELAS.....	xvi
1. INTRODUÇÃO.....	1
2. JUSTIFICATIVA	4
3. OBJETIVOS	5
3.1. Objetivo geral	5
3.2. Objetivos específicos.....	5
4. REFERENCIAL TEÓRICO.....	6
4.1. Saneamento básico	6
4.2. Esgotamento sanitário.....	7
4.3. Legislação aplicável	9
4.4. Tratamentos alternativos.....	10
4.5. Biocarvão.....	12
4.5.1. Definição	12
4.5.2. Processo de produção (pirólise).....	13
4.5.3. Origem.....	14
4.5.4. Principais propriedades/características	15
4.5.5. Principais usos.....	16
4.5.6. Exemplos de aplicação do biocarvão na remoção de compostos/contaminantes	17
5. MATERIAL E MÉTODOS.....	19
5.1. Escolha e preparo das biomassas.....	19

5.2. Produção dos biocarvões	23
5.3. Caracterização das biomassas, dos biocarvões e do carvão ativado.....	25
5.3.1. <i>Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)</i>	26
5.3.2. <i>Método de Brunauer, Emmett e Teller (BET)</i>	26
5.3.3. <i>Análise Termogravimétrica (TGA)</i>	27
5.3.4. <i>pH e Condutividade Elétrica</i>	27
5.4. Coleta dos efluentes bruto e do reator UASB da ETE da UFS	27
5.5. Construção dos filtros.....	30
5.6. Filtração do efluente do reator UASB	31
5.7. Caracterização das amostras líquidas	33
5.8. Avaliação da eficiência.....	34
5.9. Estudo estatístico	34
6. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	36
6.1. Escolha e preparo das biomassas.....	36
6.2. Produção dos biocarvões	37
6.3. Caracterização das biomassas, dos biocarvões e do carvão ativado.....	40
6.3.1. <i>Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)</i>	40
6.3.2. <i>Método de Brunauer, Emmett e Teller (BET)</i>	43
6.3.3. <i>Análise Termogravimétrica (TGA)</i>	45
6.3.4. <i>pH e Condutividade Elétrica</i>	49
6.4. Filtração do efluente do reator UASB	50
6.5. Caracterização dos efluentes	54
6.5.1. <i>Efluente bruto e efluente do reator UASB</i>	54
6.5.2. <i>Efluentes filtrados</i>	56
6.5.2.1. <i>Efluentes do filtro de biocarvão da casca do coco</i>	56
6.5.2.2. <i>Efluentes do filtro de biocarvão do sabugo de milho</i>	61
6.5.2.3. <i>Efluentes do filtro de biocarvão do bagaço da cana-de-açúcar</i>	66

6.5.2.4. <i>Efluentes do filtro de carvão ativado</i>	71
6.6. Avaliação das eficiências.....	72
6.6.1. <i>Cor aparente</i>	72
6.6.2. <i>Turbidez</i>	78
6.6.3. <i>DQO</i>	84
6.6.4. <i>Sólidos Totais</i>	88
6.6.5. <i>Sólidos Suspensos Totais</i>	93
7. CONCLUSÕES	99
8. RECOMENDAÇÕES.....	102
REFERÊNCIAS	103
APÊNDICE	114

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANA – Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico

BET – Brunauer-Emmett-Teller

CLQM – Centro de Laboratórios de Química Multiusuários

CLMDCEM - Condomínio de Laboratórios Multiusuários do Departamento de Ciência e Engenharia de Materiais

CONAMA – Conselho Nacional do Meio Ambiente

DBO – Demanda Bioquímica de Oxigênio

DEC – Departamento de Engenharia Civil

DQO – Demanda Química de Oxigênio

ETE – Estação de Tratamento de Esgotos

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

IUPAC – União Internacional de Química Pura e Aplicada

LAMCE – Laboratório de Materiais de Construção e Estruturas

LCNT – Laboratório de Corrosão e Nanotecnologia

MEV – Microscopia de Varredura Eletrônica

NUPEG – Núcleo de Petróleo e Gás

pH – Potencial Hidrogeniônico

PLANSAB – Plano Nacional de Saneamento Básico

PNRH – Política Nacional de Recursos Hídricos

SAMA – Laboratório de Saneamento e Meio Ambiente

SNIS – Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento

TGA – Análise Termogravimétrica

UASB – Upflow Anaerobic Sludge Blanket

UFS – Universidade Federal de Sergipe

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Fluxograma das etapas da pesquisa.	19
Figura 2 - Resíduos de casca de coco, sabugo de milho e bagaço de cana-de-açúcar colocados em formas metálicas para secagem natural.	21
Figura 3 - Resíduos de casca de coco, sabugo de milho e bagaço de cana-de-açúcar em estufa para secagem artificial.	21
Figura 4 - Materiais triturados no moinho de facas.	22
Figura 5 - Amostra dos materiais peneirados na peneira de abertura de malha de 2 mm.	23
Figura 6 - Fluxograma das atividades de escolha e preparo das biomassas.	23
Figura 7 - Biomassas colocadas nos cadinhos para carbonização.	24
Figura 8 - Cadinhos colocados na mufla para o processo de pirólise.	24
Figura 9 - Ensaios para caracterização das biomassas, dos biocarvões e do carvão ativado. .	25
Figura 10 - Delimitação da área de influência da ETE da UFS campus São Cristóvão.	28
Figura 11 - Representação em perspectiva da ETE da UFS campus São Cristóvão.	29
Figura 12 - Vista superior dos reatores UASB da ETE da UFS.	29
Figura 13 - Pontos de coleta das amostras.	30
Figura 14 - Filtros produzidos.	31
Figura 15 - Protótipo do sistema filtrante.	32
Figura 16 - Sistema filtrante construído.	32
Figura 17 - Biocarvão produzido da casca de coco.	38
Figura 18 - Biocarvão produzido do sabugo de milho.	38
Figura 19 - Biocarvão produzido do bagaço de cana-de-açúcar.	39
Figura 20 - Carvão ativado.	40
Figura 21 - Imagens de MEV - 40X - casca de coco: biomassa (a) e biocarvão (b).	41
Figura 22 - Imagens de MEV - 40X - sabugo de milho: biomassa (a) e biocarvão (b).	41
Figura 23 - Imagens de MEV - 40X - bagaço de cana-de-açúcar: biomassa (a) e biocarvão (b).	42
Figura 24 - Imagem de MEV - 40X - Carvão ativado comercial.	43
Figura 25 - Análise Termogravimétrica da biomassa da casca do coco.	45
Figura 26 - Análise Termogravimétrica da biomassa do sabugo de milho.	46
Figura 27 - Análise Termogravimétrica da biomassa do bagaço da cana-de-açúcar.	46
Figura 28 - Análise Termogravimétrica do biocarvão da casca do coco.	47
Figura 29 - Análise Termogravimétrica do biocarvão do sabugo de milho.	48

Figura 30 - Análise Termogravimétrica do biocarvão do bagaço da cana-de-açúcar.	48
Figura 31 - Análise Termogravimétrica do carvão ativado.	49
Figura 32 - Cor aparente das amostras filtradas pelo filtro de biocarvão da casca do coco.	57
Figura 33 - Turbidez das amostras filtradas pelo filtro de biocarvão da casca do coco.	58
Figura 34 - DQO das amostras filtradas pelo filtro de biocarvão da casca do coco.	59
Figura 35 - Sólidos totais das amostras filtradas pelo filtro de biocarvão da casca do coco.	60
Figura 36 - Sólidos suspensos totais das amostras filtradas pelo filtro de biocarvão da casca do coco.	61
Figura 37 - Cor aparente das amostras filtradas pelo filtro de biocarvão do sabugo de milho.	62
Figura 38 - Turbidez das amostras filtradas pelo filtro de biocarvão do sabugo de milho.	63
Figura 39 - DQO das amostras filtradas pelo filtro de biocarvão do sabugo de milho.	64
Figura 40 - Sólidos totais das amostras filtradas pelo filtro de biocarvão do sabugo de milho.	65
Figura 41 - Sólidos suspensos totais das amostras filtradas pelo filtro de biocarvão do sabugo de milho.	66
Figura 42 - Cor aparente das amostras filtradas pelo filtro de biocarvão do bagaço da cana-de-açúcar.	67
Figura 43 - Turbidez das amostras filtradas pelo filtro de biocarvão do bagaço da cana-de-açúcar.	68
Figura 44 - DQO das amostras filtradas pelo filtro de biocarvão do bagaço da cana-de-açúcar.	69
Figura 45 - Sólidos totais das amostras filtradas pelo filtro de biocarvão do bagaço da cana-de-açúcar.	70
Figura 46 - Sólidos suspensos totais das amostras filtradas pelo filtro de biocarvão do bagaço da cana-de-açúcar.	71
Figura 47 - Cor aparente dos efluentes da Filtração 01 nos filtros produzidos.	73
Figura 48 - Cor aparente dos efluentes da Filtração 02 dos filtros produzidos.	75
Figura 49 - Turbidez dos efluentes da Filtração 01 dos filtros produzidos.	79
Figura 50 - Turbidez dos efluentes da Filtração 02 dos filtros produzidos.	81
Figura 51 - DQO dos efluentes da Filtração 01 dos filtros produzidos.	84
Figura 52 - DQO dos efluentes da Filtração 02 dos filtros produzidos.	86
Figura 53 - Sólidos totais dos efluentes da Filtração 01 dos filtros produzidos.	89
Figura 54 - Sólidos Totais dos efluentes da Filtração 02 dos filtros produzidos.	91

Figura 55 - Sólidos suspensos totais dos efluentes da Filtração 01 dos filtros produzidos.....93

Figura 56 - Sólidos suspensos totais dos efluentes da Filtração 02 dos filtros produzidos.....95

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Dados iniciais da coleta e preparação das biomassas para produção dos biocarvões.	36
Tabela 2 - Teor de umidade em base úmida das biomassas (%).	36
Tabela 3 - Dados da produção dos biocarvões.	39
Tabela 4 - Resultados do método BET dos materiais analisados.	44
Tabela 5 - pH e condutividade elétrica das amostras.	50
Tabela 6 - Dados da Filtração 01.....	51
Tabela 7 - Dados da Filtração 02.....	51
Tabela 8 - Dados das Filtrações 01 e 02 utilizando o filtro de carvão ativado.....	53
Tabela 9 - Caracterização dos efluentes bruto e reator UASB.	54
Tabela 10 - Composição típica do esgoto doméstico bruto.....	55
Tabela 15 - Caracterização dos efluentes do filtro de carvão ativado.	72
Tabela 15 - Avaliação das eficiências para cor aparente da Filtração 01 dos filtros produzidos.	74
Tabela 16 - Análise comparativa dos dados de cor aparente dos filtros de biocarvão na Filtração 01 aplicando o teste de Kruskal-Wallis para comparação de três amostras independentes.	75
Tabela 17 - Avaliação das eficiências para cor aparente da Filtração 02 dos filtros produzidos.	76
Tabela 18 - Análise comparativa dos dados de cor aparente dos filtros de biocarvão na Filtração 02 aplicando o teste de Kruskal-Wallis para comparação de três amostras independentes.	77
Tabela 19 - Avaliação das eficiências para turbidez da Filtração 01 dos filtros produzidos...80	
Tabela 20 - Análise comparativa dos dados de turbidez dos filtros de biocarvão na Filtração 01 aplicando o teste de Kruskal-Wallis para comparação de três amostras independentes.	81
Tabela 21 – Avaliação das eficiências para turbidez da Filtração 02 dos filtros produzidos. .82	
Tabela 22 - Análise comparativa dos dados de turbidez dos filtros de biocarvão na Filtração 02 aplicando o teste de Kruskal-Wallis para comparação de três amostras independentes.	83
Tabela 23 - Avaliação das eficiências para DQO da Filtração 01 dos filtros produzidos.	85
Tabela 24 - Avaliação das eficiências para DQO da Filtração 02 dos filtros produzidos.	87
Tabela 25 - Avaliação das eficiências para sólidos totais da Filtração 01 dos filtros produzidos.	90

Tabela 26 - Análise comparativa dos dados de sólidos totais dos filtros de biocarvão na Filtração 01 aplicando o teste de Kruskal-Wallis para comparação de três amostras independentes.	91
Tabela 27 – Avaliação das eficiências para sólidos totais da Filtração 02 dos filtros produzidos.	92
Tabela 28 - Avaliação das eficiências para sólidos suspensos totais da Filtração 01 dos filtros produzidos.	94
Tabela 29 - Análise comparativa dos dados de sólidos suspensos totais dos filtros de biocarvão na Filtração 01 aplicando o teste de Kruskal-Wallis para comparação de três amostras independentes.	95
Tabela 30 - Avaliação das eficiências para sólidos suspensos totais da Filtração 02 dos filtros produzidos.	96
Tabela 31 - Análise comparativa dos dados de sólidos suspensos totais dos filtros de biocarvão na Filtração 02 aplicando o teste de Kruskal-Wallis para comparação de três amostras independentes.	97

1. INTRODUÇÃO

De acordo com a Lei 9.433/1997 que instituiu a Política Nacional de Recursos Hídricos (PNRH) no Brasil, a água é considerada um bem de domínio público e um recurso natural limitado, dotado de valor econômico. Entre os objetivos estabelecidos pela PNRH, estão a garantia à atual e às futuras gerações de água em quantidade e qualidade de acordo com os padrões adequados aos seus respectivos usos e a utilização racional e integrada dos recursos hídricos, buscando a prevenção e defesa desses recursos que possam ser afetados pelo uso inadequado dos bens naturais.

Diante disso, a captação, o tratamento e a distribuição de água, bem como a coleta e o tratamento de esgoto, são primordiais para a promoção da saúde da população e para reduzir o impacto do lançamento de águas residuárias em corpos hídricos sem o devido tratamento. Assim, a disposição adequada dos esgotos sanitários é fundamental para a melhoria da saúde pública e do meio ambiente, pois são inúmeras as doenças que podem ser transmitidas pela disposição inadequada desses efluentes (Nuvolari et al., 2003).

De acordo com Carmalin e Lima (2018), cerca de 2 milhões de toneladas de esgoto são despejadas diariamente nas águas doces no Mundo. Geissen et al. (2015) afirmam que por volta de 90% das águas dos arredores das cidades do Mundo estão contaminadas, dos quais 70% são esgotos domésticos e 30% são esgotos industriais que são descartados diretamente em lagos e rios.

Nas cidades brasileiras, o déficit de coleta e tratamento de esgotos tem resultado em parcela significativa de carga poluidora chegando aos corpos d'água, gerando implicações negativas aos múltiplos usos dos recursos hídricos. O panorama geral dos serviços de esgotamento sanitário para a população urbana do país traz os resultados: 43% possuem seu esgoto coletado e tratado e 12% utilizam-se de solução individual, ou seja, 55% da população da zona urbana brasileira pode ser considerada provida com atendimento adequado à luz do Plano Nacional de Saneamento Básico (PLANSAB); 18% têm seu esgoto coletado e não tratado, o que pode ser considerado como atendimento precário; e 27% não possuem coleta nem tratamento, isto é, sem atendimento por serviço de esgotamento sanitário (ANA, 2017). Ainda, de acordo com o Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento - SNIS (2023), quase 91 milhões de brasileiros (aproximadamente 45% da população) não têm acesso a esse serviço.

Aliado a isso, embora as Estações de Tratamento de Esgoto (ETEs) existentes sejam projetadas para remover uma diversidade de poluentes, nem sempre as eficiências desejadas são alcançadas na prática (Nuvolari, 2011). Florencio et al. (2006) afirmam que as estações de tratamento são projetadas para redução das cargas de matéria orgânica e dos sólidos em

suspensão, como também de macronutrientes, como o nitrogênio e o fósforo, e remoção de organismos patogênicos, adequando assim esses efluentes aos padrões de qualidade exigidos pelos corpos receptores.

Diante disso, Pimenta (2018) alerta para a criação de estudos de novos métodos para adequar os efluentes aos padrões de lançamento nos corpos hídricos, pois a grande maioria das estações de tratamento em funcionamento não é capaz de remover diversos tipos de componentes.

Um desses exemplos é o reator *Upflow Anaerobic Sludge Blanket* (UASB), que é uma tecnologia de tratamento biológico de esgotos, baseada na decomposição anaeróbia da matéria orgânica. Apesar de ser uma alternativa de viabilidade comprovada no tratamento de esgotos domésticos, o efluente do reator UASB normalmente não alcança os padrões de lançamento exigidos pela legislação ambiental, sendo necessária a implantação de uma etapa de tratamento complementar (Giustina et al., 2010).

De acordo com Silva et al. (2022a), o Brasil possui a maior quantidade de reatores UASB instalados do mundo, cuja finalidade é o tratamento de esgoto sanitário. Fato esse que pode ser justificado pelos menores custos de implantação, operação e manutenção exigidos por essa tecnologia quando comparados com outros sistemas de tratamento.

Estações de tratamento de esgoto constituídas por reatores UASB seguidos de pós-tratamentos aeróbios, por exemplo, geram diminuição de custos de implantação em torno de 20 a 50% e de operação, superior a 50%, quando comparadas com estações convencionais que utilizam lodo ativado (Chernicharo et al., 2018a).

Paiva et al. (2020) afirmam que sistemas anaeróbios modernos de tratamento de esgoto doméstico, ainda que sejam bastante eficientes na diminuição de matéria orgânica e sólidos em suspensão, não fornecem efluente com qualidade compatível com os padrões legais para disposição em corpos hídricos. E por isso, também necessitam ser associados a um pós-tratamento.

Carmalin e Lima (2018) asseguram que as estações primárias e secundárias convencionais de tratamento de esgoto não removem ou degradam poluentes tóxicos de forma eficiente e, com isso, necessitam da aplicação de um tratamento terciário de baixo custo. A adsorção vem sendo um método promissor na remoção desses poluentes, pois possui baixo custo de implementação, significativa eficiência e tem projeto operacional simplificado.

O processo de adsorção pode ser empregado na remoção de poluentes com resultados eficazes, a exemplo do uso do carvão ativado no tratamentos de águas residuais (Carvalho et al., 2021). Entre os materiais adsorventes mais utilizados, incluem-se o carvão ativado, o

biocarvão, os hidrocarvões ativados, os nanotubos de carbono, os grafenos, os compósitos com carvão ativado e mesoporo nanocompósito de polímero e argila (Carmalin; Lima, 2018).

Nesse sentido, o biocarvão tem atraído a atenção de muitos pesquisadores por ser um material adsorvente alternativo para remover diferentes tipos de contaminantes, incluindo metais pesados, nutrientes e produtos farmacêuticos (Sun et al., 2014). Além disso, devido à expressiva aromaticidade e grande área superficial, é considerado um ótimo sorvente de poluentes orgânicos e inorgânicos (Carmona, 2021).

O biocarvão é um material sólido rico em carbono, obtido a partir da decomposição termoquímica da biomassa em um ambiente com oxigênio limitado, denominado de pirólise (Cuba et al., 2011). Esse material possui propriedades específicas, a exemplo de sua superfície porosa, a qual como material adsorvente, o torna similar ao carvão ativado, no entanto, mais barato e com menor uso de energia, pois pode ser utilizada uma grande diversidade de matérias-primas para sua produção, oriundas principalmente do processo de carbonização de biomassas agrícolas e de resíduos sólidos (Tan et al., 2015).

Considerando esse contexto, o presente estudo se propõe a avaliar a eficiência do uso de diferentes biocarvões como meios filtrantes no tratamento complementar de efluente de reator UASB, comparando-o com um meio filtrante de carvão ativado, comumente utilizado em Estações de Tratamento de Esgoto, visando a melhoria da qualidade dos efluentes.

2. JUSTIFICATIVA

Considerando que o crescimento acelerado da população mundial traz consigo o aumento do volume de esgotos sanitários produzidos e ao mesmo tempo despejados nos recursos hídricos e no solo sem o devido tratamento, e que isso vem colaborando para a degradação do meio ambiente, através da poluição dos recursos naturais, desestabilização dos ecossistemas e gerando graves problemas ambientais e sociais, a busca por novas soluções de tratamento de esgotos vem crescendo nos últimos anos visando a recuperação e manutenção da qualidade de vida da população e do meio ambiente (Oliveira et al., 2019).

De acordo com Borges et al. (2016), a crescente expansão dos centros urbanos, das indústrias, da agricultura e da pecuária tem ajudado no aumento da contaminação de rios e lagos por diversos compostos orgânicos, entre os quais: pesticidas, produtos farmacêuticos e de higiene pessoal.

Pimenta (2018) relata que há esforços no mundo pela busca de novas tecnologias que possam ser aplicadas na melhoria dos sistemas de proteção ambiental, onde se destaca o desenvolvimento de materiais capazes de minimizar os impactos gerados pela população e indústrias, associando o desenvolvimento científico e tecnológico no aproveitamento de resíduos sólidos classificados como rejeitos.

Segundo Feitosa et al. (2020), o alto volume produzido diariamente de resíduos sólidos e rejeitos em todos os setores da economia é um dos maiores problemas ambientais da atualidade. A busca por uma destinação ambientalmente adequada desses resíduos, a fim de se evitar a poluição ambiental (contaminação dos solos e dos recursos hídricos) é de suma importância para o desenvolvimento sustentável do planeta.

Huggins et al. (2016) afirmam que sistemas de tratamento de esgotos sanitários com menores custos operacionais e capacidade direta de reutilização de água e/ou materiais podem ajudar no desenvolvimento sustentável de infraestruturas de tratamento de esgoto sanitário.

Segundo Carmalin e Lima (2018), o processo físico-químico de adsorção com carvões no tratamento de efluentes possui elevada eficiência e vem ganhando destaque devido ao baixo custo de operação, em comparação com os outros processos, além de poder ser integrado com outros sistemas. Além disso, Carvalho (2018) afirma que o tratamento com carvões ativados ou biocarvões possuem forte potencial de remoção de micropoluentes de efluentes.

Diante disso, o presente trabalho busca contribuir para geração de novas fontes de tratamento de efluentes mais sustentáveis e eficientes que possam ser utilizadas de forma complementar às Estações de Tratamento de Esgoto (ETE) já existentes, que porventura apresentem problemas na remoção dos poluentes.

3. OBJETIVOS

3.1. Objetivo geral

Avaliar a eficiência do uso de diferentes tipos de biocarvão como meio filtrante no tratamento complementar de efluente de reator UASB, comparando-os com o carvão ativado.

3.2. Objetivos específicos

- ✓ Produzir biocarvão a partir das biomassas de diferentes resíduos agrícolas (bagaço de cana-de-açúcar, sabugo de milho e casca de coco);
- ✓ Caracterizar as biomassas, os biocarvões produzidos e o carvão ativado;
- ✓ Desenvolver filtros adsorventes com os biocarvões produzidos e o carvão ativado para verificação das suas aplicabilidades no tratamento complementar de efluentes;
- ✓ Monitorar os parâmetros de qualidade dos efluentes tratados por cada um dos filtros produzidos;
- ✓ Analisar comparativamente os parâmetros de qualidade dos efluentes tratados pelos filtros de biocarvão em relação ao filtro de carvão ativado, buscando identificar o filtro mais eficiente no tocante às melhorias dos parâmetros de qualidade analisados.

4. REFERENCIAL TEÓRICO

4.1. Saneamento básico

No Brasil, o Plano Nacional de Saneamento Básico (PLANSAB) consiste no planejamento integrado do saneamento básico considerando seus quatro componentes: abastecimento de água potável, esgotamento sanitário, coleta de lixo e manejo de resíduos sólidos, e drenagem e manejo das águas pluviais urbanas. Esse plano foi criado em 2013 e possui o horizonte de projeto de 20 anos (2014 a 2033) (Brasil, 2022).

Com isso, o saneamento básico é o conjunto de serviços públicos, infraestruturas e instalações operacionais de abastecimento de água potável (constituído pelas atividades desde a captação até as ligações prediais e os seus instrumentos de medição), esgotamento sanitário (composto pelas atividades de coleta, transporte, tratamento e disposição final adequada dos esgotos sanitários), limpeza urbana e manejo de resíduos sólidos (estabelecido pelas atividades de coleta, conservação urbana e destinação final ambientalmente adequada dos resíduos sólidos) e drenagem e manejo das águas pluviais (referentes às atividades de drenagem, tratamento e destinação final das águas drenadas) (ANA, 2023).

Sancionada em 2020, a Lei Federal nº 14.026 ficou conhecida como o Novo Marco Legal do Saneamento no Brasil, na qual houve a priorização dos serviços de abastecimento de água e esgotamento sanitário em detrimento a abordagem da gestão integrada dos quatros componentes previstos no PLANSAB. Entre as suas metas principais, a meta audaciosa de atendimento de 99% da população com água potável e de 90% da população com coleta e tratamento de esgotos até 31 de dezembro de 2033, com possibilidade de ampliar até 2040.

Ribeiro (2016) relata que o Brasil está marcado por grande desigualdade e por déficit ao acesso, principalmente em relação à coleta e tratamento de esgoto. Destaca-se que, em relação ao atendimento à população de baixa renda, o índice é ainda mais inadequado, e ampliar a cobertura de atendimento do esgotamento sanitário desse fragmento da população é um grande desafio.

De acordo com o Painel de Esgotamento Sanitário do Brasil (2023), disponibilizado pelo Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS), de uma amostra de 5.150 dos 5.570 municípios brasileiros, o que equivale a 92,5% dos municípios e 97,5% da população total, no tocante ao atendimento do esgotamento sanitário nas cinco regiões brasileiras, os seguintes índices de cobertura foram alcançados: 14,7% no Norte, 31,4% no Nordeste, 62,3% no Centro-Oeste, 80,9% no Sudeste e 49,7% no Sul.

Diante disso, surge a necessidade da busca por investimentos em infraestruturas e novas tecnologias nesse segmento, visando não só o atendimento ao Novo Marco do Saneamento, como também a redução dos impactos gerados pela contaminação dos cursos d'água advindos da deficiência e/ou não atendimento dos sistemas de tratamento de esgotamento sanitário existentes.

4.2. Esgotamento sanitário

De acordo com Oliveira et al. (2019), os esgotos domésticos são compostos por constituintes físicos, químicos e biológicos. Esses efluentes contêm aproximadamente 99,93% de água e apenas 0,07% de sólidos orgânicos (proteínas, carboidratos e lipídios) e inorgânicos (detritos minerais pesados, metais e sais) (Metcalf; Eddy, 2003). O tratamento dos esgotos sanitários consiste, principalmente, na estabilização da matéria orgânica, a qual é transformada em matéria inorgânica (redução da Demanda Bioquímica de Oxigênio – DBO), além da remoção ou diminuição dos sólidos, nutrientes (nitrogênio e fósforo) e dos agentes patógenos (Pimenta et al., 2002).

O esgoto coletado e transportado é direcionado para o devido tratamento, de modo a apresentar características que lhe permita ser lançado nos corpos d'águas, atendendo aos parâmetros de qualidade definidos para o lançamento de efluentes. O tratamento é separado em diferentes fases que objetivam remover os resíduos maiores, os sólidos suspensos, a matéria orgânica, e os nutrientes, por meio de operações físicas e processos químicos e biológicos (Oliveira, 2014).

Segundo Von Sperling (1996), o tratamento dos esgotos é usualmente dividido através das seguintes etapas:

- Tratamento Preliminar (gradeamento e desarenação);
- Tratamento Primário (floculação e sedimentação);
- Tratamento Secundário (processos biológicos de oxidação);
- Tratamento Terciário (polimento da água, eventualmente).

O tratamento preliminar utiliza peneiras, grades ou caixas de areia para retenção de sólidos grosseiros e evitar que ocorram danos aos equipamentos subsequentes ou também facilitar o transporte do efluente pelo sistema. O tratamento primário consiste na decantação, onde os sólidos em suspensão se sedimentam gradualmente no fundo, e posteriormente ocorre a retirada do lodo primário. No tratamento secundário ocorre a inclusão da etapa biológica, onde a remoção da matéria orgânica é efetuada por reações bioquímicas, os microrganismos irão se alimentar da matéria orgânica, convertendo-a em gás carbônico e água. Por fim,

tratamento terciário são retirados poluentes específicos, como os nutrientes nitrogênio e fósforo (Lopes, 2013).

De acordo com Mendonça e Mendonça (2017), a maioria das estações de tratamento construídas alcançam apenas o nível de tratamento secundário, mas o tratamento terciário se faz necessário em muitas situações, principalmente, quando o tratamento secundário se mostra ineficiente na remoção de alguns nutrientes, como também, na desinfecção e remoção de compostos tóxicos e contaminantes específicos.

De acordo com Pimenta et al. (2002), não existe um sistema de tratamento padrão para ser empregado, pois vários fatores irão influenciar na definição das opções tecnológicas, tais como, disponibilidade de área, qualidade desejada para o efluente tratado, da legislação exigida no local, da geração de lodo e da mão de obra disponível. O grau do tratamento e sua eficiência dependerão dessas características, assim como, da capacidade de autodepuração e diluição do corpo d'água receptor e das consequências do lançamento desses efluentes (Mendonça; Mendonça, 2017).

Florencio et al. (2006) destacam que as tecnologias de tratamento de esgoto sempre são desenvolvidas tendo por referência as exigências para atender aos padrões de qualidade dos corpos receptores e mananciais de abastecimento, buscando preservar os ecossistemas aquáticos e a necessidade de preservação dos usos múltiplos da água. Essas exigências vão depender da capacidade de diluição por parte dos corpos hídricos receptores em função das classes de enquadramento para água doce, prescritas na Resolução do Conselho Nacional de Meio Ambiente - CONAMA nº 357 (Brasil, 2005) correlacionadas com as determinações da Resolução CONAMA nº 430 (Brasil, 2011) (ANA, 2017).

Folgosi (2014) salienta que as tecnologias utilizadas nos sistemas de tratamento de esgoto estão evoluindo com o decorrer do tempo e atualmente existem diversas opções de sistemas, como: filtros biológicos, lagoas de estabilização, lodos ativados, tratamento por membranas. Com isso, sistemas de tratamentos simplificados e mais eficientes são incentivados e, mesmo que não existam tecnologias que atendam integralmente os requisitos técnico-econômicos, há diversas alternativas viáveis que correlacionam eficiência e redução de custos (Faedo, 2010).

Nas cidades brasileiras das regiões Sul, Sudeste e Centro-Oeste, segundo Chernicharo et al. (2018b), as tecnologias de tratamento de esgoto mais utilizadas são os reatores UASB, as lagoas de estabilização e os lodos ativados. Das 1.667 ETEs presentes nessas regiões, 40% empregam os reatores UASB para o tratamento dos respectivos efluentes, onde são necessárias

aplicações de sistemas de pós-tratamento, dentre os quais se destacam os filtros biológicos percoladores, os filtros anaeróbios e as lagoas de polimento.

4.3. Legislação aplicável

No Brasil, a preocupação com questões ambientais é relativamente recente. A primeira classificação das águas superficiais foi definida inicialmente na Resolução do CONAMA nº 20 de 1986 que instituiu os instrumentos para avaliação da evolução da qualidade das águas superficiais no território nacional, de forma a facilitar a fixação e controle das metas para enquadramento dos corpos d'águas a depender dos seus usos, definindo as condições e padrões de qualidade requeridos para cada classe das águas, definidas como doces, salobras e salinas.

O CONAMA é o órgão consultivo e deliberativo, responsável pela elaboração de resoluções que representam relevantes instrumentos normativos para a gestão ambiental em busca do desenvolvimento sustentável (Carvalho, 2018).

Em 2005, o CONAMA criou a Resolução nº 357 que acabou revogando a Resolução nº 20 de 1986. A Resolução nº 357 dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes. Essa normativa aprimorou as definições dos critérios para o estabelecimento das classes dos corpos de água e dos padrões de qualidade exigidos para cada classe dispostos na antiga resolução (Brasil, 2005).

Com essa Resolução, houve a inclusão e a mudança de alguns parâmetros de qualidade para classificação dos corpos hídricos, estabelecimento das metas progressivas para melhoria da qualidade da água a ser, obrigatoriamente, alcançada ou mantida em um segmento de corpo hídrico, ao longo dos anos, e a inserção da vazão de referência, a partir da qual, serão definidos os valores máximos estabelecidos para os parâmetros de qualidade para cada classe de enquadramento.

Além disso, houve maior cobrança por fiscalização e acompanhamento mais rígido por parte dos órgãos ambientais de todas as esferas da administração pública, principalmente, no cumprimento das metas progressivas obrigatórias para melhoria da água para efetivação dos enquadramentos pretendidos.

Em 2011, o CONAMA criou a Resolução nº 430 (Brasil, 2011) que complementa e altera a Resolução nº 357, no tocante à disposição das condições e padrões de lançamento de efluentes. Essa Resolução determina que os efluentes de qualquer fonte poluidora somente poderão ser lançados diretamente nos corpos receptores após o devido tratamento e desde que obedeçam às condições, padrões e exigências nela disposta, e ainda não poderão conferir ao

corpo receptor características de qualidade em desacordo com as metas obrigatórias progressivas do seu enquadramento.

No tocante às condições e padrões para o lançamento de efluentes dos sistemas de tratamento de esgotos sanitários, a Resolução CONAMA n° 430 (Brasil, 2011) analisa os parâmetros de qualidade: pH, temperatura, materiais sedimentáveis, DBO, substâncias solúveis em hexano e materiais flutuantes.

Ainda, de acordo com essa Resolução (Brasil, 2011), o lançamento de um efluente no corpo d'água deve atender aos critérios: pH entre 5 e 9; temperatura inferior a 40°C (sendo que a oscilação da temperatura do corpo hídrico, onde o efluente será lançado, não poderá ser superior a 3°C no limite da zona de mistura); materiais sedimentáveis até 1 mL/L em teste de 60min em cone *Imhoff* (para lagos e lagoas, onde o limite de velocidade é baixo, o lançamento dos materiais sedimentáveis devem estar virtualmente ausentes); gestão de lançamento com vazão máxima de 1,5 vez a vazão média da produção poluidora (salvo aos outorgados por autoridades competentes); óleos minerais até 20 mg/L; óleos vegetais e gorduras animais até 50 mg/L; ausência de resíduos grosseiros ou materiais em suspensão; DBO: remoção mínima de 60%, sendo que este limite atuará de acordo com os estudos locais e as características do corpo hídrico receptor, ou seja, poderá ser reduzido mediante estudos de autodepuração do corpo hídrico receptor.

Já, segundo a Resolução CONAMA n° 357 (Brasil, 2005), os efluentes lançados nos corpos hídricos não poderão conferir ao corpo d'água características em desacordo com as metas obrigatórias progressivas, intermediárias e final, do seu enquadramento.

Convém ressaltar que as Resoluções n° 357 e n° 430 devem ser aplicadas em conjunto, tendo em vista que as considerações das classes de enquadramento dos corpos d'água possuem relação direta com as condições e padrões para o lançamento dos efluentes no respectivo corpo hídrico.

4.4. Tratamentos alternativos

Diante do paradigma dominante da utilização dos recursos naturais como se fossem ilimitados, faz-se necessária a mudança dessa mentalidade com a adoção de novas tecnologias que colaborem para a promoção do desenvolvimento sustentável em sua totalidade, seja do ponto de vista social, ambiental e econômico (Marcelino et al., 2020).

Oliveira et al. (2019) reforçam que a coleta, o tratamento e disposição ambientalmente adequada dos efluentes são essenciais para a melhoria do quadro de saúde da população e pré-requisito para busca da sustentabilidade. Com isso, investimentos em novas tecnologias no

tratamento dos esgotos sanitários significa grande salto no desenvolvimento de infraestruturas para proteger o meio ambiente e melhorar a qualidade de vida da população.

Aliado a isso, o aumento da demanda por água potável diante do crescimento populacional e o maior acesso ao saneamento vem exigindo diferenciadas técnicas para o tratamento. Assim, vem ocorrendo crescimento dos processos de tratamento de água e esgoto (Urban et al., 2019).

Carvalho et al. (2021) afirmam que estudos recentes com processos oxidativos avançados, filtração com carvão ativado, processos com membranas de nanofiltração, osmose e processos com cloração vêm se destacando como alternativas promissoras e mais eficientes como tratamentos complementares aos convencionais.

De acordo com Rodrigues et al. (2022), a utilização de diferentes materiais filtrantes tem sido alvo de diversas pesquisas no emprego do tratamento de águas residuárias, a fim de melhorar a eficiência de remoção de poluentes, principalmente no processo de adsorção de nitrogênio e fósforo.

O processo de adsorção vem ganhando destaque por se mostrar eficaz no tratamento dos poluentes dissolvidos que permanecem mesmo após os processos de oxidação química ou tratamento biológico (Carmalin; Lima, 2018).

Com isso, segundo Pimenta (2018), a adsorção consiste na concentração de partículas na superfície de determinadas substâncias, sendo advindas de fluídos, sólidos ou gasosos, caracterizada pela transferência de massa, fenômeno que representa a habilidade dos sólidos porosos de reterem as moléculas de um composto de uma mistura.

Além disso, Moura, Marques e Freitas (2018) descrevem a adsorção como sendo a adesão de moléculas a uma superfície, onde a nomenclatura adsorbato se refere às moléculas capturadas/aderidas e o termo adsorvente como sendo o material poroso que retém o adsorbato.

Contudo, Soares (2022) salienta que a eficiência da remoção dos compostos está diretamente associada à granulometria do material adsorvente, ou seja, ao tamanho das partículas do material poroso. Quanto menor a granulometria, maior a superfície de contato e, consequentemente, maior a taxa de aderência dos compostos envolvidos.

Com isso, Maia et al. (2017) afirmam que o interesse na produção de materiais adsorventes alternativos vem ganhando destaque, dentre as matérias primas, têm-se os resíduos agrícolas e rejeitos de estações de tratamento de água e esgoto. Segundo Santos (2015), uma série de variáveis devem ser consideradas para a escolha dessas matérias primas, dentre as quais: o material deve ser de baixo custo, alta disponibilidade e apresentar elevada capacidade de adsorção.

De acordo com Sthoher et al. (2012), para um processo de adsorção eficiente deve ser verificada as seguintes características do material adsorvente: seletividade (verificação de quais substâncias conseguem ser retidas), capacidade de retenção e tempo de vida útil. Dentre as matérias primas utilizadas na adsorção, o biocarvão elaborado com restos de plantas e resíduos agrícolas tornou-se uma opção sustentável, eficiente e de baixo custo para a purificação de águas contaminadas com poluentes orgânicos e inorgânicos, inclusive poluentes metálicos (Souza et al., 2021). A adsorção com biocarvão baseia-se na separação dos contaminantes da água pela facilidade das moléculas contidas no fluído de serem adsorvidas na superfície porosa das partículas do carvão (Pimenta, 2018).

Tan et al. (2015) afirmam que a eficiência de adsorção do biocarvão depende das suas propriedades, entre as quais, sua biomassa inicial, temperatura de produção (pirólise), pH e concentração do adsorvente.

4.5. Biocarvão

4.5.1. Definição

Segundo Santana et al. (2021), o biocarvão é definido como sendo um material sólido, resultante da conversão termoquímica de diferentes biomassas em um ambiente com oxigênio limitado, denominada de pirólise. Entende-se por biomassa toda matéria orgânica seja de origem animal, vegetal ou de microrganismos que possa ser convertida em energia (Gonçalves, 2016).

O biocarvão é considerado um subproduto da combustão incompleta de resíduos orgânicos, em oxigênio reduzido, que apresenta estrutura aromática condensada resistente a decomposição, porosa e com inúmeros grupos funcionais (Figueredo et al., 2017). Esse material pode ser obtido a partir de diferentes matérias primas, com destaque para os resíduos de agroindústrias, industriais, lodos de estações de tratamento de esgoto, de criação de animais, entre outros (Marcelino et al., 2020; Cuba et al., 2021). Corroborando com isso, Menezes et. al. (2022) relatam, em um estudo de revisão sistemática, a existência de trabalhos científicos com mais de 87 matérias primas diferentes para produção de biocarvão nas mais diversas partes do Mundo.

Trazzi et al. (2018) afirmam que o processo de produção do biocarvão promove uma reorganização dos átomos de carbono, aumentando a superfície porosa do material, proporcionando melhoria nas propriedades químicas, principalmente pela alta superfície específica resultando em aumento da capacidade de troca de cátions e adsorção de nutrientes.

Os resíduos que podem ser usados para a formação do biocarvão têm grande variabilidade, visto que se escolhe os resíduos com base nas características que o biocarvão precisa, para posteriormente ter aplicabilidade eficiente, seja como condicionador de solo, remediador ou até tratamento de água (Ferreira et al., 2019).

Marcelino et al. (2020) relatam que o biocarvão difere das cinzas, devido ser um material rico em carbono e com maior recalcitrância, e as cinzas são comumente materiais de baixo teor de carbono e presença de minerais resultantes do processo de combustão da biomassa.

De acordo com Gonzaga et al. (2021), o biocarvão é um material semelhante ao carvão ativado, já comumente utilizado nos tratamentos de águas residuais e como corretivo e condicionador de solos. O carvão ativado é caracterizado pela estrutura com significativa porosidade e expressiva área superficial, sendo considerado um material carbonáceo amorfo. Para sua produção, geralmente são utilizadas matérias-primas de origem fóssil (Tan et al., 2015). No tratamento de efluentes, é considerado um dos adsorventes mais antigos empregados e é bastante utilizado no processo de purificação para redução de vários poluentes para se atingir os padrões de lançamentos de efluentes nos corpos hídricos (Pimenta, 2018).

4.5.2. *Processo de produção (pirólise)*

De acordo com Silva et al. (2022b), a pirólise é o processo de decomposição termoquímica de hidrocarbonetos (ou materiais orgânicos) em temperaturas elevadas na ausência ou em atmosfera empobrecida de oxigênio, onde através do processo de carbonização, as substâncias orgânicas de cadeia longa, os polímeros de origem biológica ou sintética, se fracionam via craqueamento térmico e reações de condensação, proporcionando balanço energético positivo do sistema, devido à maior produção de energia do que de consumo.

Batista e Gomes (2021) afirmam que o processo de decomposição termoquímica em condições operacionais sob ausência de oxigênio no meio reacional ou, pelo menos, quase ausência, ocorre no intervalo de temperaturas entre 400 e 1200°C.

A operação do processo de pirólise pode ser categorizada com as nomenclaturas: lenta, rápida e “flash”, e está diretamente relacionada com as variáveis: temperatura, taxa de aquecimento e tempo de residência da fase vapor (Batista; Gomes, 2021).

A pirólise lenta ocorre sob oscilação de temperatura entre 300 e 500°C, mediante taxa de aquecimento compreendida entre 5 e 20°C/min com um tempo de residência variando de 5 a 30 minutos. A pirólise rápida acontece sob valores de temperatura por volta de 500°C, mediante taxa de aquecimento de cerca de 50°C/min, em tempo de residência menor do que 5 segundos (Singh et al., 2015). Enquanto a pirólise “flash” menos utilizada, é um caso particular

da pirólise rápida, geralmente ocorre sob variações de temperatura entre 300 e 1000°C com taxa de aquecimento muito maior do que 50°C/min, durante tempo de residência inferior a 2 segundos (Mohan et al., 2006).

De acordo com Trazzi et al. (2018), a temperatura de pirólise é o parâmetro mais relevante a ser considerado no processo de produção do biocarvão, pois o teor de carbono fixo está diretamente relacionado com o aumento da temperatura final de carbonização. Enquanto o rendimento da produção de biocarvão é inversamente proporcional à temperatura de pirólise.

Sun et al. (2014) reforçam que temperaturas de pirólise mais elevadas não apenas aumentam o teor de carbono de biocarvões, como também produzem biocarvões de maior estabilidade térmica por não começarem a se decompor no ar após 400-450°C.

Silva et al. (2022b) relatam que a pirólise vem se desenvolvendo como técnica de tratamento sustentável para diversos tipos de resíduos sólidos classificados como rejeitos, devido o seu potencial de promover a reciclagem de nutrientes, recuperação de energia e imobilização de metais pesados.

Além disso, a produção do biocarvão através do processo de pirólise contribui na eliminação de pesticidas, compostos farmacêuticos e microrganismos (Marcelino et al., 2020). Estudo de Barbosa et al. (2024) revelou a eliminação de cinco tipos de pesticidas com aplicação de biocarvões de lodo de esgoto produzidos com temperaturas de pirólise superiores a 400°C.

4.5.3. *Origem*

De acordo com Carvalho (2018), a origem do biocarvão está associada à observação de solos habitados por indígenas nos quais eram enterrados restos de vegetais e animais e com a ação da natureza se constatou que esses materiais beneficiavam a vida do solo e, por conseguinte a sua fertilidade.

O uso do biocarvão como corretivo de solo foi inspirado nas Terras Escuras Amazônicas, conhecidas como Terra Preta de Índio, que se caracterizam por possuírem significativa taxa de fertilidade e níveis elevados de carbono, resultado provavelmente decorrente da presença de biocarvões e restos de animais nesses solos. Com isso, o biocarvão (produto sólido da pirólise) surgiu como nova tecnologia e ferramenta política para enfrentar vários desafios ambientais (mudanças climáticas, produção de alimentos e gestão de resíduos) (Ritll et al., 2015).

Trazzi et al. (2018) relatam que estudos com o biocarvão já atingiram escala mundial envolvendo uma série de áreas de estudo, entre as quais se destacam: Ciências Ambientais, Energia, Ciência do Solo, Biotecnologia e Microbiologia. Dentre esses estudos, de acordo com

Xiang et al. (2020), vários trabalhos vêm discutindo os métodos de decomposição, caracterização e aplicações do biocarvão na remoção de diferentes contaminantes de soluções aquosas.

4.5.4. *Principais propriedades/características*

O biocarvão é um material carbonáceo de granulosidade fina com elevado teor de carbono orgânico, forte estrutura aromática, muito resistente à decomposição, altamente poroso, usualmente alcalino e com grande área de superfície específica (Silva et al., 2022b).

A composição química e estrutural do biocarvão é demasiadamente heterogênea, mas o pH é comumente superior a sete. Algumas propriedades estão presentes em todos os biocarvões, incluindo alto teor de carbono e grau de aromaticidade, o que pode explicar o seu alto nível de recalcitrância, capacidade de não se decompor ou apodrecer facilmente (Trazzi et al., 2018).

De acordo com Marcelino et al. (2020), as características do biocarvão dependem geralmente do seu material de origem e do processo de pirólise. A porosidade do biocarvão é o que determina a sua área superficial. Cuba et al. (2021) afirmam que devido a sua estrutura porosa que lhe confere elevada área superficial e presença de grupos funcionais oxigenados e aromáticos na sua superfície, este material pode ser considerado ótimo adsorvente, principalmente na remoção de contaminantes em meio aquoso.

O potencial do biocarvão como material adsorvente está relacionado ao seu poder de adsorção, intimamente ligado às forças de London ou de Van der Waals envolvidas entre a sua superfície porosa e as moléculas do fluído a ser tratado (Souza et al., 2021).

De acordo com Paulino et al. (2019), a condutividade elétrica é utilizada para especificar o caráter elétrico do biocarvão, assim quanto maior a quantidade de íons, maior será a condutividade elétrica. No processo de pirólise, quanto maior a temperatura, maior será a condutividade e consequentemente, maior a concentração de nutrientes.

Segundo Paula et al. (2019), o biocarvão apresenta características semelhantes às do carvão ativado, entre elas: capacidade de adsorção, elevada área superficial específica, microporosidade e capacidade de troca iônica.

O biocarvão pode ser aplicado para vários fins e estes vão depender de suas propriedades físicas e químicas. De acordo com Antunes et al. (2017), biocarvões com macroporos possuem boa capacidade de retenção de água, enquanto que os microporos não desempenham papel relevante quando aplicado como melhorador de solos para agricultura.

Quispe et al. (2022) afirmam que as principais propriedades do biocarvão que afetam sua capacidade de adsorver contaminantes orgânicos, inorgânicos e patogênicos presentes na

água são: alta porosidade, alta capacidade de troca catiônica, pH, grupos funcionais de superfície, reatividade da superfície, composição mineral e sua área de superfície específica.

De acordo com Enaime et al. (2020), estudos concluíram que a pirólise de alta temperatura geralmente resulta em biocarvões com maior área de superfície e volume de poros, tornando-o ideal para a adsorção de contaminantes orgânicos, enquanto os poluentes inorgânicos podem ser removido de forma mais eficaz pelo biocarvão produzido em baixa temperatura de pirólise, uma vez que tem mais grupos funcionais contendo oxigênio.

4.5.5. Principais usos

O biocarvão é um material com muitas potencialidades, possuindo assim, multifuncionalidades. Utilizado como filtro, tem inúmeras vantagens em comparação com outros tratamentos de baixo custo existentes (filtro de areia, ebulição, desinfecção solar, cloração), tais como: adsorvente de baixo custo e renovável, processado de biomateriais e com material de fácil acesso e prontamente disponível, tornando-o apropriado a comunidades menos favorecidas (Marcelino et al., 2020). É considerado bom material adsorvente para metais pesados, nutrientes e compostos orgânicos, incluindo fármacos, compostos policíclicos aromáticos, corantes, entre outros (Cuba et al., 2021).

Xiang et al. (2020) afirmam que o biocarvão se apresenta como novo tipo de material de carbono com grandes perspectivas de aplicação em diversos tratamentos de efluentes, podendo absorver nutrientes, como o nitrogênio e o fósforo, contribuindo para a remediação de poluentes. Pesquisas apontam o uso do biocarvão nos tratamentos de efluentes como sendo nova tendência por proporcionar melhorias para o meio ambiente, a fim de promover reduções de poluentes na água e no ar (Pimenta, 2018).

De acordo com Trazzi et al. (2018), quando aplicado no solo, o biocarvão apresenta as seguintes funcionalidades: pode aumentar o pH, a capacidade de troca de cátions, o teor de carbono orgânico e a disponibilidade de nutrientes; melhorar a estrutura do solo e a disponibilidade de água. O biocarvão de lodo de esgoto é uma possibilidade real de uso em aplicações agrícolas, produzindo aumento da produtividade de culturas agrícolas e florestais, a remediação de solos e a adsorção de poluentes (Silva et al., 2022b).

Gonzaga et al. (2021) afirmam que o uso do biocarvão tem o potencial de melhorar a qualidade dos agroecossistemas e de contribuir para a sustentabilidade ambiental, isso porque quando aplicado no solo, potencializa o sequestro de carbono, reduz emissões atmosféricas e aumenta a produtividade da planta. Além disso, facilita a atividade microbiana, reduz a

densidade e lixiviação de nutrientes, aumenta a temperatura do solo, acelera o transporte de nutrientes e a mineralização necessária para o crescimento das vegetações (Lima et al., 2020).

Com isso, o biocarvão vem sendo considerado alternativa importante para enfrentar grandes desafios, como a degradação da terra, a insegurança alimentar, a geração sustentável de energia e a gestão dos recursos hídricos e dos resíduos sólidos (Sato et al., 2020).

4.5.6. *Exemplos de aplicação do biocarvão na remoção de compostos/contaminantes*

Conforme já relatado, estudos com o biocarvão já alcançaram proporções de escala mundial envolvendo diversas áreas e têm crescido muito nos últimos anos. Já amplamente utilizado como fertilizantes para solos no condicionamento e sequestro de carbono, novos estudos vêm demonstrando o seu potencial como ótimo adsorvente no tratamento de águas residuais, águas pluviais e águas industriais (Quispe et al., 2022).

No que se refere ao tratamento de efluentes, a utilização de filtros biológicos de biocarvão pode representar técnica promissora para a diminuição de fármacos e outros compostos recalcitrantes presentes nos mananciais de abastecimento público (Borges et al., 2016). Estudos de Cuba et al. (2021) revelaram que foi possível a adsorção do corante tartazina com eficiência superior a 80% utilizando biocarvão produzido a partir de lodo de estação de tratamento de esgoto. Já pesquisas de Carvalho et al. (2021) constataram a capacidade de adsorção do biocarvão do bagaço da laranja na remoção do fármaco tetraciclina de 100% em águas residuárias domésticas, onde a eficiência da filtração foi em torno de 25% superior a filtração utilizando carvão ativado convencional.

Passos et al. (2022) evidenciaram eficiência de adsorção de coliformes termotolerantes de 99,07% de águas residuais domésticas, utilizando um filtro de biocarvão do bagaço da laranja, objetivando o reúso desses efluentes na irrigação para agricultura.

Biocarvões produzidos a partir de lodos pirolisados apresentam-se como alternativa mais sustentável para remoção de nitrogênio amoniacal e ainda apresentam desempenho similar aos carvões ativados (Monteiro et al., 2019). Porto e Cuba (2019) conseguiram taxa de remoção de aproximadamente 80% do nitrogênio amoniacal utilizando a filtração com biocarvão produzido a partir do lodo de estações de tratamento de efluentes.

De acordo com Carmona (2021), alguns estudos realizados para avaliar a capacidade de adsorção na remoção de metais pesados em ambientes aquosos, utilizando principalmente resíduos da cana de açúcar, apresentaram eficiência de remoção de 96% para o chumbo e acima de 99% para cobre e cromo. Já experimentos realizados por Denbinski et al. (2019), utilizando biocarvões de serragem, alcançaram remoção de até 81,74% de cromo. Enquanto que

biocarvões produzidos com casca de coco verde também se mostraram eficientes na remoção de metais tóxicos, como o cádmio (Cd^{2+}), apresentando taxa de redução de 98,5% (Sousa et al., 2007).

Nos trabalhos de Pimenta (2018), biocarvões produzidos da carbonização da borra de café utilizados no tratamento de efluentes de indústrias de café apresentaram eficiências quanto à remoção de cor de até 88%, DQO até 80% e cloretos no máximo 87%, possibilitando o reúso desses efluentes em processos internos das indústrias.

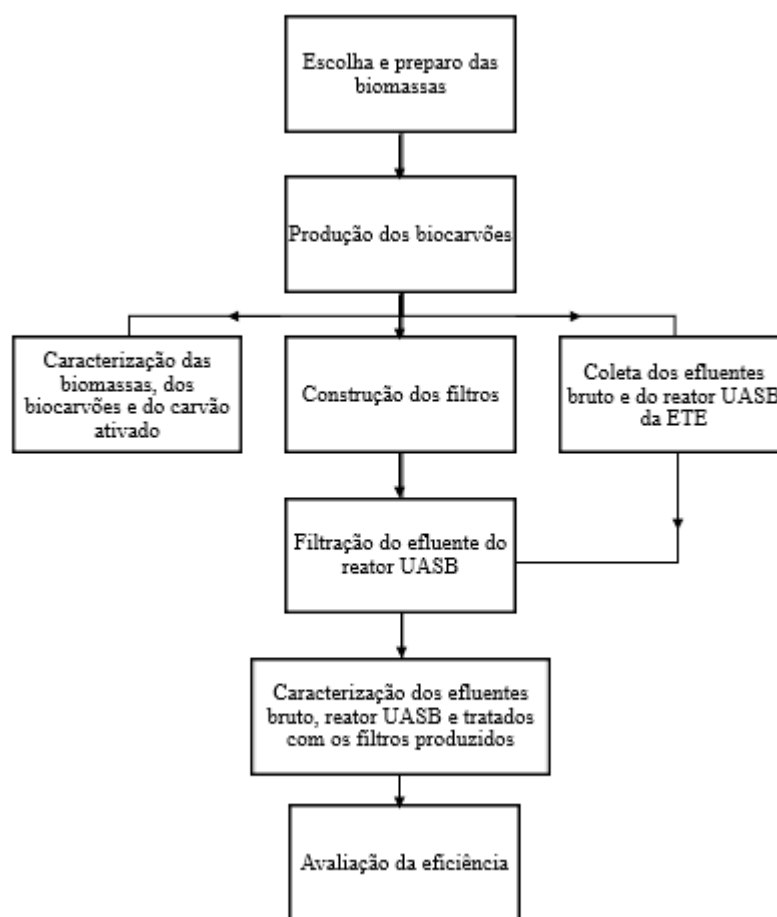
Biocarvões de madeira produzidos por Ribeiro (2016), para aplicação no tratamento de esgotos domésticos, apresentaram as seguintes taxas de remoção dos parâmetros físico-químicos analisados: 71,5% para DQO, 100% para nitrogênio total, 69,9% para o fósforo, 83,5% para os sólidos totais, 81,6% para sólidos fixos e 96% para os sólidos voláteis. Já Huggins et al. (2016) conseguiram remoção máxima de até 94% da DQO utilizando biocarvões de derivados de madeira no tratamento de águas residuárias.

Além disso, estudo de Menezes et al. (2022) relatam diversas aplicações do biocarvão no tratamento de águas residuais, dentre as quais, remoção de fármacos, corantes, fósforo, nitrogênio, amônio e compostos aromáticos, micropoluentes e nutrientes.

5. MATERIAL E MÉTODOS

Para o cumprimento dos objetivos propostos, foram definidas as seguintes etapas para o desenvolvimento da pesquisa como pode ser observado na Figura 1, onde ao final foi realizada uma avaliação da eficiência dos filtros de biocarvão em relação ao filtro de carvão ativado, já bastante consolidado no tratamento complementar de esgotos sanitários.

Figura 1 - Fluxograma das etapas da pesquisa.



Fonte: Autor (2024).

5.1. Escolha e preparo das biomassas

Para a execução desse estudo, foram utilizados três tipos de biomassas agroindustriais: casca de coco (casca lisa e camada fibrosa que correspondem, respectivamente, às camadas denominadas de epicarpo e mesocarpo), sabugo de milho e bagaço de cana-de-açúcar. Esses resíduos foram coletados de feiras públicas do município de Itabaianinha – SE.

A escolha dessas biomassas foi motivada devido à grande quantidade de trabalhos desenvolvidos sobre esses resíduos agroindustriais na produção de biocarvões, para os mais variados fins. Têm-se, por exemplo, os trabalhos de Gonzaga et al. (2021), Sousa et al. (2007)

e Ribeiro (2016) que caracterizaram a casca de coco, Soares (2022), empregando o sabugo de milho na remoção de agrotóxicos, e Santana et al. (2021) e Sun et al. (2014), reaproveitando o bagaço da cana-de-açúcar.

Além disso, essa escolha também foi incentivada devido à considerável produção agrícola dessas lavouras a nível nacional e estadual, e consequentemente a elevada geração de resíduos provenientes das agroindústrias que utilizam essas lavouras como insumos, buscando assim uma alternativa para o descarte adequado desses resíduos.

Segundo dados do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) (2021), o Brasil é o maior produtor mundial de cana-de-açúcar com produção anual aproximada de 716 milhões de toneladas, em que o estado de Sergipe contribui com 2 milhões de toneladas anuais (16º maior produtor no ranking nacional).

No tocante à produção do milho, o Brasil é o terceiro maior produtor mundial com aproximadamente 88 milhões de toneladas anuais, onde Sergipe participa com 741 mil toneladas (15º maior produtor no ranking nacional). Já, quanto à produção do coco, o Brasil é o quinto maior produtor mundial com uma produção anual de 1.638.573 frutos, com Sergipe colaborando com 164.981 frutos (4º maior produtor no ranking nacional, perdendo apenas para os estados do Ceará, Bahia e Pará) (IBGE, 2021).

Para a preparação das biomassas, inicialmente, os resíduos foram dispostos em formas metálicas (Figura 2) para secagem natural em contato com a radiação solar durante 72h. Feito isso, os materiais foram levados para o Laboratório de Materiais de Construção e Estruturas (LAMCE) do Departamento de Engenharia Civil (DEC) da Universidade Federal de Sergipe (UFS) para pesagem em balança analítica e secagem artificial utilizando estufa (Figura 3) à temperatura de 60°C por 24h (Santana et al., 2021). A secagem se fez necessária, pois a redução do teor de umidade aumenta a energia de eficiência do processo de pirólise.

Convém ressaltar que foram realizados pré-testes com secagem em estufa à temperatura de 105°C por 24h, porém houve princípio de queima dos materiais, principalmente da casca do coco, provavelmente por já estarem bastante secos. Sendo assim, foi adotada temperatura mais baixa (60°C) por 24h que se apresentou bastante eficiente para secagem dos materiais.

Figura 2 - Resíduos de casca de coco, sabugo de milho e bagaço de cana-de-açúcar colocados em formas metálicas para secagem natural.



Fonte: Autor (2024).

Figura 3 - Resíduos de casca de coco, sabugo de milho e bagaço de cana-de-açúcar em estufa para secagem artificial.



Fonte: Autor (2024).

Após a secagem em estufa e transcorrido o tempo de resfriamento dos resíduos, os materiais foram novamente pesados para o cálculo do teor de umidade em base úmida (Equação 1).

$$u = \frac{(Ma - Md)}{Ma} \times 100 \quad (1)$$

Em que:

u: teor de umidade em base úmida (%);

Ma: massa do material antes da secagem na estufa (kg);

Md: massa do material depois da secagem na estufa (kg).

De acordo com Santos (2015), quanto menor o tamanho das partículas, maior a superfície de contato do material adsorvente e, consequentemente, maior a taxa de adsorção. Diante disso, para obtenção de granulometria menor dos grãos dos resíduos, os materiais foram triturados (Figura 4), utilizando um moinho de facas no Laboratório de Estudo em Engenharia Hídrica do Departamento de Engenharia Agrícola da UFS. Além disso, os materiais triturados foram peneirados (Figura 5) na peneira de malha nominal #10 (abertura de malha de 2 mm), conforme metodologia apresentada nos trabalhos de Devens et al. (2018) e Gonzaga et al. (2021). Este procedimento ocorreu no Laboratório de Materiais de Construção e Estruturas do Departamento de Engenharia Civil da UFS.

Figura 4 - Materiais triturados no moinho de facas.



Fonte: Autor (2024).

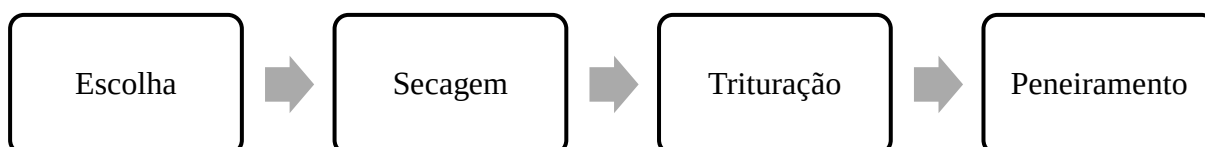
Figura 5 - Amostra dos materiais peneirados na peneira de abertura de malha de 2 mm.



Fonte: Autor (2024).

As atividades descritas anteriormente para escolha e preparo das biomassas podem ser sintetizadas no fluxograma disposto na Figura 6.

Figura 6 - Fluxograma das atividades de escolha e preparo das biomassas.



Fonte: Autor (2024).

5.2. Produção dos biocarvões

Para o processo de pirólise das biomassas selecionadas, foi utilizado um forno tipo mufla do Laboratório de Estudo em Engenharia Hídrica do Departamento de Engenharia Agrícola da UFS. As biomassas foram colocadas em cadinhos de porcelana com capacidade de 100 mL com tampa (Figura 7) para simular ambiente com oxigênio limitado e evitar a formação de cinzas no biocarvão. Conforme Marcelino et al. (2020), as cinzas apresentam baixo teor de carbono e o biocarvão, significativo teor de carbono. Assim, os cadinhos com as biomassas foram devidamente pesados para verificação do rendimento e colocados na mufla (Figura 8) durante 1 hora sob a temperatura de 400°C (Feitosa et al., 2020; Lima et al., 2020) para o

processo de carbonização, sob taxa de aquecimento de 55°C/min, enquadrando o processo de pirólise como lento.

A temperatura de 400°C para o processo de pirólise das biomassas foi escolhida para que não houvesse a perda da lignina, material aromático de fundamental importância para a formação estrutural dos biocarvões, um dos últimos componentes a se degradar nas biomassas (Soares, 2022). Ainda segundo esse autor, durante o processo de queima, é possível eliminar a água e os materiais voláteis da biomassa até a temperatura de 250°C, entre 250 e 400°C ocorre a degradação da celulose e da hemicelulose e, em seguida, até 500°C, a eliminação da lignina.

Figura 7 - Biomassas colocadas nos cadinhos para carbonização.



Fonte: Autor (2024).

Figura 8 - Cadinhos colocados na mufla para o processo de pirólise.



Fonte: Autor (2024).

Após o processo de pirólise, os cadinhos foram colocados em dessecador para evitar absorção de umidade com o choque de temperatura do ambiente. Feito isso, os biocarvões foram pesados novamente para posterior análise de rendimento.

Para o cálculo do rendimento da produção de cada biocarvão foi utilizada a Equação 2 descrita abaixo.

$$r = \frac{M_{bp}}{M_{bu}} \times 100 \quad (2)$$

Em que:

r: rendimento do material pirolisado (%);

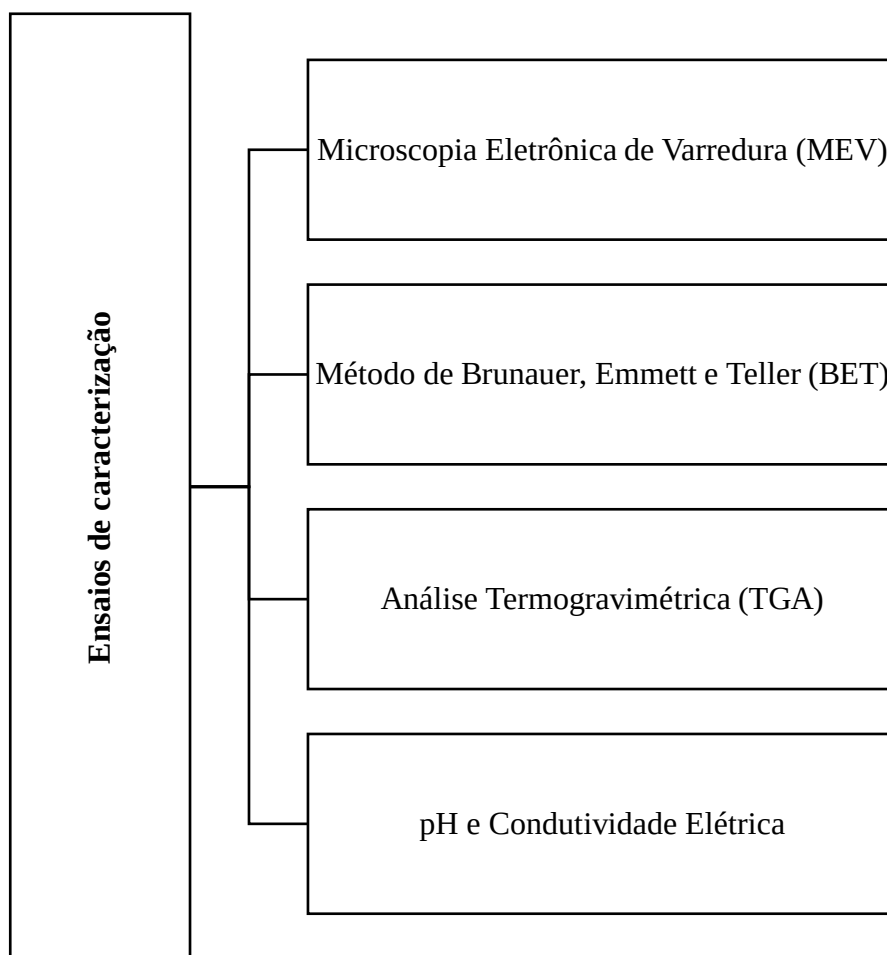
M_{bp}: massa do biocarvão produzido (g);

M_{bu}: massa da biomassa utilizada (g).

5.3. Caracterização das biomassas, dos biocarvões e do carvão ativado

Para caracterização das biomassas, dos biocarvões e do carvão ativado foram analisados área superficial, forma e tamanho dos grãos, volume dos poros, porosidade média, morfologia, pH, condutividade elétrica e comportamento térmico. Para obtenção das características citadas anteriormente, foram realizados os ensaios dispostos na Figura 9.

Figura 9 - Ensaio para caracterização das biomassas, dos biocarvões e do carvão ativado.



Fonte: Autor (2024).

De acordo com Carvalho (2018), as técnicas de maior importância e mais utilizadas para o conhecimento das propriedades físico-químicas de biocarvões são: Análise Termogravimétrica (TGA), Microscopia de Varredura Eletrônica (MEV) Método de *Brunauer-Emmett-Teller* (BET).

5.3.1. *Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)*

A microscopia eletrônica de varredura consiste na avaliação qualitativa das amostras, oferecendo imagem da topografia de sua superfície, permitindo análise detalhada de sua estrutura, principalmente, na detecção da existência e do tamanho dos poros dos materiais.

Para aquisição das imagens, as amostras foram fixadas em stubs, com fitas de carbono adesivo e metalizadas com a finalidade de melhorar a visualização/contraste das superfícies, aplicando fino filme de prata em metalizador da marca Kurt J. Lesker, modelo 108. Este procedimento foi realizado no Laboratório de Corrosão e Nanotecnologia (LCNT) do Núcleo de Petróleo e Gás (NUPEG) da UFS.

As imagens foram obtidas a partir de um microscópio eletrônico da marca HITACHI, modelo TM 3000, operado sob alto vácuo, com aceleração do feixe de elétrons de 15 kV e ampliações das imagens variando de 50 a 10.000 vezes, no Centro de Laboratórios de Química Multiusuários (CLQM) da UFS.

5.3.2. *Método de Brunauer, Emmett e Teller (BET)*

Este método de análise, desenvolvido pelos pesquisadores Brunauer, Emmett e Teller (BET), é comumente aplicado para a determinação da área superficial de materiais adsorventes e consiste no processo de adsorção de um gás a dada pressão relativa P/P_0 formando monocamada de cobertura sobre a superfície do material adsorvente (Costa Junior, 2014).

O método permite estabelecer associação entre a energia de adsorção na primeira camada adsorvida e a magnitude das interações adsorvente/adsorbato, onde quanto maior a quantidade de gás adsorvido, maior será a área superficial do material adsorvente. Com isso, é possível se obter análises das áreas superficiais, volume e dimensão dos poros.

Para realização desse método, foi utilizado um analisador de adsorção, da marca Quantachrome Instruments, modelo Nova 1000e, do Condomínio de Laboratórios Multiusuários do Departamento de Ciência e Engenharia de Materiais (CLMDCEM) da UFS. As análises das amostras foram realizadas utilizando nitrogênio líquido (N_2) a 77 K, faixa de pressão relativa entre 0,05 e 0,99, com degasagem a 100°C durante 2h, empregando 300 mg de cada amostra de material.

5.3.3. *Análise Termogravimétrica (TGA)*

A análise termogravimétrica consiste na pesagem contínua de uma amostra em função da variação da temperatura, onde as curvas de variação de massa em função da temperatura permitem analisar as seguintes características: a estabilidade térmica da amostra, a composição e a estabilidade dos compostos constituintes (Goncalves, 2016).

Para avaliação do comportamento e estabilidade térmica, as biomassas, os biocarvões e o carvão ativado foram analisados por TGA, utilizando um analisador térmico simultâneo da marca NETZSCH, modelo STA 449 F1 Jupiter, do Condomínio de Laboratórios Multiusuários do Departamento de Ciência e Engenharia de Materiais (CLMDCEM) da UFS.

Uma cápsula de alumina foi empregada para comportar as amostras durante as análises, onde foram utilizadas aproximadamente 11 mg de cada material. Uma faixa de temperatura, a partir da temperatura ambiente (30°C) até 1000°C, foi utilizada e aplicada a razão de aquecimento de 10°C/min, com fluxo de gás nitrogênio de 50 mL/min para obtenção dos resultados.

5.3.4. *pH e Condutividade Elétrica*

Para determinação dos valores de pH e condutividade elétrica das amostras, inicialmente, pesou-se 0,2 g de cada material e adicionou-se 20 mL de água destilada sobre as amostras em béqueres (Goncalves, 2016). Feito isso, com auxílio de um pHmetro e um condutivímetro foram obtidos os respectivos valores das amostras.

Os referidos ensaios foram realizados no Laboratório de Saneamento e Meio Ambiente (SAMA) do Departamento de Engenharia Civil da UFS.

5.4. **Coleta dos efluentes bruto e do reator UASB da ETE da UFS**

As amostras líquidas utilizadas nessa pesquisa foram provenientes da Estação de Tratamento de Esgotos (ETE) da Universidade Federal de Sergipe (UFS) *campus* São Cristóvão, localizado na Avenida Marcelo Deda Chagas, S/N, Bairro Rosa Elze, São Cristóvão – SE (Figura 10).

Figura 10 - Delimitação da área de influência da ETE da UFS *campus* São Cristóvão.



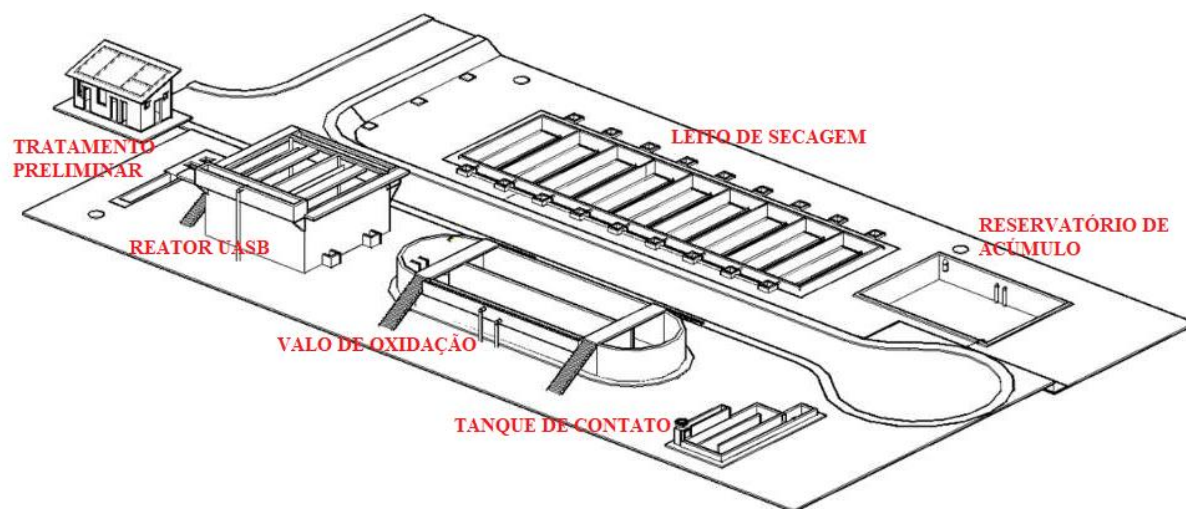
Fonte: Oliveira (2020).

A ETE da UFS é composta por: tratamento preliminar (gradeamento, caixa de areia e calha Parshall), tratamento secundário (reator anaeróbico de manta de lodo – UASB, seguido por Valo de Oxidação), tratamento terciário (Tanque de Contato de cloração), Reservatório de Acúmulo e Leito de Secagem de Lodo (Figura 11).

De acordo com o Manual de Operação da referida ETE (Silva, 2012), não há uma unidade específica para o tratamento primário, a remoção dos sólidos suspensos e parte da matéria orgânica ocorre no reator UASB. O reator UASB utilizado (Figura 12) é formado por câmara de digestão, separador trifásico, zona de transição, zona de sedimentação e zona de acumulação de gás, possuindo estimativa de remoção de DQO de 63,68% e a estimativa de concentração de DQO no efluente de 217,80 mg/L (Silva, 2012). Porém, de acordo com Oliveira (2019), a eficiência de projeto do reator UASB não está sendo atingida, pois a redução de DQO vem alcançando em média de 2,6% e no máximo de 35,2%, chegando a ter valores negativos de eficiência em alguns momentos.

O efluente tratado dessa ETE tem como destino final um pequeno riacho, afluente do rio Poxim, que se localiza nas proximidades do *campus* da universidade (Oliveira, 2020).

Figura 11 - Representação em perspectiva da ETE da UFS *campus* São Cristóvão



Fonte: Adaptado de Oliveira (2019).

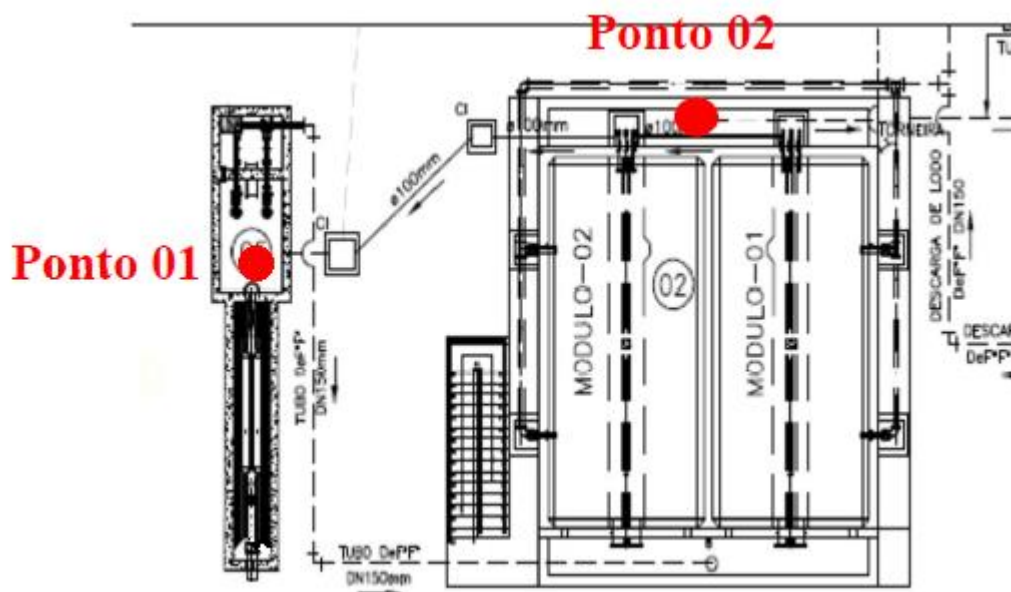
Figura 12 -Vista superior dos reatores UASB da ETE da UFS.



Fonte: Autor (2024).

As coletas foram realizadas em dois pontos (Figura 13) da Estação de Tratamento de Esgotos para análise dos parâmetros físico-químicos previamente estabelecidos das amostras coletadas do Ponto 01 (referente ao esgoto bruto, depois do gradeamento) e Ponto 02 (referente ao efluente do reator UASB). Para utilização nos filtros de biocarvão e carvão ativado, foram coletadas amostras do Ponto 02.

Figura 13 - Pontos de coleta das amostras.



Fonte: Adaptado de Oliveira (2019).

As amostras foram coletadas em garrafas plásticas de 2 litros e acondicionadas em refrigerador do Laboratório de Saneamento e Meio Ambiente (SAMA) do Departamento de Engenharia Civil da UFS para posterior análises e filtração.

Convém ressaltar que foram executadas duas coletas, uma no dia 08 de agosto de 2023 (durante o período letivo de aulas) e outra, dia 24 de outubro de 2023 (durante as férias do período letivo), para comparação entre os períodos de aula e recesso acadêmico.

5.5. Construção dos filtros

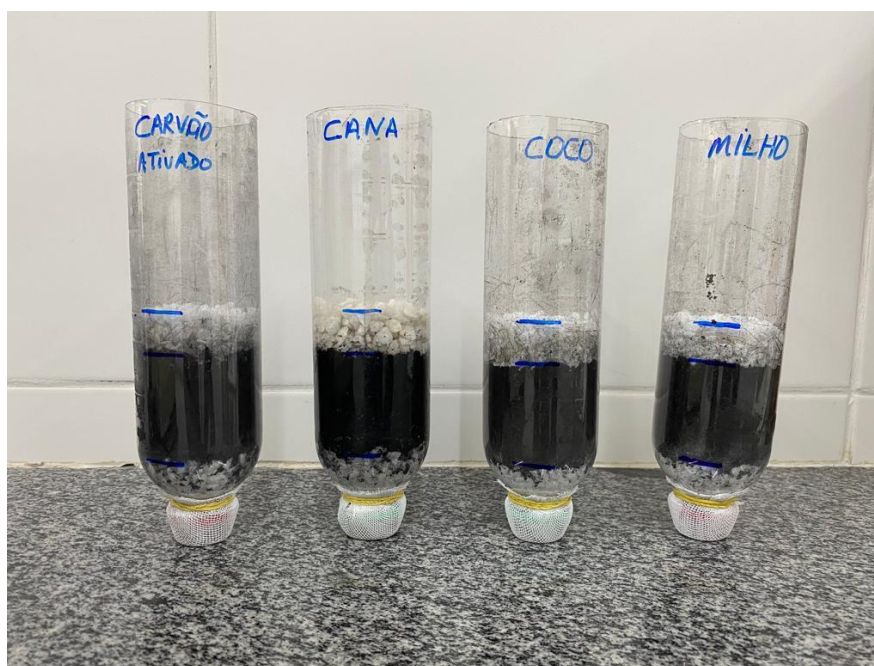
A estrutura experimental foi constituída pela montagem de quatro filtros adsorventes, um de cada material (biocarvão de casca de coco, biocarvão de sabugo de milho, biocarvão de bagaço de cana-de-açúcar e carvão ativado), para a promoção da filtração do efluente advindo do reator UASB da referida ETE.

Os filtros adsorventes foram construídos, empregando garrafas plásticas de 500 mL de diâmetro aproximado de 6 cm e comprimento de 20 cm. A definição da composição e estruturação das camadas constituintes dos filtros foi baseada no trabalho de Carvalho (2018),

no entanto, foram realizados pré-testes visando obter configuração que evitasse ao máximo a passagem de partículas dos materiais adsorventes empregados. Com isso, os filtros ficaram com a seguinte estruturação: uma camada superior de 2 cm de dolomita, uma camada intermediária do material absorvente de 5 cm e uma camada inferior de 3 cm de dolomita (Figura 14). Nas extremidades inferiores dos filtros foram colocadas telas de nylon presas com uma borracha elástica para sustentação de todo o sistema e impedir a passagem dos materiais.

A dolomita foi empregada com o objetivo apenas de evitar a passagem das partículas constituintes dos materiais adsorventes, fazendo assim uma espécie de confinamento dos mesmos (Carvalho, 2018). A dolomita se apresenta como material inerte, pH alcalino e comumente utilizada para decoração de aquários.

Figura 14 - Filtros produzidos.



Fonte: Autor (2024).

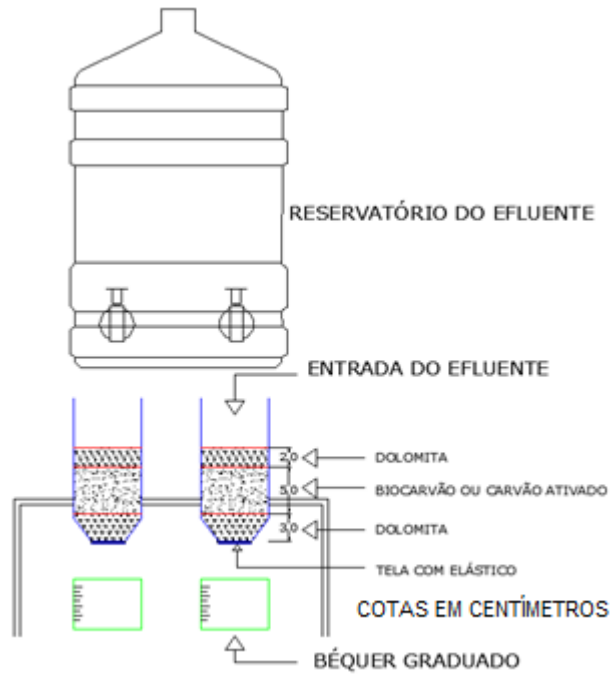
A construção dos filtros foi realizada no Laboratório de Saneamento e Meio Ambiente e no Laboratório de Materiais de Construção e Estruturas, ambos do Departamento de Engenharia Civil da UFS.

5.6. Filtração do efluente do reator UASB

Para realização do processo de filtração, os filtros adsorventes foram apoiados em uma bancada de madeira e posicionados abaixo de um reservatório (galão de 20 litros) contendo o efluente (Figuras 15 e 16), de modo a realizar a filtração, com fluxo contínuo e descendente,

por meio da abertura e fechamento de uma torneira conectada ao reservatório, de modo a controlar a vazão de abastecimento manualmente.

Figura 15 - Protótipo do sistema filtrante.



Fonte: Autor (2024).

Figura 16 - Sistema filtrante construído.



Fonte: Autor (2024).

Previamente às filtrações, foram realizadas limpezas nos filtros com água destilada (volume de 500 mL), de modo a diminuir a passagem de partículas constituintes dos meios filtrantes. Feito isso, iniciou-se a filtração, onde os efluentes filtrados foram coletados em béqueres graduados de 400 mL, anotando-se o tempo de filtração de cada amostra, a cada 400 mL coletados (Ribeiro, 2016).

Foram realizadas duas filtrações, Filtração 01 com o efluente coletado no dia 08/08/2023 e Filtração 02 com o efluente coletado no dia 24/10/2023, onde foram utilizados filtros diferentes para cada filtração, porém com as mesmas configurações descritas anteriormente na Figura 15.

As amostras filtradas foram armazenadas em garrafas plásticas de 500 mL com tampa devidamente identificadas e colocadas em um refrigerador do Laboratório de Saneamento e Meio Ambiente do Departamento de Engenharia Civil da UFS, para posterior caracterização.

Convém ressaltar, que foi estabelecido inicialmente que seriam coletadas 10 amostras de cada filtro ou até o filtro saturar, o que ocorresse primeiro.

5.7. Caracterização das amostras líquidas

Para caracterização do esgoto bruto, efluente do reator UASB e amostras filtradas, foram realizadas as análises dos seguintes parâmetros físico-químicos: cor aparente, turbidez, DQO, sólidos totais e sólidos suspensos totais.

As análises físico-químicas foram executadas no Laboratório SAMA do Departamento de Engenharia Civil da UFS, seguindo as orientações do *Standard Methods for Examination of Water and Wastewater* (Quadro 1) (APHA, 2017).

Quadro 1 - Metodologia das análises físico-químicas.

Parâmetro analisado	Método aplicado	Equipamento utilizado
Cor aparente (uH)	Espectrofotométrico	Multiparamétrico DR/890
Turbidez (uT)	Nefelométrico	Multiparamétrico DR/890
DQO (mg/L)	Espectrofotométrico	Multiparamétrico DR/890
Sólidos totais (mg/L)	Gravimétrico	Estufa
Sólidos suspensos totais (mg/L)	Gravimétrico	Estufa

Fonte: Autor (2024).

5.8. Avaliação da eficiência

Após as caracterizações do esgoto bruto, do efluente do reator UASB e das amostras filtradas, foram avaliadas as eficiências do tratamento aplicado para os parâmetros físico-químicos anteriormente estabelecidos através da aplicação da Equação 3.

$$e = \frac{V_0 - V}{V_0} \times 100 \quad (3)$$

Em que:

e: Eficiência do tratamento (%);

V_0 : Valor inicial do parâmetro analisado (valor referente ao parâmetro do efluente pós-reator UASB);

V: Valor final do parâmetro analisado (valor referente ao parâmetro do efluente filtrado).

5.9. Estudo estatístico

Para as análises estatísticas, inicialmente foi aplicado o teste de normalidade de Anderson Darling das séries de dados coletados de cada um dos parâmetros físico-químicos das duas coletas das filtrações realizadas por cada filtro de biocarvão. Esse teste visou avaliar se a distribuição dos dados coletados apresentava distribuição normal ou não, testando as seguintes hipóteses:

H_0 : Os dados seguem distribuição normal;

H_1 : Os dados não seguem distribuição normal.

Se p-valor fosse maior que 0,05, a hipótese nula (H_0) deveria ser aceita, rejeitando-se assim a hipótese alternativa (H_1). E, caso p-valor fosse menor que 0,05, a hipótese alternativa (H_1) seria aceita, excluindo-se a hipótese nula (H_0).

Assim, de posse dos resultados desses testes, pode-se realizar os testes de homogeneidade de cada par de série de dados dos parâmetros físico-químicos dos filtros testados. Aplicou-se o Teste de Mann-Whitney para duas amostras independentes, quando pelo menos uma das séries de dados não apresentava distribuição normal (perfil não paramétrico), e o Teste ANOVA, para os pares de séries de dados que apresentavam distribuição normal (perfil paramétrico).

Por fim, foi realizada comparação estatística entre as séries de dados coletados de cada parâmetro físico-químico analisado dos filtros produzidos, visando identificar qual filtro seria mais eficiente estatisticamente na melhoria de cada parâmetro físico-químico. Para isso, foi utilizado o Teste de Kruskal-Wallis para identificar se existiam diferenças significativas nas

eficiências observadas para cada parâmetro dos filtros. Esse método não paramétrico geralmente é usado para comparações de três ou mais amostras independentes de tamanhos iguais ou diferentes.

6. RESULTADOS E DISCUSSÃO

6.1. Escolha e preparo das biomassas

Inicialmente, com relação a escolha e preparo das amostras das biomassas para a produção dos biocarvões, foram obtidos os dados relatados na Tabela 1, no que se refere as massas das biomassas coletadas e processadas.

Tabela 1 - Dados iniciais da coleta e preparação das biomassas para produção dos biocarvões.

Dado coletado	Biomassa		
	Casca de coco	Sabugo de milho	Bagaço de cana-de-açúcar
Massa inicial da amostra (kg)	2,16	2,23	1,27
Massa da amostra após secagem em estufa (kg)	1,89	2,02	1,17
Massa da amostra seca em estufa após peneiramento (kg)	0,33	0,72	1,02
Massa separada para produção do biocarvão (kg)	0,20	0,72	0,31

Fonte: Autor (2024).

De posse dos dados da Tabela 1 e utilizando a Equação 1, foram calculados os teores de umidade em base úmida (%) das biomassas selecionadas (Tabela 2), onde pode-se observar que a biomassa do bagaço de cana-de-açúcar apresentou o menor teor de umidade (7,87%) dentre os resíduos.

Tabela 2 - Teor de umidade em base úmida das biomassas (%).

Dado coletado	Biomassa		
	Casca de coco	Sabugo de milho	Bagaço de cana-de-açúcar
Teor de umidade em base úmida (%)	12,50	9,42	7,87

Fonte: Autor (2024).

De acordo com Couto (2009), o teor de umidade influencia significativamente no processo de pirólise e no poder calorífico das biomassas. Há influência negativa da umidade sobre o poder calorífico na pirólise de materiais orgânicos, como a madeira e entre outros, onde a umidade não pode superar o valor de 70% na base úmida, porque a queima poderá ser dificultada, necessitando assim de fonte externa de calor mais intensa (Ferreira et al., 2010).

Assim, as biomassas que apresentam menor percentual de teor de umidade são as mais recomendadas para produção do biocarvão, tendo em vista a dificuldade e encarecimento do processo devido à perda de calor nos gases de combustão em forma de vapor de água (Quirino et al., 2005).

Diante do exposto, pode-se observar que todas as biomassas escolhidas apresentaram resultados promissores no tocante ao teor de umidade dos resíduos, devido à ausência de teores superiores a 70%. Porém estudos realizados por Macêdo (2012) apresentarem teores de umidade inferiores a 2,5%, utilizando resíduos de fibra de coco, laranja, acerola, banana e caju misturados em certas proporções e secos em estufa à 105°C. Por outro lado, trabalhos de Fiorentin et al. (2012) apresentaram significativo teor de umidade para o bagaço da laranja em torno de 85% em base úmida.

6.2. Produção dos biocarvões

Conforme citado anteriormente, os biocarvões foram produzidos à temperatura de pirólise de 400°C com duração de 1h, porém foram realizados pré-testes, no tocante ao tempo de queima, onde foi percebido que utilizando-se duração de 2h havia a formação de cinzas nos biocarvões de todas as biomassas selecionadas, comprometendo, assim, a integridade e qualidade das amostras.

Durante o processo de produção dos biocarvões, foi percebido também que qualquer contato dos biocarvões recém-produzidos com oxigênio do ambiente levava a formação de cinzas, logo, foi tomado o cuidado de se evitar a exposição do biocarvão com esse comburente, através da utilização dos cadinhos devidamente tampados e do dessecador.

Carvalho (2018) afirma que o teor de cinzas é um fator que pode influenciar bastante nos valores da área superficial dos biocarvões, umas das principais propriedades desses materiais, podendo preencher ou bloquear o acesso aos microporos de suas estruturas, reduzindo consequentemente suas capacidades adsorptivas.

Diante disso, as Figuras 17, 18 e 19 ilustram os biocarvões produzidos, respectivamente, da casca de coco, do sabugo de milho e do bagaço de cana-de-açúcar.

Figura 17 - Biocarvão produzido da casca de coco.



Fonte: Autor (2024).

Figura 18 - Biocarvão produzido do sabugo de milho.



Fonte: Autor (2024).

Figura 19 - Biocarvão produzido do bagaço de cana-de-açúcar.



Fonte: Autor (2024).

Com os dados coletados na fase de produção dos biocarvões (Tabela 3) e utilizando a Equação 2, foram calculados os rendimentos das produções dos materiais pirolisados.

Tabela 3 - Dados da produção dos biocarvões.

Dado coletado	Biomassa		
	Casca de coco	Sabugo de milho	Bagaço de cana-de-açúcar
Massa da biomassa utilizada (g)	197,96	723,05	306,85
Massa do biocarvão produzido (g)	71,09	219,72	91,16
Taxa de rendimento (%)	35,91	30,39	29,71

Fonte: Autor (2024).

Na literatura, Soares (2022) obteve rendimento de 42% para o biocarvão do sabugo de milho produzido a uma temperatura de pirólise de 400°C por 1h em mufla, porém a biomassa foi colocada em secagem em estufa a 100°C por 24h, o que pode ter ajudado no aumento do

rendimento da produção do biocarvão, tendo em vista a maior redução do teor de umidade do resíduo.

Sabendo-se que o aumento da temperatura de pirólise diminui o rendimento dos biocarvões (Trazzi et al. 2018), estudo de Santana et al. (2021) apresentou rendimentos de 23% e 29%, respectivamente, para biocarvões do bagaço de cana-de-açúcar e do bagaço de laranja, produzidos a 500°C. Enquanto que a pesquisa de Costa Júnior (2014) apresentou rendimentos variando entre 34,1% e 15,7% para biocarvões produzidos com a casca de coco com temperaturas de pirólise oscilando entre 580 e 900°C, respectivamente.

Diante do apresentado, os biocarvões produzidos nesta pesquisa apresentaram rendimentos compatíveis com os resultados obtidos na literatura, dentro das condições aos quais foram produzidos (400°C por 1h, em mufla), variando entre 30 e 36% respectivamente para casca de coco e sabugo de milho.

6.3. Caracterização das biomassas, dos biocarvões e do carvão ativado

6.3.1. Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

Com a realização da MEV, foi possível verificar se houve alterações significativas na morfologia das biomassas *in natura* em comparação com a dos biocarvões produzidos dos resíduos agroindustriais selecionados, como também uma análise comparativa da estrutura do carvão ativado (Figura 20) com os biocarvões fabricados.

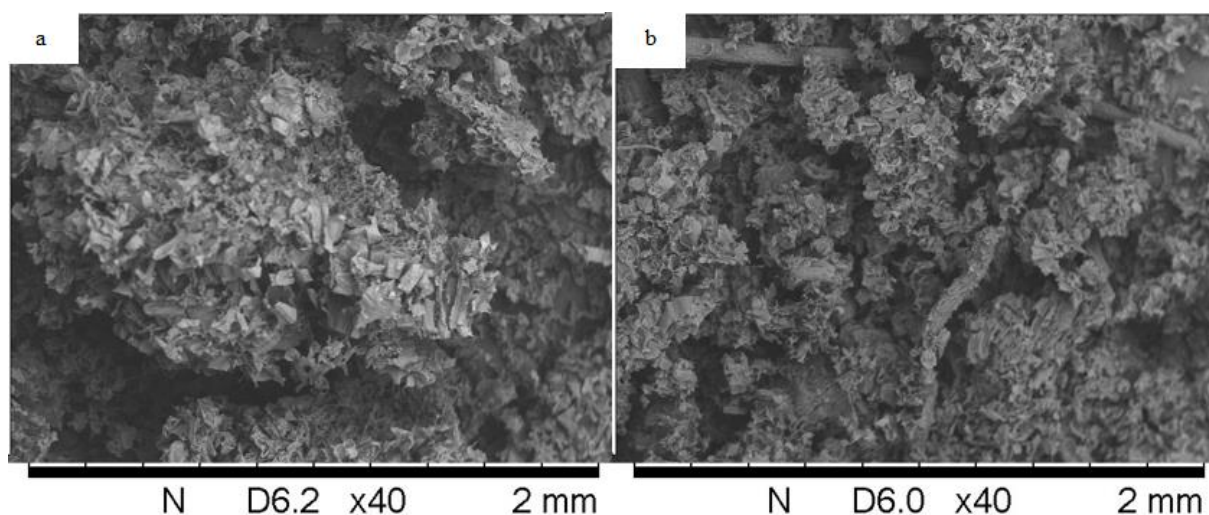
Figura 20 - Carvão ativado.



Fonte: Autor (2024).

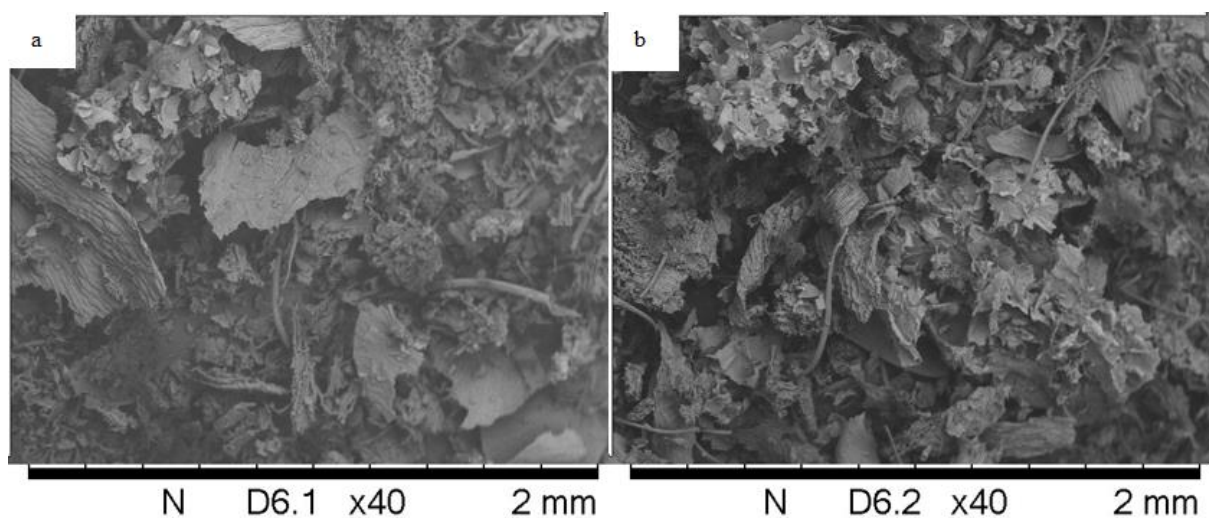
Ao analisar as imagens obtidas (Figuras 21, 22 e 23) com taxa de aproximação de 40 vezes, pode-se observar que grande parte das estruturas das biomassas foram conservadas nos biocarvões de todos os resíduos, como também constatado no estudo de Carvalho (2018). Porém, no biocarvão da casca de coco, percebeu-se diminuição do tamanho dos poros do material. Já nos biocarvões do sabugo de milho e do bagaço da cana-de-açúcar, observou-se um leve aumento da quantidade de poros dos materiais.

Figura 21 - Imagens de MEV - 40X - casca de coco: biomassa (a) e biocarvão (b).



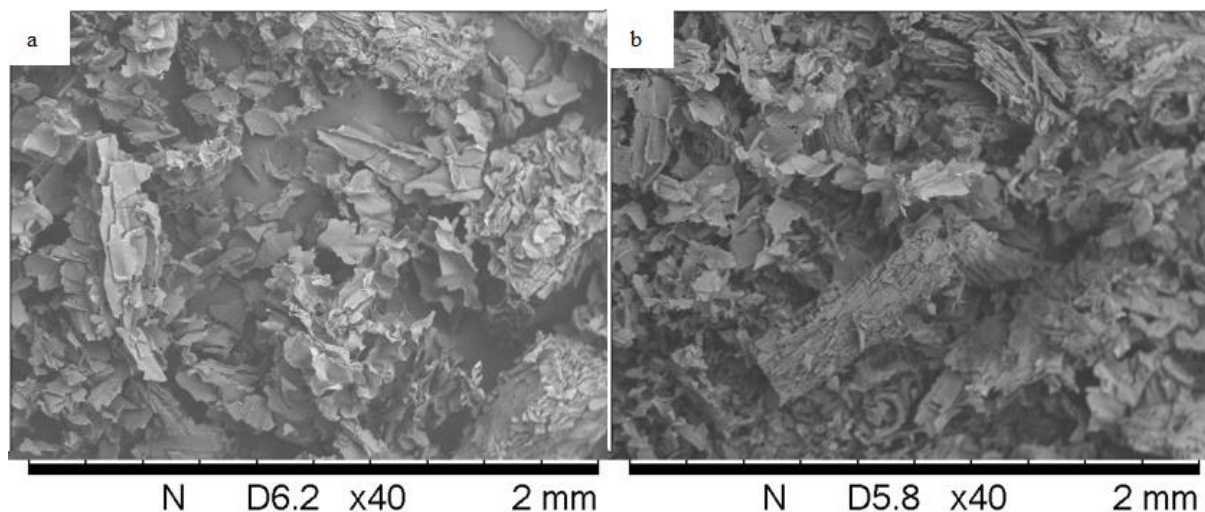
Fonte: Autor (2024).

Figura 22 - Imagens de MEV - 40X - sabugo de milho: biomassa (a) e biocarvão (b).



Fonte: Autor (2024).

Figura 23 - Imagens de MEV - 40X - bagaço de cana-de-açúcar: biomassa (a) e biocarvão (b).



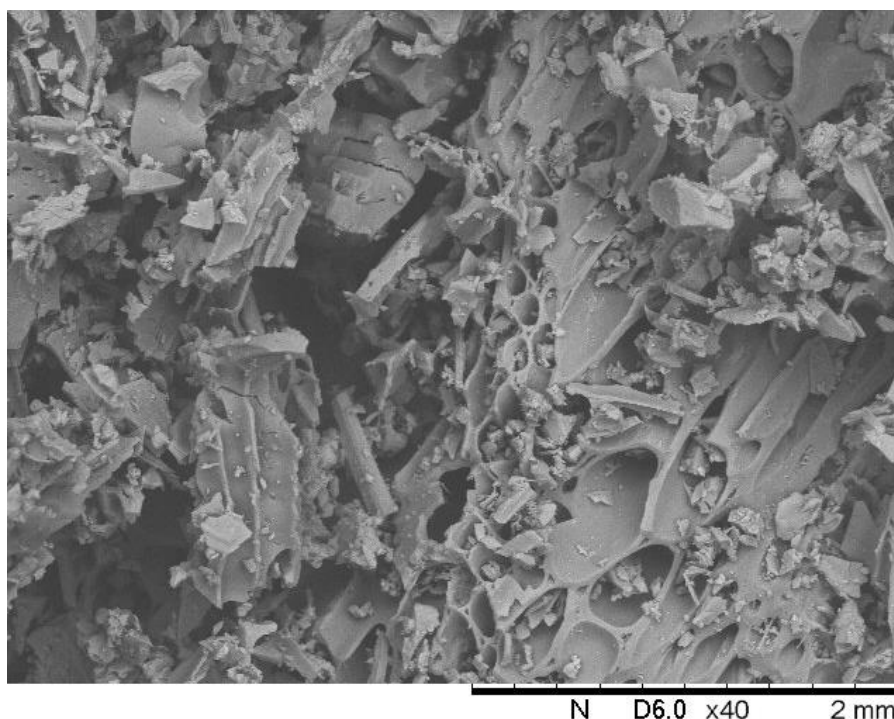
Fonte: Autor (2024).

O biocarvão da casca de coco apresentou-se como material extremamente poroso e com área superficial bastante irregular, como também foi constatado no trabalho de Sousa et al. (2007). Devens et al. (2018) afirmam que os biocarvões da casca do coco possuem superfícies planas e densas com rede complexa de poros heterogêneos, com fendas cilíndricas interligadas por alguns tubos grandes, semelhantes a favos de mel.

Já o biocarvão do sabugo de milho apresentou formato de poros irregulares, área superficial heterogênea e estrutura indefinida, o que também foi encontrado por Soares (2022).

Quanto ao MEV do carvão ativado, ao analisar a Figura 24, com aproximação de 40 vezes, pode-se observar grande quantidade de poros em sua área superficial com diversas cavidades arredondadas e aparentemente profundas, diferentemente das estruturas encontradas nos biocarvões produzidos, o que pode auxiliar significativamente nas propriedades adsorptivas desse material.

Figura 24 - Imagem de MEV - 40X - Carvão ativado comercial.



Fonte: Autor (2024).

Em contrapartida, Carvalho (2018) obteve resultados diferentes, o biocarvão do bagaço da laranja, produzido a 550°C por 1h, apresentou estrutura composta por partículas com cavidades arredondadas com profundidade e abertas, observando assim uma elevada porosidade, enquanto que o carvão ativado apresentou uma estrutura com partículas de formatos lamelares e com pouca profundidade.

Essa discrepância pode ser justificada pelo fato de a temperatura de pirólise e o tipo da biomassa influenciarem diretamente nas propriedades e características do biocarvão produzido, onde, por exemplo, o aumento da temperatura de pirólise aumenta a área superficial e o volume de poros (Enaime et al., 2020).

6.3.2. *Método de Brunauer, Emmett e Teller (BET)*

De posse dos dados do método BET (Tabela 4), foi possível realizar comparações das áreas superficiais, dos volumes e dimensões dos poros dos materiais adsorventes entre si e com resultados já obtidos na literatura.

Tabela 4 - Resultados do método BET dos materiais analisados.

Amostra		Área superficial (m ² /g)	Volume de poros (cm ³ /g)	Diâmetro médio dos poros (Å)
Casca de coco	Biomassa	0,654	0,005	34,162
	Biocarvão	6,998	0,019	37,200
Sabugo de milho	Biomassa	0,948	0,014	40,652
	Biocarvão	1,479	0,016	31,326
Bagaço da cana-de-açúcar	Biomassa	1,235	0,010	31,340
	Biocarvão	12,348	0,013	31,236
Carvão ativado		2,620	0,042	50,214

Fonte: Autor (2024).

No tocante às análises das áreas superficiais e volumes de poros, foi percebido aumento dessas propriedades nos biocarvões produzidos quando comparados com as biomassas *in natura* de todos os materiais, onde o biocarvão da casca de coco foi o que apresentou o maior aumento no que se refere a área superficial (970%), como também, em relação ao volume de poros (280%). Já o carvão ativado foi o material que apresentou o maior volume de poros dentre os materiais analisados.

Jesus (2016) destaca que o aumento da área superficial e volume dos poros dos biocarvões em relação às suas biomassas *in natura* se deve ao processo de pirólise que depende diretamente da temperatura de queima utilizada.

Vale ressaltar que a área superficial e o volume de poros influenciam significativamente na capacidade adsorptiva dos materiais, aumentando a adsorção de partículas em sua superfície.

Na literatura, Soares (2022) obteve para o biocarvão do sabugo de milho produzido à 400°C, área superficial de 25,18 m²/g e volume de poros de 0,017 cm³/g. Já Rocha et al. (2012), utilizando o biocarvão da casca de coco, conseguiram os seguintes resultados: área superficial de 13,1 m²/g e volume de poros de 0,027 cm³/g, enquanto Sun et al. (2014) obtiveram área superficial de 13,6 m²/g para o biocarvão do bagaço da cana-de-açúcar produzido a 450°C, valor bem próximo ao obtido nesse trabalho.

As diferenças significativas dos valores das áreas superficiais do biocarvão do sabugo de milho e da casca de coco em relação ao obtido nesse trabalho podem ser explicadas devido ao método de produção mais complexo e controlado utilizado nessas pesquisas, onde consistia de forno rotativo com reator cilíndrico de aço inoxidável.

No que se refere ao diâmetro médio dos poros, segundo a União Internacional de Química Pura e Aplicada (IUPAC) de 1982, as dimensões dos poros de um material podem ser classificadas, segundo seu tamanho em macro, meso e microporos primários e secundários (Quadro 2).

Quadro 2 - Classificação dos poros de acordo com o diâmetro.

Tipo de poros		Diâmetro médio (Å)
Microporos	Primários	$\theta < 8$
	Secundários	$8 < \theta < 20$
Mesoporos		$20 < \theta < 500$
Macroporos		$\theta > 500$

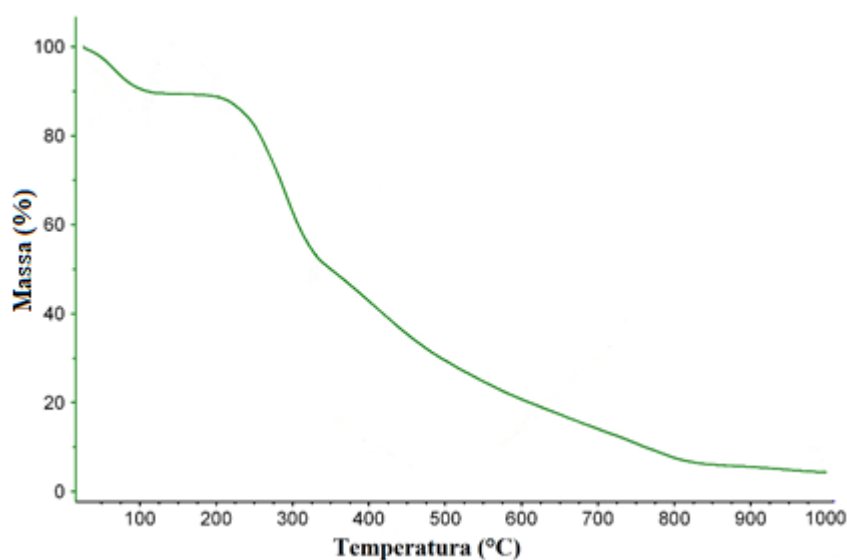
Fonte: Adaptado de Macêdo (2012).

Assim, com base no Quadro 2, todos os materiais analisados (Tabela 04) foram classificados como mesoporos, que, de acordo com Carvalho (2018), são materiais com alta capacidade de adsorver moléculas grandes em sua superfície, como corantes.

6.3.3. Análise Termogravimétrica (TGA)

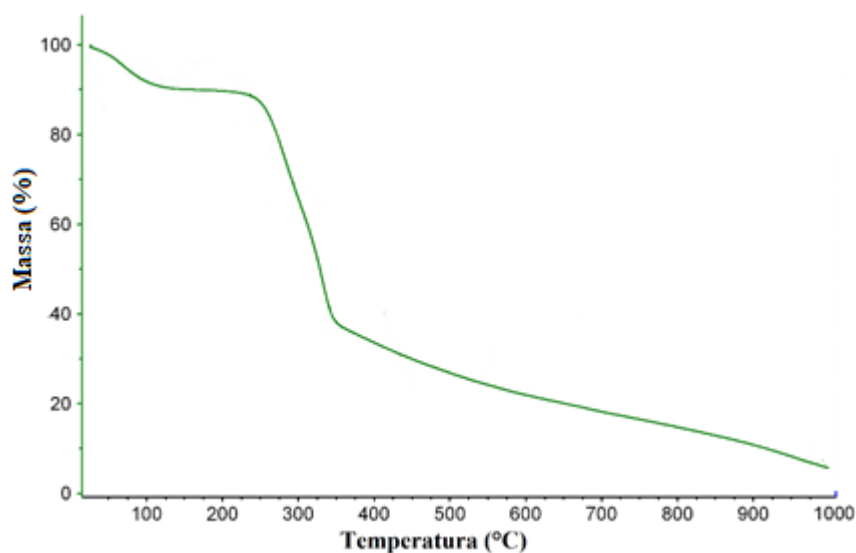
Com a realização da TGA, no tocante às biomassas analisadas, de acordo com as Figuras 25, 26 e 27, foi possível observar a presença de quatro estágios de perda de massa bem definidos em todas as biomassas.

Figura 25 - Análise Termogravimétrica da biomassa da casca do coco.



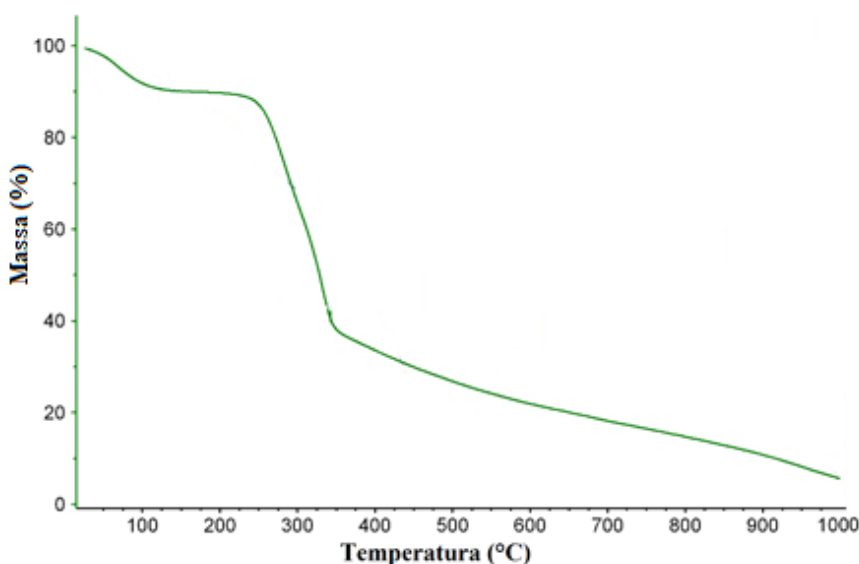
Fonte: Autor (2024).

Figura 26 - Análise Termogravimétrica da biomassa do sabugo de milho.



Fonte: Autor (2024).

Figura 27 - Análise Termogravimétrica da biomassa do bagaço da cana-de-açúcar.



Fonte: Autor (2024).

O primeiro estágio, ocorrido até temperaturas de 125°C, com reduções de massa de aproximadamente 10%, é referente à perda de umidade dos materiais (processo de desidratação das biomassas) (Santos, 2015). O segundo estágio, entre 125°C e 250°C, onde as amostras se mostraram termicamente estáveis, ocorre a degradação da fração mais reativa das hemiceluloses (Carmona, 2021). O terceiro estágio, entre 250°C e 350°C, com perdas mais acentuadas de massa em média de 45%, está relacionado à degradação e à volatilização dos componentes carbonáceos (hemicelulose, celulose e lignina) (Costa Júnior, 2014). E, por fim, o último estágio, acima de 350°C, corresponde à degradação da lignina e pequenas frações de celulose

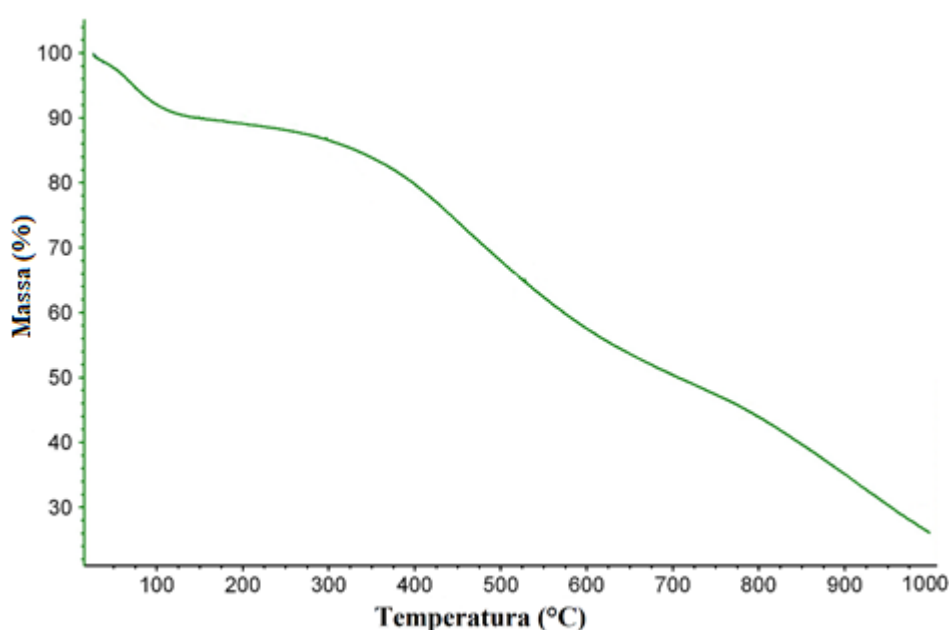
ainda restante, sendo a lignina o componente ainda mais presente em altas temperaturas (Carmona, 2021).

Ao final do último estágio (temperatura de 1000°C), as biomassas apresentaram massa residual de aproximadamente 5%, valor muito inferior ao encontrado por Costa Júnior (2014) para a biomassa da casca de coco que obteve 27,5%, porém para uma TGA realizada até a temperatura de 600°C.

No que se refere à análise termogravimétrica dos biocarvões e do carvão ativado, foram obtidos os seguintes resultados dispostos nas Figuras 28, 29, 30 e 31, onde foi possível constatar que os mesmos são mais estáveis termicamente e sofrem menor perda de massa se comparados com as biomassas analisadas.

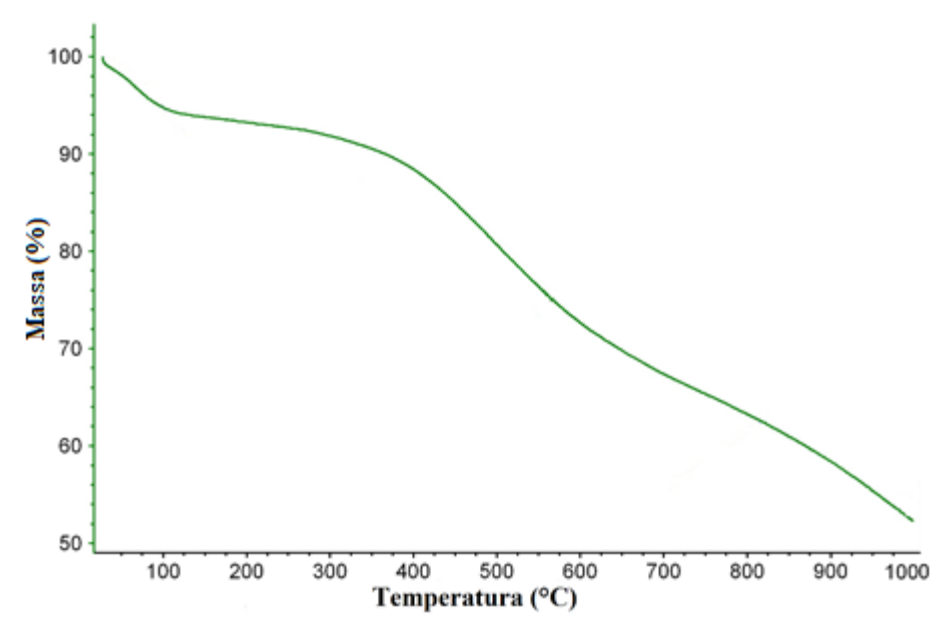
Convém ressaltar que não foi possível alterar as escalas dos eixos y dos gráficos dispostos nas figuras a seguir, pois o programa utilizado para produção não admite alteração de escala, por isso os gráficos apresentam escalas diferentes para o eixo y de cada análise termogravimétrica realizada.

Figura 28 - Análise Termogravimétrica do biocarvão da casca do coco.



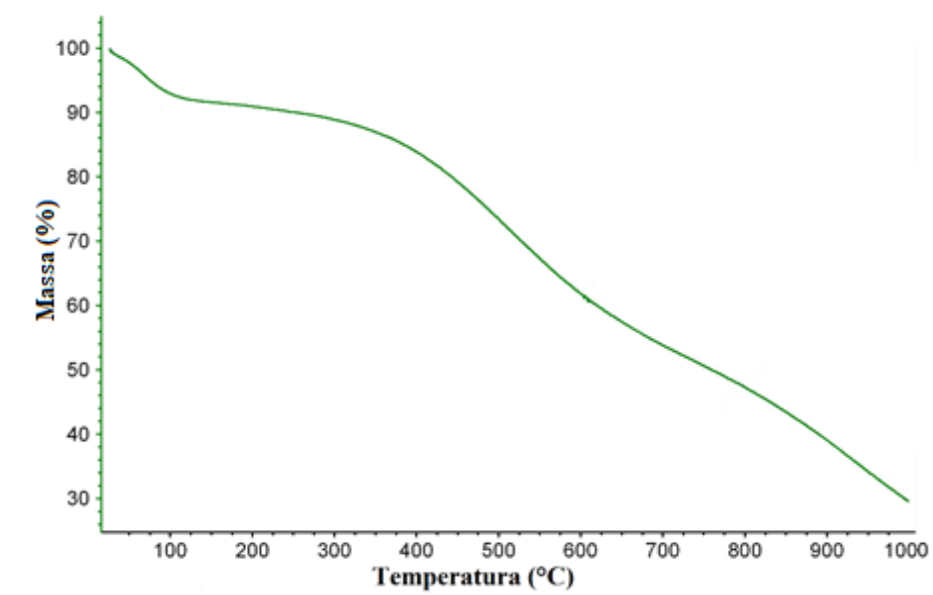
Fonte: Autor (2024).

Figura 29 - Análise Termogravimétrica do biocarvão do sabugo de milho.



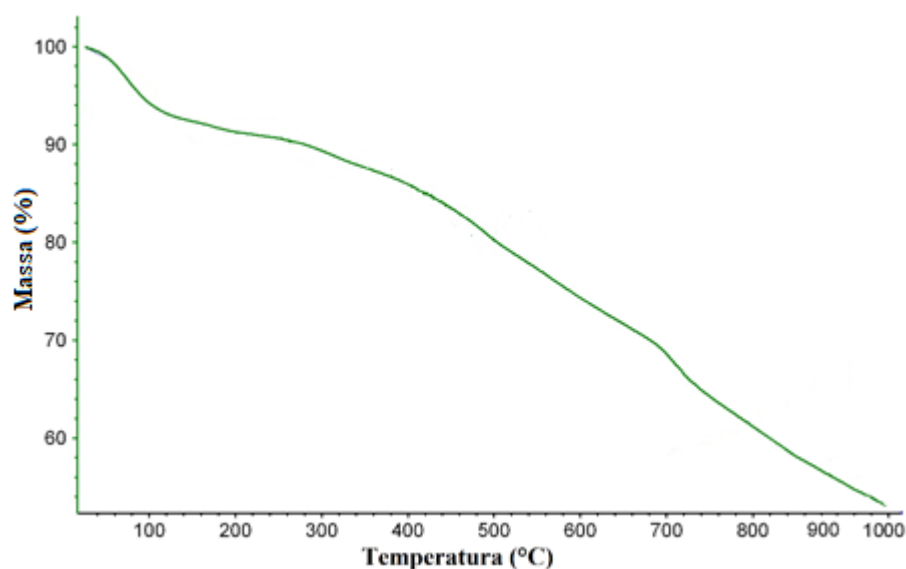
Fonte: Autor (2024).

Figura 30 - Análise Termogravimétrica do biocarvão do bagaço da cana-de-açúcar.



Fonte: Autor (2024).

Figura 31 - Análise Termogravimétrica do carvão ativado.



Fonte: Autor (2024).

Analisando as Figuras 28, 29, 30 e 31, pode-se observar que os biocarvões da casca do coco, do sabugo de milho e do bagaço da cana-de-açúcar apresentaram, respectivamente, 20%, 52% e 30% de massas residuais, enquanto o carvão ativado apresentou massa residual de 52%, mostrando-se também bastante resistente à variação da temperatura.

Estudo de Carvalho (2018), utilizando o bagaço da laranja, também apresentou resultados semelhantes, onde a biomassa apresentou massa residual de 20%, enquanto o biocarvão (produzido a 550°C) e o carvão ativado apresentaram massa residual de 80%, em uma TGA até 900°C. Além disso, trabalho realizado por Carmona (2021), utilizando bagaço de malte, apresentou massa residual para a biomassa de 15% e de 85% para o biocarvão produzido a 500°C, mostrando mais uma vez que o processo de pirólise leva ao aumento da resistência térmica dos materiais à decomposição.

6.3.4. pH e Condutividade Elétrica

No tocante aos parâmetros de pH e condutividade elétrica das amostras das biomassas, dos biocarvões e do carvão ativado, foram obtidos os resultados expressos na Tabela 5.

Tabela 5 - pH e condutividade elétrica das amostras.

Parâmetro	Carvão ativado	Casca de coco		Sabugo de milho		Bagaço de cana-de-açúcar	
		Biomassa	Biocarvão	Biomassa	Biocarvão	Biomassa	Biocarvão
pH	8,6	7,0	8,3	7,9	7,7	7,5	7,3
Condutividade elétrica ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	94	396	482	113	91	206	183

Fonte: Autor (2024).

Todas as amostras apresentaram pH igual ou superior a 7, em conformidade com o que é relatado nos estudos analisados, a citar Trazzi et al. (2018) e Silva et al. (2022b). Quanto à condutividade elétrica, as amostras com casca de coco apresentam o maior valor, o que pode significar em uma maior taxa de adsorção das substâncias (Paulino et al., 2019).

Na literatura, biocarvões do bagaço da cana-de-açúcar produzidos com temperaturas de pirólise variando entre 300 e 500°C apresentaram pH superior a 9 e condutividade oscilando entre 600 e 1200 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (Santana et al., 2021). Já Devens et al. (2018), produzindo biocarvões da casca do coco a 350°C, obtiveram os seguintes valores: pH de 8,5 e condutividade elétrica de 2880 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

A dissemelhança observada nos valores obtidos na condutividade elétrica, quando comparada com os estudos citados, pode ser justificada pelas metodologias variadas que podem ser aplicadas para determinação desse parâmetro. No presente trabalho, foi empregado o procedimento de Gonçalves (2016), onde, para o biocarvão de resíduos de eucalipto produzido entre 480 e 500°C, foi obtida condutividade elétrica de 117 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

Carvalho (2018) obteve valores de pH em torno de 8 e condutividade elétrica variando entre 268 e 660 $\mu\text{S}/\text{cm}$ para biocarvões de bagaço da laranja com temperaturas de pirólise entre 350 e 650°C.

6.4. Filtração do efluente do reator UASB

Acerca do processo de filtração das amostras dos efluentes do reator UASB, utilizando os filtros produzidos com os biocarvões da casca de coco, do sabugo de milho e do bagaço de cana-de-açúcar, foram obtidos os seguintes dados contidos nas Tabelas 6 e 7, referentes às duas filtrações realizadas.

Tabela 6 - Dados da Filtração 01.

Filtração 01			
Amostra	Filtro de Biocarvão		
	Casca do Coco	Sabugo de Milho	Bagaço da Cana-de-açúcar
	Tempo de filtração (h:min)		
01	00:11	00:08	00:09
02	00:13	00:08	00:07
03	00:15	00:08	00:07
04	00:16	00:08	00:09
05	00:18	00:09	00:08
06	00:19	00:09	00:09
07	00:20	00:09	00:07
08	00:23	00:09	00:09
09	00:21	00:10	00:10
10	00:21	00:11	00:13
Tempo total (h:min)	02:57	01:29	01:28

Fonte: Autor (2024).

Tabela 7 - Dados da Filtração 02.

Filtração 02			
Amostra	Filtro de Biocarvão		
	Casca do Coco	Sabugo de Milho	Bagaço da Cana-de-açúcar
	Tempo de filtração (h:min)		
01	00:13	00:06	00:08
02	00:16	00:05	00:10
03	00:20	00:05	00:10
04	00:20	00:03	00:12
05	00:24	00:04	00:13
06	00:27	00:04	00:12
07	00:21	00:03	00:14
08	00:38	00:04	00:13
09	00:39	00:04	00:15
10	00:42	00:04	00:21
Tempo total (h:min)	04:30	00:42	02:08

Fonte: Autor (2024).

Analisando as informações Tabelas 6 e 7, pode-se observar que na Filtração 01 (Tabela 6), o filtro de biocarvão da cana-de-açúcar apresentou a maior velocidade de filtração (tempo total de filtração de 1h28min) e o filtro de biocarvão da casca de coco, a menor velocidade de filtração (tempo total de filtração de 2h57min). Constatou-se também que os tempos de filtração de cada filtro iam aumentando à medida que o mesmo era utilizado até chegar na amostra final (amostra de número 10). Por exemplo, a amostra final do filtro de biocarvão da casca do coco aumentou o tempo de filtração em 10 minutos, quando comparado com a amostra inicial.

Já na Filtração 02 (Tabela 7), o filtro de biocarvão do sabugo de milho apresentou a maior velocidade de filtração (tempo total de 42min), enquanto o filtro de biocarvão da casca de coco apresentou novamente a menor velocidade de filtração (tempo total de 4h30min).

Assim como na Filtração 01, foi verificado também que o tempo de filtração das amostras da Filtração 02 foi aumentando no decorrer das filtrações, principalmente, nos filtros de biocarvão da casca de coco e do bagaço da cana-de-açúcar, onde houve acréscimo de tempo de, respectivamente, 29 minutos e 13 minutos, nas amostras finais quando comparadas com as amostras iniciais.

Esses acréscimos de tempo observados nas duas filtrações podem ser justificados pelo preenchimento dos poros dos biocarvões com as partículas presentes nos efluentes do reator UASB que acabam dificultando a sua passagem nas estruturas dos biocarvões produzidos e, assim, aumentando o tempo de filtração.

Quanto aos resultados obtidos com o filtro de biocarvão da casca de coco, Ribeiro (2016) obteve resultados semelhantes, onde o filtro de biocarvão da casca de coco apresentou menor velocidade de filtração (tempo total de 11h30min) quando comparado com filtro de biocarvão de madeira (2h20min) para obtenção de 4 litros de amostra filtrada de um efluente de esgoto sanitário bruto.

De acordo com Ribeiro (2016), o biocarvão da casca de coco apresenta partículas menores, o que dificulta a passagem do efluente, com isso os sólidos presentes no esgoto acabam formando aglomerados, levando à saturação do meio filtrante.

Quanto ao processo de filtração dos efluentes do reator UASB, utilizando os filtros produzidos com carvão ativado, foram obtidos os resultados dispostos na Tabela 8.

Tabela 8 - Dados das Filtrações 01 e 02 utilizando o filtro de carvão ativado.

Filtro de Carvão Ativado		
Amostra	Filtração 01	Filtração 02
	Tempo de filtração (h:min)	
01	00:58	04:09
02	01:38	04:03
03	-	-
04	-	-
05	-	-
06	-	-
07	-	-
08	-	-
09	-	-
10	-	-
Tempo total (h:min)	02:36	08:12

Fonte: Autor (2024).

Como pode ser observado na Tabela 8, só foi possível realizar a coleta de duas amostras de cada filtração utilizando os filtros de carvão ativado, pois os mesmos apresentaram sinais de saturação logo no início dos processos de filtração. A nível de curiosidade, foi realizada a coleta de uma terceira amostra da Filtração 01, onde o tempo de filtração foi de 12h40min, a qual foi desprezada, por não ser possível realizar os ensaios de caracterização dos parâmetros físico-químicos devido ao tempo sem refrigeração, o qual poderia afetar significativamente nos resultados obtidos.

Carvalho (2018) ao analisar a eficiência de filtros produzidos com configurações semelhantes ao desenvolvido nesse trabalho, obteve resultados análogos. Para um mesmo tempo de filtração, foram obtidos os seguintes volumes de amostras filtradas: 2,8 litros para o filtro de carvão ativado e 4,2 litros para o filtro de biocarvão do bagaço da laranja. Logo, pode-se concluir que seu filtro com biocarvão apresentou uma eficiência 25% maior que o filtro com carvão ativado.

Diante dos resultados obtidos na Tabela 8, não se pôde fazer análise comparativa com dados coletados nas Tabelas 6 e 7, pois conforme relatado, os filtros de carvão ativado não conseguiram filtrar a quantidade de 10 amostras como os demais filtros.

Uma possível justificativa para essa “saturação” inicial dos filtros de carvão ativado pode estar atrelada aos resultados obtidos nos ensaios de caracterização MEV e BET do carvão ativado, onde o mesmo apresentou grande quantidade de poros em sua área superficial com diversas cavidades arredondadas e profundas, além de apresentar o maior volume de poros

dentre os materiais analisados. Com isso, as partículas contidas nos efluentes do reator UASB podem ser contribuídos para o preenchimento prematuro dos poros dos filtros de carvão ativado.

6.5. Caracterização dos efluentes

6.5.1. Efluente bruto e efluente do reator UASB

Conforme definido, foram realizados os ensaios de caracterização dos efluentes bruto (pós-gradeamento) e do reator UASB para os seguintes parâmetros físico-químicos: cor aparente, turbidez, DQO, sólidos totais e sólidos suspensos totais. A Tabela 9 apresenta os resultados obtidos para esses parâmetros nas duas coletas realizadas e as respectivas eficiências de tratamento verificadas.

Tabela 9 - Caracterização dos efluentes bruto e reator UASB.

Parâmetro	Coleta 01			Coleta 02		
	Esgoto Bruto*	Efluente do reator UASB	Eficiência (%)	Esgoto Bruto*	Efluente do Reator UASB	Eficiência (%)
Cor aparente (uH)	1636	584	64,30	570	488	14,39
Turbidez (uT)	243	82	66,25	73	56	23,29
DQO (mg/L)	496	175	64,71	134	125	6,72
Sólidos totais (mg/L)	785	599	23,70	603	613	**
Sólidos suspensos totais (mg/L)	14	3	78,57	15	21	**

*Coletado após o gradeamento.

**Valor negativo.

Fonte: Autor (2024).

De posse dos resultados apresentados na Tabela 9 e comparando com a Tabela 10, pode-se concluir que o efluente bruto coletado em ambas as coletas é bastante diluído, tendo em vista que apresentou valores de DQO inferiores a 508 mg/L, de sólidos totais menores que 806 mg/L e de sólidos suspensos totais bem inferiores ao valor de 130 mg/L, conforme definido por Metcalf e Eddy (2015) para esgotos brutos classificados como de concentração fraca.

Tabela 10 - Composição típica do esgoto doméstico bruto.

Constituinte	Concentração		
	Forte	Média	Fraca
DQO (mg/L)	1016	508	339
Sólidos Totais (mg/L)	1612	806	537
Sólidos suspensos totais (mg/L)	389	195	130

Fonte: Adaptado de Metcalf e Eddy (2015).

Estudo realizado por Oliveira (2019) apresentou resultados semelhantes nas análises da DQO, onde obtiveram valor médio de 129 mg/L, sendo também classificado como esgoto bruto de concentração fraca. Esse fato também foi confirmado por Oliveira (2020) que obteve o valor de DQO de 210 mg/L.

Como pode ser observado na Tabela 9, o esgoto bruto da Coleta 02 apresentou-se mais diluído que o da Coleta 01, isso pode ser justificado pelos períodos em que foram realizadas as coletas. Na Coleta 02, realizada no mês de outubro de 2023, a universidade estava no período de férias acadêmicas, logo a contribuição gerada pelo uso dos sanitários foi menor, diminuindo assim a carga de matéria orgânica fornecida. Já na Coleta 01, realizada no mês de agosto de 2023, a universidade estava em pleno funcionamento com aulas regulares, contribuindo assim para uma maior geração de carga orgânica.

No tocante à eficiência do reator UASB, foram observadas reduções significativas quanto aos parâmetros de cor aparente e turbidez, 64,30% e 66,25%, respectivamente, de eficiência na Coleta 01. Quanto aos parâmetros de sólidos totais e sólidos suspensos totais, também só foram obtidas reduções relevantes na primeira coleta (23,70% e 78,57%, respectivamente). Valores semelhantes foram obtidos por Costa (2019), 26% e 62%, respectivamente. Porém esses valores foram superiores aos obtidos por Oliveira (2020), 6% para sólidos totais e 31% para sólidos suspensos totais.

No que se refere à DQO, foi obtida eficiência de redução de 64,71% na Coleta 01 e 6,72% na Coleta 02, valores superiores ao relatados por Oliveira (2019), o qual obteve uma eficiência média de apenas 2,6%. Com isso, apesar da redução média de 35,72% observada nas duas coletas, o valor está abaixo do previsto para o funcionamento normal da ETE, o qual possui uma estimativa de eficiência de remoção de DQO de projeto de 63,68% (SILVA, 2012). Além disso, a eficiência de remoção de DQO verificada está abaixo do estabelecido por Chernicharo (2007), o qual relata que reatores UASB geralmente apresentam reduções de DQO entre 55 e 70%.

Corroborando com os resultados obtidos, estudo de Oliveira (2020) nessa mesma ETE obteve eficiência equivalente a 20% de redução de DQO. Já Costa (2019) constatou eficiência média de 49% desse parâmetro.

Uma possível justificativa para essa eficiência abaixo do esperado foi pontuada por Oliveira (2019), o qual afirma que vazões e cargas superestimadas, falta de procedimentos operacionais e inexistência de rotinas de coleta de amostras para análises dos parâmetros físico-químicos estão entre as causas dessa deficiência verificada.

6.5.2. Efluentes filtrados

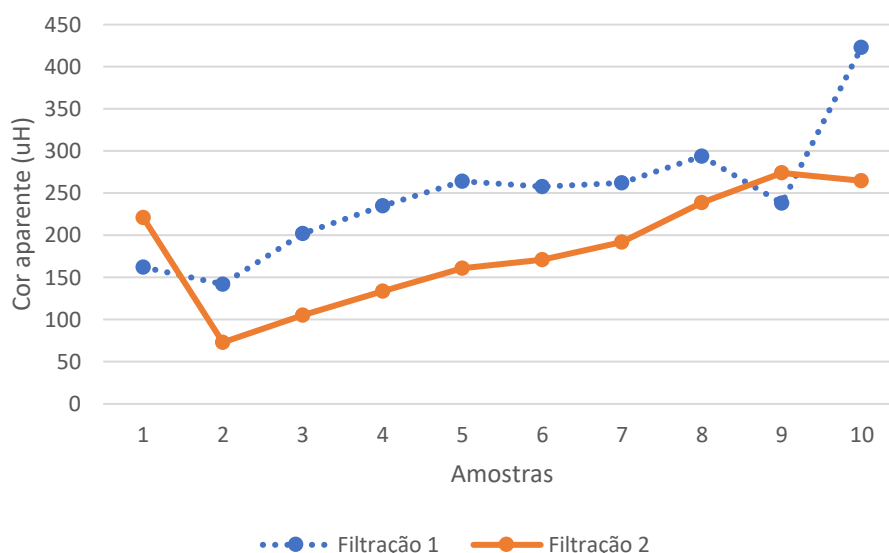
Nessa subseção, são apresentados os resultados dos parâmetros físico-químicos obtidos e as análises estatísticas das amostras de cada filtro nas duas filtrações realizadas. As discussões e análises acerca das eficiências das filtrações dos efluentes de cada filtro estão presentes na seção 6.6 – Avaliação das eficiências.

6.5.2.1. Efluentes do filtro de biocarvão da casca do coco

As amostras filtradas com o filtro de biocarvão da casca do coco foram caracterizadas para os parâmetros físico-químicos de cor aparente, turbidez, DQO, sólidos totais e sólidos suspensos totais, no decorrer das 10 amostras coletadas, em cada uma das duas filtrações realizadas (Filtração 01 e Filtração 02).

Os resultados dessa caracterização estão dispostos no Apêndice A, com o qual se pode construir os gráficos (Figuras 32, 33, 34, 35 e 36) que retratam o comportamento dos parâmetros físico-químicos analisados no decurso de uso do filtro de biocarvão da casca do coco nas duas filtrações realizadas.

Figura 32 - Cor aparente das amostras filtradas pelo filtro de biocarvão da casca do coco.



Fonte: Autor (2024).

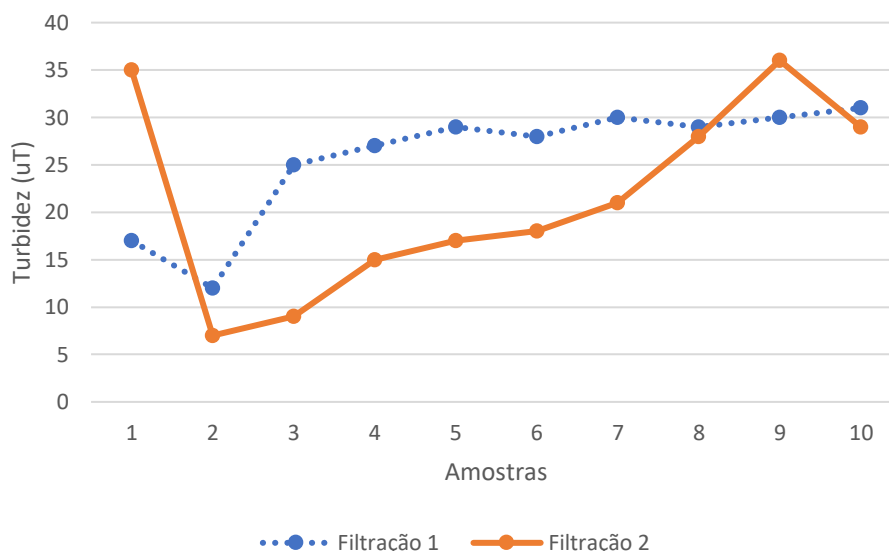
A Figura 32 retrata o comportamento do parâmetro de cor aparente das 10 amostras coletadas de cada uma das duas filtrações realizadas. Com isso, observou-se o aumento desse parâmetro físico no decorrer das filtrações, ocorrendo assim, uma diminuição da eficiência do filtro de biocarvão da casca do coco.

Analisando-se estatisticamente os dados de cor aparente coletados, aplicando o teste de normalidade de Anderson Darling, enquanto a Filtração 01 não apresentou distribuição normal (p-valor de 0,023), a Filtração 02 apresentou distribuição normal (p-valor de 0,196).

Com isso, foi aplicado o teste de Mann-Whitney para duas amostras independentes, onde verificou-se que as séries de dados da Filtração 01 e da Filtração 02 apresentaram homogeneidade (p-valor de 0,168 e 0,171, respectivamente, superiores a 0,05).

Conclui-se então que os dados obtidos nas duas filtrações realizadas apresentaram comportamentos semelhantes, ou seja, o filtro de biocarvão da casca de coco apresentou resultados similares para os efluentes do reator UASB com características diferentes.

Figura 33 - Turbidez das amostras filtradas pelo filtro de biocarvão da casca do coco.



Fonte: Autor (2024).

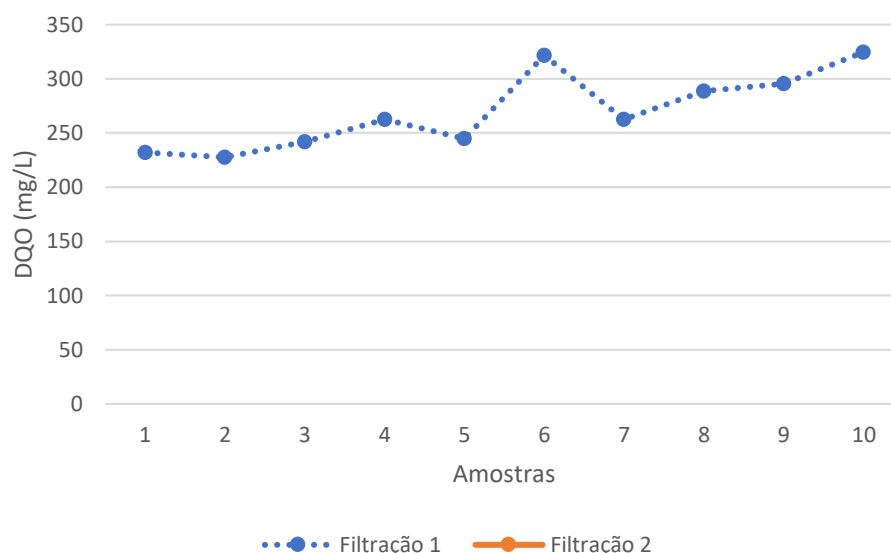
No tocante à turbidez, os dados obtidos na Figura 33 demonstram o comportamento semelhante ao parâmetro de cor aparente, onde percebe-se aumento de turbidez no decorrer das coletas das amostras filtradas.

Analisando-se estatisticamente os dados de turbidez coletados, utilizando o teste de normalidade de Anderson Darling, as duas séries de dados (Filtração 01 e Filtração 02) não apresentaram distribuição normal (p-valor calculado de 0,0000008 e 0,015, respectivamente).

Logo, foi aplicado o teste de Mann-Whitney para duas amostras independentes e constatou-se que as séries de dados da Filtração 01 e da Filtração 02 apresentaram homogeneidade (p-valor de 0,392 e 0,401).

Com isso, assim como para cor aparente, o filtro de biocarvão da casca de coco apresentou comportamentos semelhantes nas duas filtrações realizadas para o parâmetro de turbidez.

Figura 34 - DQO das amostras filtradas pelo filtro de biocarvão da casca do coco.

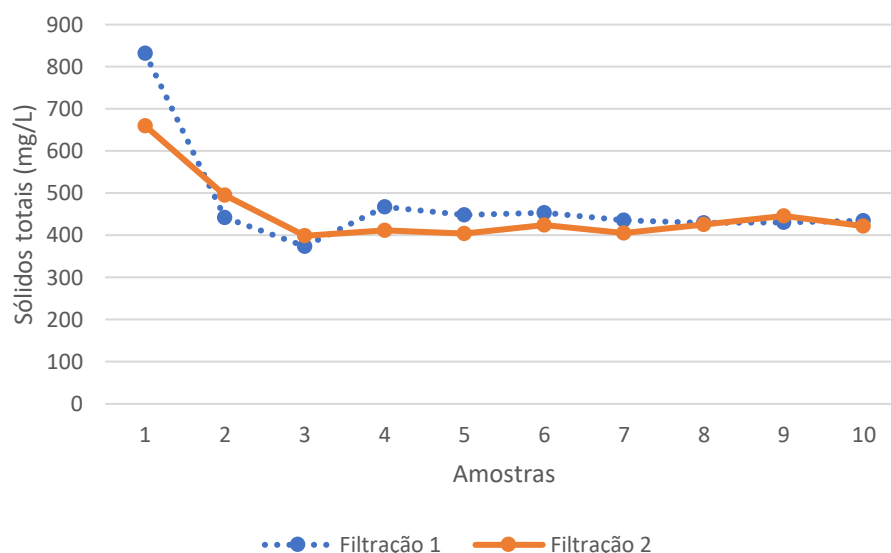


Fonte: Autor (2024).

A Figura 34 retrata o comportamento do parâmetro de DQO das 10 amostras coletadas de cada uma das duas filtrações realizadas, porém, somente foram obtidos resultados coerentes na Filtração 01, pois na Filtração 02, mesmo realizando-se em duplicata, foram obtidos resultados negativos desse parâmetro, por isso, os mesmos foram descartados, restando apenas os dados da Filtração 01 para análise. Com isso, analisando-se estatisticamente os dados da Filtração 01, aplicando o teste de normalidade de Anderson Darling, a série de dados resultou em uma distribuição normal (p-valor de 0,747).

Assim, dos resultados obtidos na Filtração 01, observou-se o aumento do parâmetro de DQO no decorrer da filtração realizada. As justificativas para esse aumento serão expostas na seção 6.6 – Avaliação das eficiências.

Figura 35 - Sólidos totais das amostras filtradas pelo filtro de biocarvão da casca do coco.



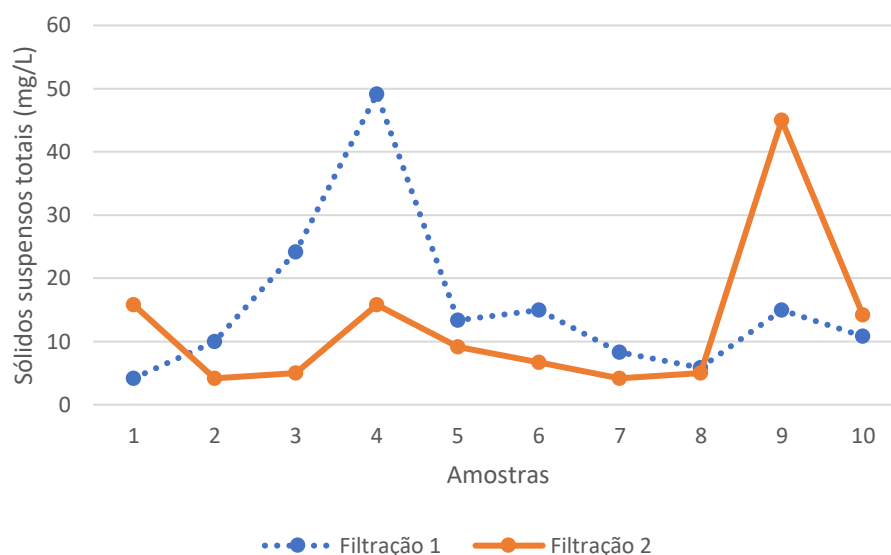
Fonte: Autor (2024).

No tocante aos sólidos totais, os dados obtidos na Figura 35 demonstram que no decorrer da filtração das amostras coletadas de cada uma das duas filtrações, houve inicialmente uma queda desse parâmetro e posteriormente uma constância em ambas as filtrações.

Verificando-se estatisticamente os dados da Figura 35, aplicando o teste de normalidade de Anderson Darling, as duas séries de dados (Filtração 01 e Filtração 02) não apresentaram distribuição normal (p-valor de 0,00008 e 0,0007, respectivamente). Diante disso, foi aplicado o teste de Mann-Whitney para duas amostras independentes, e verificou-se que as séries de dados da Filtração 01 e da Filtração 02 apresentaram homogeneidade (p-valor de 0,237 e 0,242, respectivamente, superiores a 0,05).

Concluiu-se que os dados obtidos nas duas filtrações realizadas apresentaram comportamentos semelhantes, ou seja, o filtro de biocarvão da casca de coco apresentou resultados similares para os efluentes do reator UASB com características diferentes.

Figura 36 - Sólidos suspensos totais das amostras filtradas pelo filtro de biocarvão da casca do coco.



Fonte: Autor (2024).

Por fim, quanto aos sólidos suspensos totais (Figura 36), as amostras filtradas apresentaram comportamentos irregulares, oscilando entre aumento e diminuição desse parâmetro em ambas as filtrações.

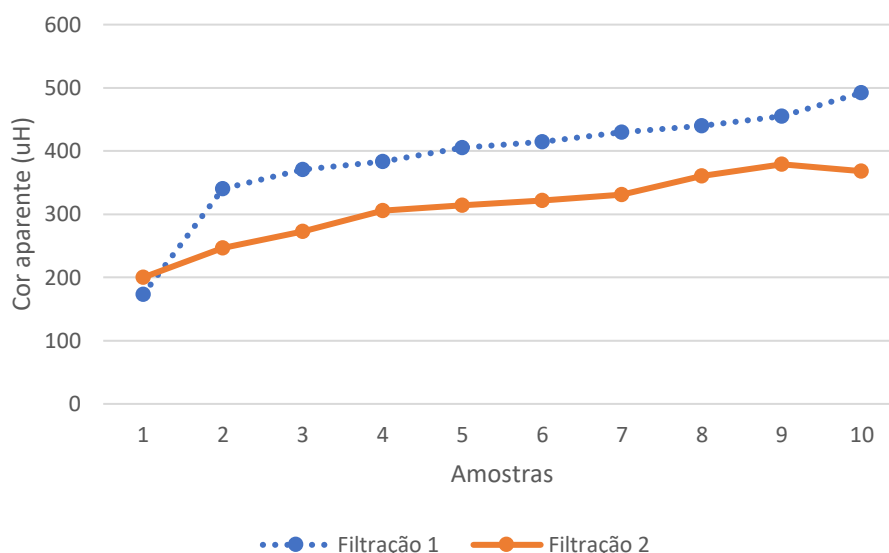
Analisando-se estatisticamente os dados da Figura 36, com o teste de normalidade de Anderson Darling, as séries de dados também não apresentaram distribuição normal, (p-valor calculado de 0,007 e 0,008, respectivamente, Filtração 01 e Filtração 02). Com isso, foi utilizado o teste de Mann-Whitney para duas amostras independentes, e verificou-se que ambas as séries de dados também apresentaram dados homogêneos entre si (p-valor de 0,948 e 0,949).

Inferiu-se que os dados obtidos nas duas filtrações realizadas apresentaram comportamentos semelhantes para sólidos suspensos totais em ambas as filtrações realizadas.

6.5.2.2. Efluentes do filtro de biocarvão do sabugo de milho

De forma análoga, as amostras filtradas com o filtro de biocarvão do sabugo de milho foram caracterizadas e os resultados obtidos estão dispostos no Apêndice B, com o qual pode-se construir os gráficos (Figuras 37, 38, 39, 40 e 41) que descrevem o comportamento dos parâmetros físico-químicos analisados no decorrer do uso do filtro de biocarvão do sabugo de milho nas duas filtrações ocorridas

Figura 37 - Cor aparente das amostras filtradas pelo filtro de biocarvão do sabugo de milho.



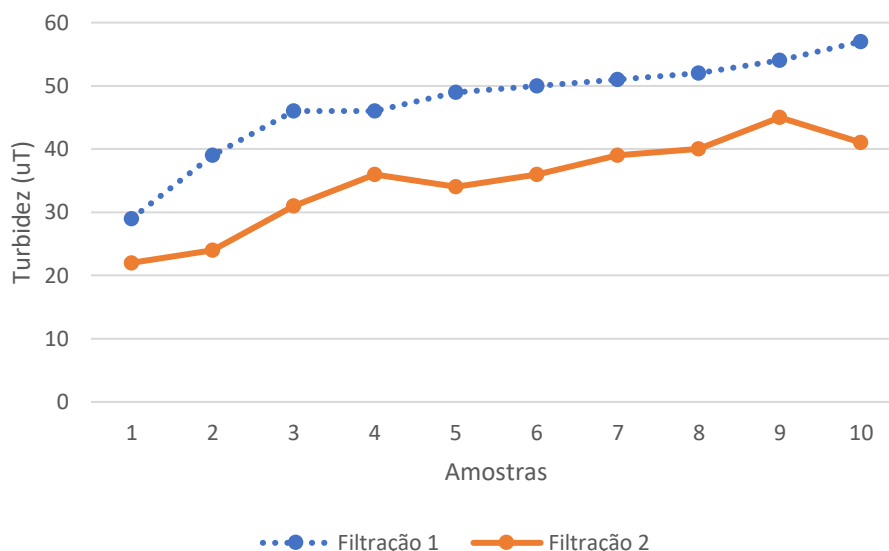
Fonte: Autor (2024).

A Figura 37 apresenta o comportamento do parâmetro de cor aparente das amostras coletadas de cada uma das duas filtrações realizadas. Com isso, observou-se o aumento desse parâmetro físico no decorrer das filtrações, ocorrendo assim, uma diminuição da eficiência do filtro de biocarvão do sabugo de milho, algo que também foi observado anteriormente para o filtro de biocarvão da casca do coco.

Analisando-se estatisticamente os dados da Figura 37, utilizando o teste de normalidade de Anderson Darling, as duas séries de dados apresentaram distribuição normal (p-valor de 0,227 e 0,680, respectivamente, para Filtração 01 e Filtração 02). Diante disso, foi aplicado o teste ANOVA, e constatou-se que as séries de dados da Filtração 01 e da Filtração 02 não apresentaram dados homogêneos, visto que p-valor calculado (0,018) foi inferior a 0,05.

Concluiu-se que os dados obtidos nas duas filtrações realizadas apresentaram comportamentos distintos, ou seja, o filtro de biocarvão do sabugo de milho apresentou resultados diferentes para os efluentes do reator UASB.

Figura 38 - Turbidez das amostras filtradas pelo filtro de biocarvão do sabugo de milho.



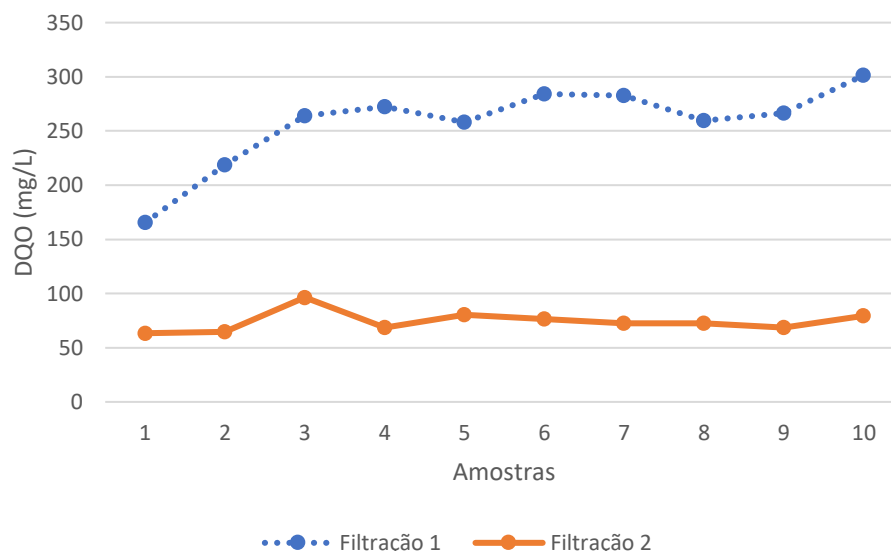
Fonte: Autor (2024).

No tocante à turbidez, os dados obtidos na Figura 38 demonstram comportamento semelhante ao parâmetro de cor aparente, onde percebe-se aumento de turbidez no decorrer das coletas das amostras filtradas.

Analisando-se estatisticamente os dados da Figura 38, aplicando o teste de normalidade de Anderson Darling, as séries de dados também apresentaram distribuição normal (p-valor de 0,058 e 0,679, respectivamente, para Filtração 01 e Filtração 02). Com isso, foi aplicado novamente o teste ANOVA, e verificou-se que ambas as séries de dados apresentaram dados homogêneos (p-valor 0,091).

Inferiu-se que diferentemente dos resultados obtidos para cor aparente, os dados coletados de turbidez registraram comportamentos semelhantes nas duas filtrações realizadas com o filtro de biocarvão do sabugo de milho.

Figura 39 - DQO das amostras filtradas pelo filtro de biocarvão do sabugo de milho.



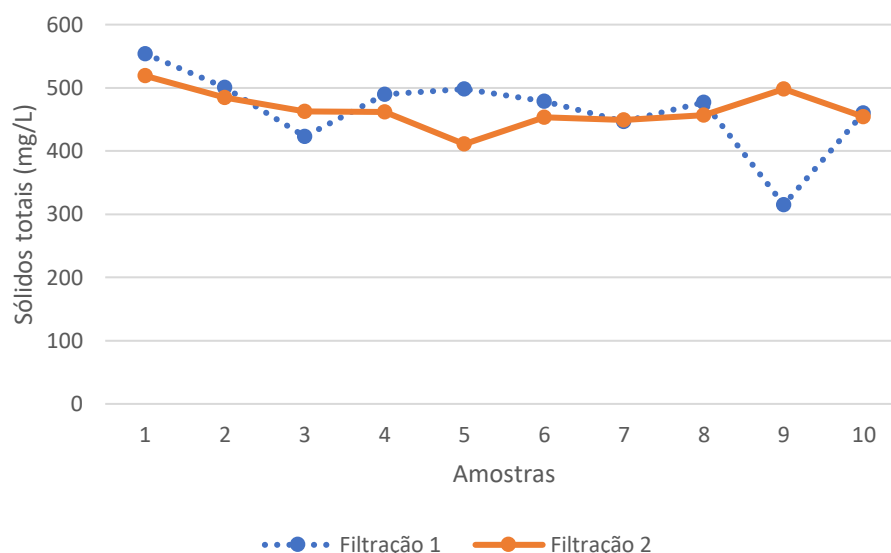
Fonte: Autor (2024).

No tocante à DQO, pode-se observar que na Filtração 01 houve o aumento desse parâmetro do decurso da filtração, enquanto na Filtração 02 foi verificado uma constância dos dados desse parâmetro. As justificativas para esses comportamentos distintos nas duas filtrações serão expostas na seção 6.6 – Avaliação das eficiências.

Verificando-se estatisticamente os dados da Figura 39, utilizando o teste de normalidade de Anderson Darling, as duas séries de dados não apresentaram distribuição normal (p-valor de 0,028 e 0,007, respectivamente, para Filtração 01 e Filtração 02). Logo, foi utilizado o teste de Mann-Whitney para duas amostras independentes, onde constatou-se que as séries de dados da Filtração 01 e da Filtração 02 não apresentaram dados homogêneos (p-valor de 0,00008 e 0,00003, respectivamente, inferiores a 0,05).

Concluiu-se que os dados obtidos nas duas filtrações realizadas apresentaram comportamentos distintos, ou seja, o filtro de biocarvão do sabugo de milho apresentou resultados diferentes para os efluentes do reator UASB.

Figura 40 - Sólidos totais das amostras filtradas pelo filtro de biocarvão do sabugo de milho.



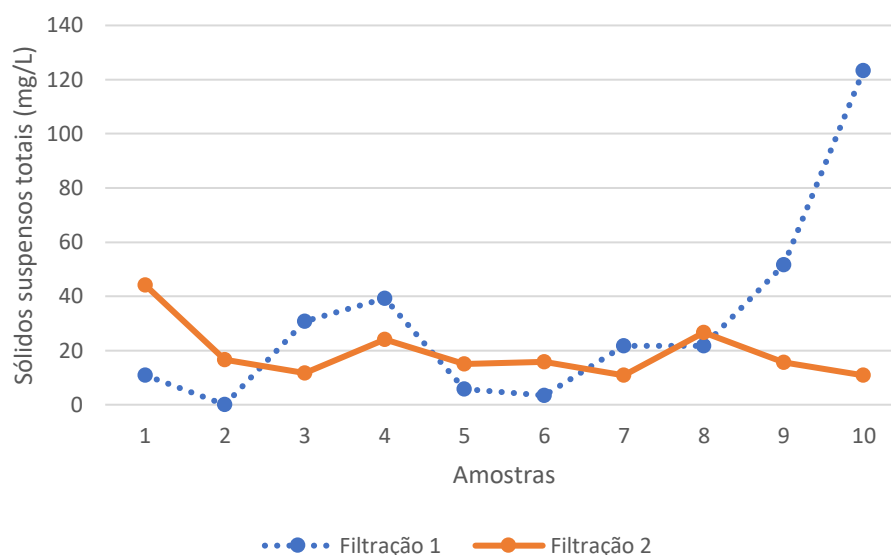
Fonte: Autor (2024).

Quanto aos sólidos totais (Figura 40), as amostras filtradas apresentaram comportamentos irregulares, oscilando entre aumento e diminuição desse parâmetro em ambas as filtrações.

Analisando-se estatisticamente os dados da Figura 40, foi utilizado o teste de normalidade de Anderson Darling, onde a série de dados da Filtração 01 apresentou uma distribuição normal (p-valor de 0,026) e a série de dados da Filtração 02 não seguiu uma distribuição normal (p-valor de 0,019). Com isso, foi aplicado o teste de Mann-Whitney para duas amostras independentes, e verificou-se que as séries de dados apresentaram dados homogêneos (p-valor de 0,743 e 0,748 respectivamente, para Filtração 01 e Filtração 02).

Inferiu-se que os dados obtidos nas duas filtrações realizadas apresentaram comportamentos semelhantes para sólidos totais em ambas as filtrações realizadas com o filtro do biocarvão do sabugo de milho.

Figura 41 - Sólidos suspensos totais das amostras filtradas pelo filtro de biocarvão do sabugo de milho.



Fonte: Autor (2024).

Por fim, quanto aos sólidos suspensos totais (Figura 41), as amostras filtradas com o biocarvão do sabugo de milho apresentaram comportamentos irregulares, oscilando entre aumento e diminuição desse parâmetro em ambas as filtrações, algo também verificado para os sólidos totais.

Verificando-se estatisticamente os dados da Figura 41, aplicando o teste de normalidade de Anderson Darling, as duas séries de dados não apresentaram distribuição normal (p-valor de 0,008 e 0,027, respectivamente, para Filtração 01 e Filtração 02). Com isso, foi utilizado o teste de Mann-Whitney para duas amostras independentes, e constatou-se que as séries de dados da Filtração 01 e da Filtração 02 apresentaram dados homogêneos (p-valores iguais a 1, respectivamente, superiores a 0,05).

Concluiu-se que os dados coletados nas duas filtrações com filtro de biocarvão do sabugo de milho apresentaram comportamentos semelhantes quanto aos sólidos suspensos totais.

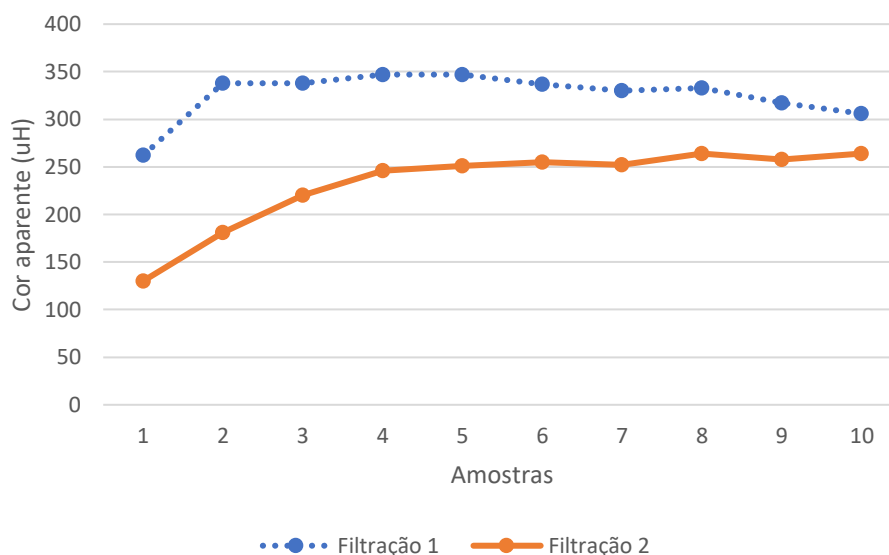
6.5.2.3. Efluentes do filtro de biocarvão do bagaço da cana-de-açúcar

Com o uso do filtro de biocarvão do bagaço da cana-de-açúcar foram obtidos os seguintes resultados contidos no Apêndice C para os parâmetros físico-químicos analisados nas duas filtrações realizadas no decorrer das 10 amostras coletadas.

Com os dados do Apêndice C, foi possível elaborar os gráficos (Figuras 42, 43, 44, 45 e 46) que demonstram o comportamento dos parâmetros físico-químicos no decorrer do uso do

filtro de biocarvão do bagaço da cana-de-açúcar nas duas filtrações (Filtração 01 e Filtração 02).

Figura 42 - Cor aparente das amostras filtradas pelo filtro de biocarvão do bagaço da cana-de-açúcar.



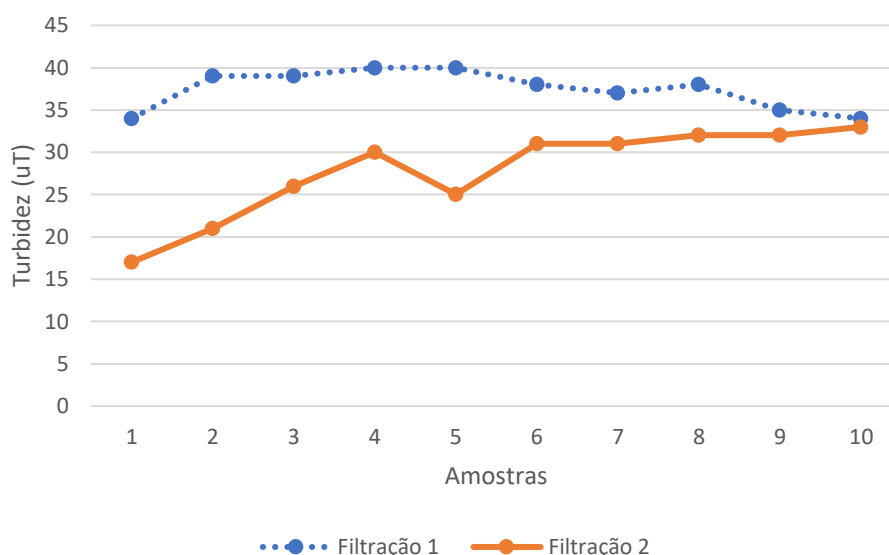
Fonte: Autor (2024).

A Figura 42 descreve o comportamento do parâmetro de cor aparente das amostras coletadas de cada uma das duas filtrações realizadas. Com isso, observou-se o aumento desse parâmetro físico no decorrer das filtrações, ocorrendo assim, uma diminuição da eficiência do filtro de biocarvão do bagaço da cana-de-açúcar, algo que também foi observado nos filtros de biocarvão da casca do coco e do sabugo de milho.

Verificando-se estatisticamente os dados da Figura 42, aplicando o teste de normalidade de Anderson Darling, as séries de dados não apresentaram distribuição normal (p-valor calculado de 0,0000009 e 0,001, respectivamente, para Filtração 01 e Filtração 02). Diante desse resultado, foi aplicado o teste de Mann-Whitney para duas amostras independentes, e constatou-se que as séries de dados não apresentaram dados homogêneos (p-valor de 0,002 e 0,0008, respectivamente, para Filtração 01 e Filtração 02).

Inferiu-se que os dados obtidos nas duas filtrações realizadas apresentaram comportamentos distintos para cor aparente, ou seja, o filtro de biocarvão do bagaço da cana-de-açúcar apresentou resultados diferentes para os efluentes do reator UASB, algo também observado no filtro de biocarvão do sabugo de milho.

Figura 43 - Turbidez das amostras filtradas pelo filtro de biocarvão do bagaço da cana-de-açúcar.



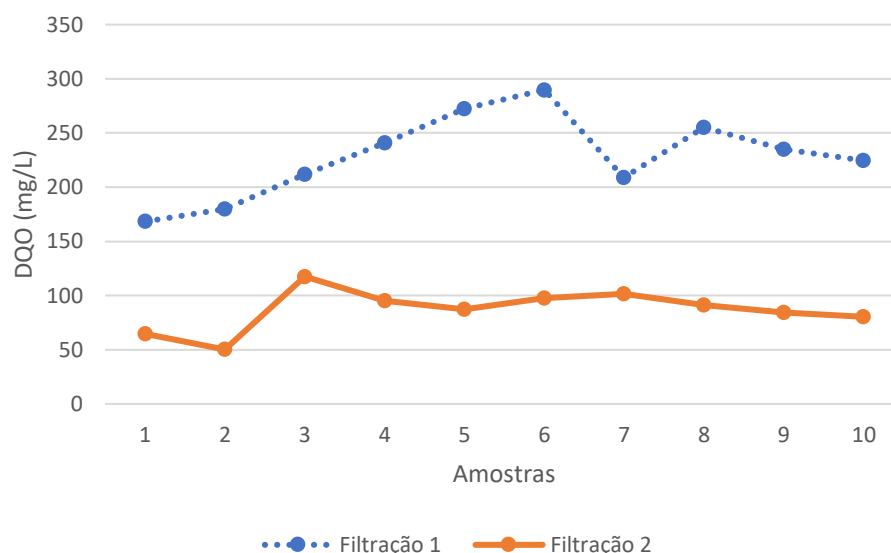
Fonte: Autor (2024).

No que se refere à turbidez, os dados obtidos na Figura 43 retratam comportamento semelhante ao do parâmetro de cor aparente, onde percebeu-se o aumento de turbidez no decorrer das coletas das amostras filtradas.

Analisando-se estatisticamente os dados da Figura 43, utilizando o teste de normalidade de Anderson Darling, as séries de dados também não apresentaram distribuição normal (p-valor de 0,0000008 e 0,015, respectivamente, para Filtração 01 e Filtração 02). Logo, foi aplicado o teste de Mann-Whitney para duas amostras independentes, e verificou-se que as séries de dados da Filtração 01 e da Filtração 02 não registraram dados homogêneos (p-valor de 0,001 e 0,0004, respectivamente, inferiores a 0,05).

Assim, observou-se que os dados coletados nas duas filtrações apresentaram comportamentos diferentes estatisticamente quanto à turbidez com o uso do filtro de biocarvão do bagaço da cana-de-açúcar.

Figura 44 - DQO das amostras filtradas pelo filtro de biocarvão do bagaço da cana-de-açúcar.



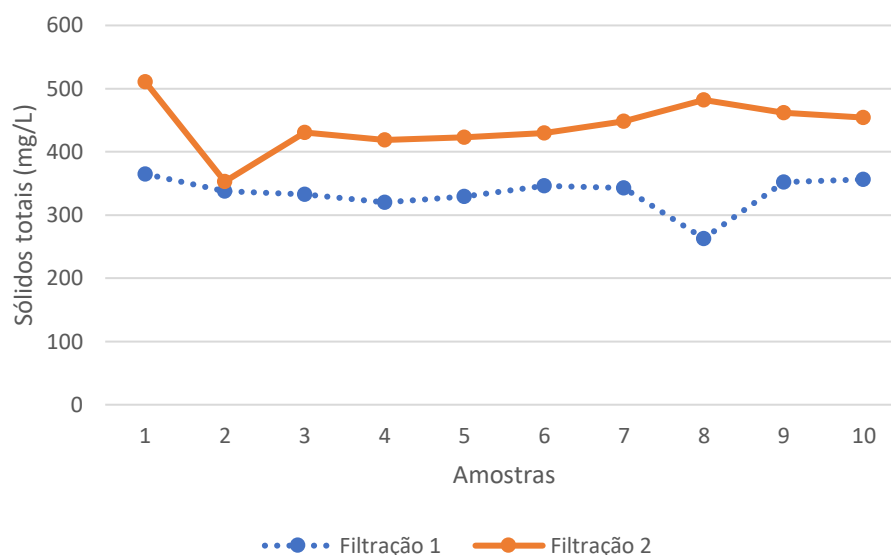
Fonte: Autor (2024).

No tocante à DQO, pode-se observar que na Filtração 01 houve um aumento desse parâmetro ao longo da filtração e que na Filtração 02 houve inicialmente um aumento desse parâmetro e posteriormente uma constância dados coletados. As justificativas para esses comportamentos distintos nas duas filtrações serão expostas na seção 6.6 – Avaliação das eficiências.

Estudando-se estatisticamente os dados da Figura 44, aplicando o teste de normalidade de Anderson Darling, as duas séries de dados apresentaram distribuição normal (p-valor calculado de 0,852 e 0,838, respectivamente, para Filtração 001 e Filtração 2). Logo, utilizou-se o teste ANOVA, e constatou-se que as séries de dados da Filtração 01 e da Filtração 02 apresentaram dados homogêneos, pois o p-valor calculado (0,993).

Concluiu-se que os dados obtidos nas duas filtrações realizadas apresentaram comportamentos semelhantes, ou seja, o filtro de biocarvão do bagaço da cana-de-açúcar apresentou resultados similares para os efluentes do reator UASB.

Figura 45 - Sólidos totais das amostras filtradas pelo filtro de biocarvão do bagaço da cana-de-açúcar.



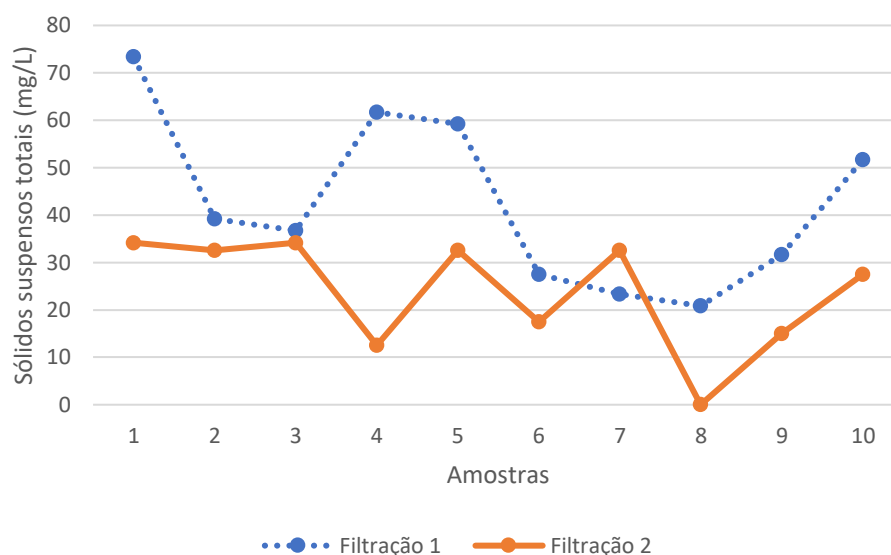
Fonte: Autor (2024).

Quanto aos sólidos totais (Figura 45), as amostras filtradas apresentaram comportamentos irregulares, oscilando entre aumento e diminuição desse parâmetro em ambas as filtrações.

Verificando-se estatisticamente os dados da Figura 45, aplicando o teste de normalidade de Anderson Darling, enquanto a série de dados da Filtração 01 não apresentou uma distribuição normal (p-valor de 0,009), a série de dados da Filtração 02 seguiu uma distribuição normal (p-valor de 0,156). Diante disso, foi aplicado o teste de Mann-Whitney para duas amostras independentes, e verificou-se que as séries de dados da Filtração 01 e da Filtração 02 não apresentaram dados homogêneos (p-valor de 0,0001 e 0,00001, respectivamente, inferiores a 0,05).

Inferiu-se que os dados obtidos nas duas filtrações realizadas apresentaram comportamentos distintos para sólidos totais em ambas as filtrações realizadas com o filtro do biocarvão do bagaço da cana-de-açúcar.

Figura 46 - Sólidos suspensos totais das amostras filtradas pelo filtro de biocarvão do bagaço da cana-de-açúcar.



Fonte: Autor (2024).

Por fim, quanto aos sólidos suspensos totais (Figura 46), as amostras filtradas com o biocarvão do bagaço da cana-de-açúcar apresentaram comportamentos irregulares, oscilando entre aumento e diminuição desse parâmetro em ambas as filtrações, algo também verificado nas amostras filtradas com os filtros do biocarvão da casca de coco e sabugo de milho.

Analisando-se estatisticamente os dados da Figura 46, utilizando o teste de normalidade de Anderson Darling, enquanto a série de dados da Filtração 01 não apresentou uma distribuição normal (p-valor de 0,045), a série de dados da Filtração 02 seguiu uma distribuição normal (p-valor de 0,088). Com isso, foi aplicado o teste de Mann-Whitney para duas amostras independentes, e verificou-se que as séries de dados da Filtração 01 e da Filtração 02 não apresentaram dados homogêneos (p-valor de 0,015 e 0,013, respectivamente).

Concluiu-se que os dados coletados nas duas filtrações com o filtro de biocarvão do bagaço da cana-de-açúcar apresentaram comportamentos diferentes quanto aos sólidos suspensos totais para as amostras filtrados com efluentes do reator UASB com características diferentes.

6.5.2.4. Efluentes do filtro de carvão ativado

Do uso dos filtros de biocarvão de carvão ativado nos efluentes do reator UASB, foram obtidos os seguintes resultados dispostos na Tabela 11 para os parâmetros físico-químicos analisados nas duas filtrações realizadas (F1 e F2) no decorrer das 02 amostras coletadas, ao contrário dos demais filtros que foram recolhidas 10 amostras em cada filtração.

Tabela 11 - Caracterização dos efluentes do filtro de carvão ativado.

Amostra	Parâmetros físico-químicos analisados									
	Cor aparente (uH)		Turbidez (uT)		DQO (mg/L)		Sólidos totais (mg/L)		Sólidos suspensos totais (mg/L)	
	F1	F2	F1	F2	F1	F2	F1	F2	F1	F2
01	144	46	16	4	142	-	627	879	38	6
02	169	78	16	6	212	-	608	298	22	2

Fonte: Autor (2024).

No que se refere à DQO, somente foram obtidos resultados coerentes na Filtração 01, pois na Filtração 02, mesmo realizando-se em duplicata, foram obtidos resultados negativos desse parâmetro, por isso, os mesmos foram descartados, restante apenas os dados da Filtração 01.

Devido à pequena quantidade de dados disponíveis, apenas duas coletas, não foi possível realizar uma análise estatística dos resultados obtidos nos filtros de carvão ativado. Por isso, para se cumprir os objetivos do presente trabalho, foram também utilizados resultados coletados na literatura para análise comparativa entre os filtros de biocarvão e o filtro de carvão ativado.

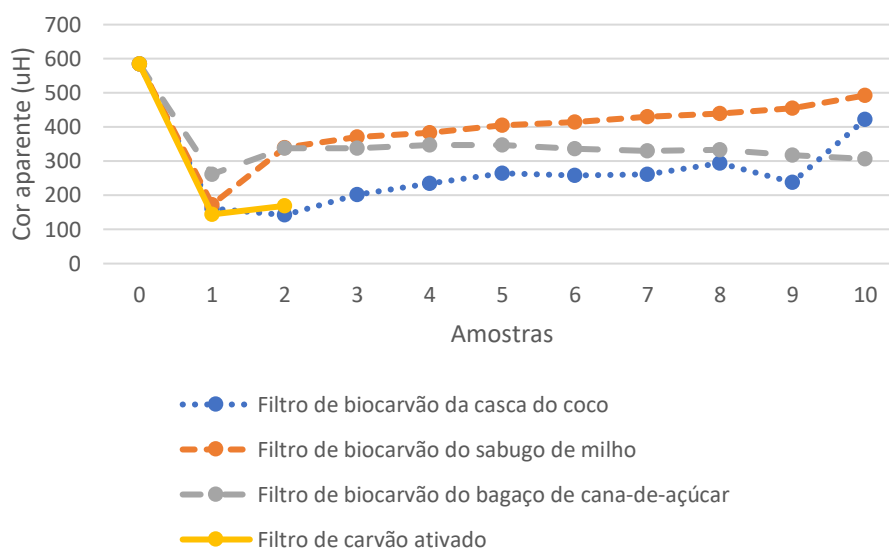
6.6. Avaliação das eficiências

Nessa seção foram avaliadas e discutidas as eficiências de redução dos parâmetros físico-químicos dos efluentes dos filtros produzidos nas duas filtrações realizadas.

6.6.1. Cor aparente

Quanto a esse parâmetro, com os dados coletados dos quatro filtros utilizados, foi possível construir o gráfico da Figura 47, no qual pode-se analisar comparativamente a performance de cada filtro e avaliar o mais eficiente na redução desse parâmetro na Filtração 01, partindo da amostra bruta do efluente do reator UASB (amostra 0).

Figura 47 - Cor aparente dos efluentes da Filtração 01 nos filtros produzidos.



Fonte: Autor (2024).

Analisando a Figura 47, pode-se observar a priori que o filtro de biocarvão da casca de coco apresentou os melhores resultados de redução desse parâmetro físico no decorrer do seu uso. Notou-se também que à medida que a maioria dos filtros iam sendo utilizados havia uma redução da eficiência dos mesmos, ou seja, os valores de cor aparente iam aumentando, porém esses valores não alcançavam o valor inicial da amostra do reator UASB (584 uH).

Com isso, visando avaliar a eficiência dos filtros quanto à cor aparente na Filtração 01, foi construída a Tabela 12 utilizando os dados da Figura 47 e aplicando a Equação 3.

Tabela 12 - Avaliação das eficiências para cor aparente da Filtração 01 dos filtros produzidos.

Amostra	Filtro de biocarvão da casca de coco	Filtro de biocarvão do sabugo de milho	Filtro de biocarvão do bagaço da cana-de-açúcar	Filtro de carvão ativado
	Eficiência (%)	Eficiência (%)	Eficiência (%)	Eficiência (%)
1	72,26	70,38	55,14	75,34
2	75,68	41,78	42,12	71,06
3	65,41	36,47	42,12	-
4	59,76	34,42	40,58	-
5	54,79	30,65	40,58	-
6	55,82	28,94	42,29	-
7	55,14	26,37	43,49	-
8	49,66	24,66	42,98	-
9	59,25	22,09	45,72	-
10	27,57	15,75	47,60	-
Eficiência Média (%)	57,53	33,15	44,26	73,20

Fonte: Autor (2024).

Comprovando-se o que se previa na Figura 47, a Tabela 12 ratifica que o filtro de biocarvão da casca de coco apresentou a maior eficiência dentre os filtros analisados com uma eficiência média de 57,53%, seguido pelo filtro de biocarvão do bagaço da cana-de-açúcar com 44,26% e pelo filtro de biocarvão do sabugo de milho com 33,15%.

Vale ressaltar que apesar do filtro de carvão ativado apresentar uma eficiência média de 73,20%, esse valor referiu-se apenas ao valor da média de eficiência de duas amostras ao contrário dos demais filtros que foram da média das 10 amostras coletadas. Porém, se fossem comparadas apenas as duas amostras iniciais de todos os filtros, ainda assim, o filtro de biocarvão da casca de coco apresentaria uma eficiência média de 73,97%, superior à eficiência do filtro de carvão ativado.

Analisando estatisticamente os dados da Figura 47, com exceção do carvão ativado, aplicando o teste de Kruskal-Wallis para comparação de três amostras independentes, obteve-se um p-valor calculado de 0,004, valor inferior a 0,05, com isso os resultados obtidos de cor aparente na Filtração 01 para os filtros testados apresentaram diferenças estatísticas entre si.

Com isso, visando identificar quais as diferenças estatísticas entre os filtros, foram calculados os dados da Tabela 13, onde quando a diferença observada era superior à diferença crítica, havia diferença estatística entre os dados coletados dos filtros, caso contrário, os dados apresentavam-se como semelhantes estatisticamente.

Tabela 13 - Análise comparativa dos dados de cor aparente dos filtros de biocarvão na Filtração 01 aplicando o teste de Kruskal-Wallis para comparação de três amostras independentes.

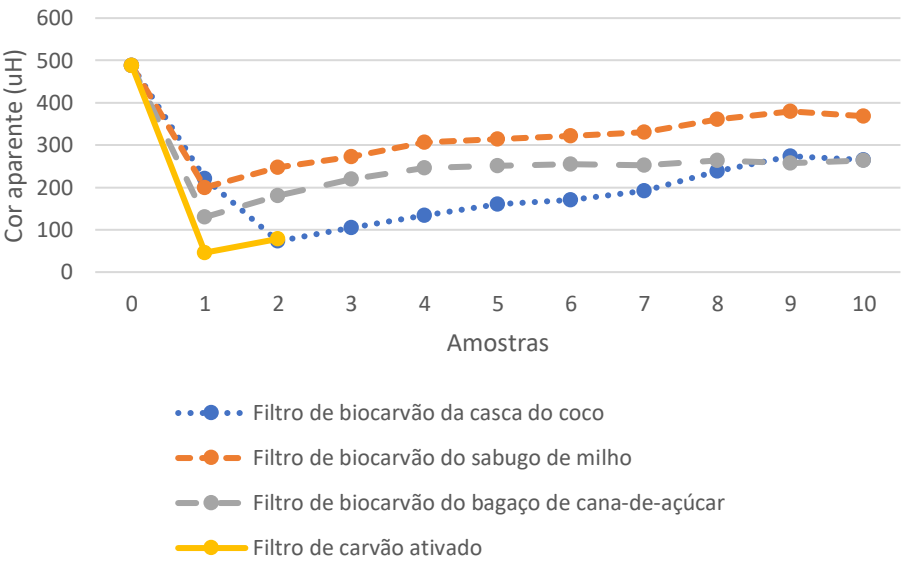
Fatores Comparados	Diferença Observada	Diferença Crítica	Há diferença estatística?
Cana - Coco	6,864	9,871	Não
Cana - Milho	6,727	9,871	Não
Coco - Milho	13,590	9,871	Sim

Fonte: Autor (2024).

Assim, com os resultados da Tabela 13, observando estatisticamente, apenas os filtros de biocarvão da casca coco e de biocarvão do sabugo de milho diferiram entre si. Nas demais hipóteses, os filtros apresentaram resultados semelhantes para cor aparente na Filtração 01.

Quanto à análise de cor aparente na Filtração 02, com os dados coletados dos quatro filtros utilizados foi possível elaborar o gráfico da Figura 48, no qual se pode analisar comparativamente o desempenho de cada filtro.

Figura 48 - Cor aparente dos efluentes da Filtração 02 dos filtros produzidos.



Fonte: Autor (2024).

Analisando a Figura 48, pode-se observar a priori que o filtro do biocarvão da casca de coco também apresentou os melhores resultados de redução de cor aparente no decorrer do seu uso. Observou-se que, assim como na Filtração 01, à medida que todos filtros iam sendo utilizados, havia uma redução da eficiência dos mesmos, ou seja, os valores de cor aparente iam aumentando, porém, esses valores não alcançavam o valor inicial da amostra do reator UASB (488 uH).

Com isso, visando avaliar a eficiência dos filtros quanto à cor aparente na Filtração 02, foi elaborada a Tabela 14 utilizando os dados da Figura 48 e aplicando a Equação 3.

Tabela 14 - Avaliação das eficiências para cor aparente da Filtração 02 dos filtros produzidos.

Amostra	Filtro de biocarvão da casca de coco	Filtro de biocarvão do sabugo de milho	Filtro de biocarvão do bagaço da cana-de-açúcar	Filtro de carvão ativado
	Eficiência (%)	Eficiência (%)	Eficiência (%)	Eficiência (%)
1	54,71	59,02	73,36	90,57
2	85,04	49,39	62,91	84,02
3	78,48	44,06	54,92	-
4	72,54	37,30	49,59	-
5	67,01	35,66	48,57	-
6	64,96	34,02	47,75	-
7	60,66	32,17	48,36	-
8	51,02	26,02	45,90	-
9	43,85	22,33	47,13	-
10	45,70	24,59	45,90	-
Eficiência Média (%)	62,40	36,45	52,44	87,30

Fonte: Autor (2024).

Assim como na Filtração 01, a Filtração 02 apresentou resultados semelhantes, os dados da Tabela 14 confirmam que o filtro de biocarvão da casca de coco registrou a maior eficiência dentre os filtros analisados com eficiência média de 62,40%, seguido pelo filtro de biocarvão do bagaço da cana-de-açúcar com 52,44% e pelo filtro de biocarvão do sabugo de milho com 36,45%.

Apesar do filtro de carvão ativado apresentar uma eficiência média de 73,20%, esse valor se referiu apenas ao valor da média de eficiência de duas amostras ao contrário dos demais filtros que foram da média das 10 amostras coletadas. Contudo, comparando-se as duas amostras iniciais de todos os filtros, o filtro de carvão ativado (73,20%) superaria o filtro de biocarvão de casca de coco (69,88%).

Analisando estatisticamente os dados da Figura 48, com exceção do carvão ativado, aplicando o teste de Kruskal-Wallis para comparação de três amostras independentes, obteve-se um p-valor calculado de 0,006, valor inferior a 0,05, com isso os resultados obtidos de cor aparente na Filtração 02 para os filtros testados apresentaram diferenças estatísticas entre si. Com isso, visando identificar quais as diferenças estatísticas entre os filtros, foram calculados os dados da Tabela 15.

Tabela 15 - Análise comparativa dos dados de cor aparente dos filtros de biocarvão na Filtração 02 aplicando o teste de Kruskal-Wallis para comparação de três amostras independentes.

Fatores Comparados	Diferença Observada	Diferença Crítica	Há diferença estatística?
Cana - Coco	4,091	9,871	Não
Cana - Milho	8,727	9,871	Não
Coco - Milho	12,818	9,871	Sim

Fonte: Autor (2024).

Assim como na Filtração 01, na Filtração 02, conforme os resultados obtidos na Tabela 15, observou-se que estatisticamente apenas os filtros de biocarvão da casca de coco e de biocarvão do sabugo de milho diferiram entre si para cor aparente.

Diante dos resultados obtidos nas duas filtrações realizadas, pode-se afirmar que todos os filtros produzidos se mostraram eficientes para a redução do parâmetro físico de cor aparente, contudo houve um destaque para o filtro de biocarvão da casca de coco, do qual pode-se enumerar uma série de fatores que podem ter contribuído para as melhores reduções desse parâmetro por esse filtro, dentre os quais: maior taxa de condutividade elétrica conforme observado na Tabela 5, elevada área superficial e maior volume e diâmetro dos poros dentre os biocarvões produzidos (Tabela 4).

Esses resultados corroboram com afirmação de Macêdo (2012) que os biocarvões podem ser utilizados no tratamento de efluentes, especificamente, na fase de polimento, visando a remoção de cor ou de componentes específicos. Ainda, segundo Pimenta (2018), a remoção

de cor é de fundamental importância nos tratamentos de efluentes, visto que é um parâmetro de controle de qualidade da água bruta e filtrada, notadamente, na purificação do efluente.

No tocante aos resultados obtidos pelo filtro de biocarvão da casca de coco, Ribeiro (2016) afirma que o biocarvão da casca de coco, por possuir uma elevada área superficial e grande volume de poros, consegue reter partículas maiores, o que gera o preenchimento antecipado dos poros dificultando assim a passagem do efluente. Com isso, os sólidos presentes no efluente do reator UASB aceleram a formação de aglomerados e a saturação do meio filtrando.

Isto pode justificar o porquê do filtro de biocarvão da casca de coco ter apresentado os maiores tempos de filtração (Tabelas 6 e 7) dentre os filtros de biocarvão produzidos para a coleta das 10 amostras previstas.

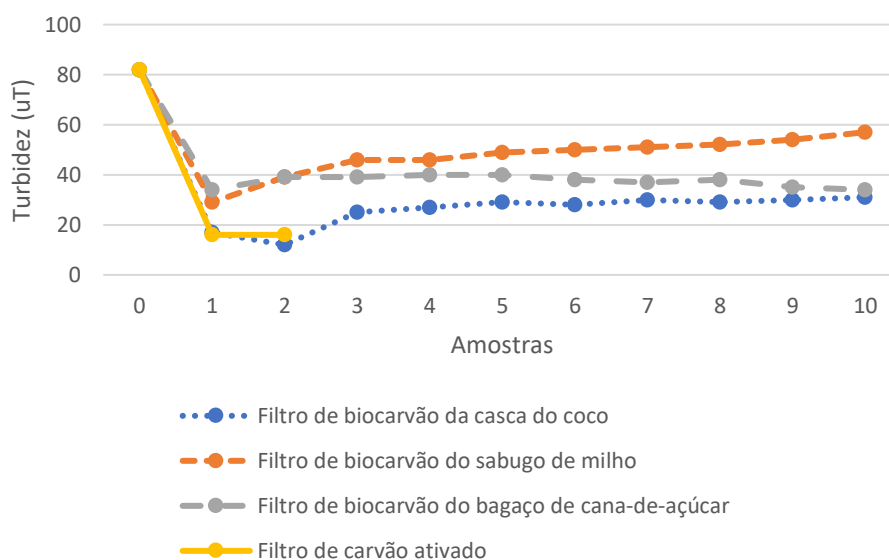
Na literatura, resultados significativos de redução de cor aparente utilizando biocarvões também foram obtidos por Sthoher et al. (2012), em que filtros de biocarvão de bagaço de laranja apresentaram reduções de 46,15% para efluentes de uma fábrica de lavagem de jeans. Já Ferreira (2018), trabalhando com biocarvão de borra de café, conseguiu remoção relevante de azul de metileno, concluindo-se que esse material era um excelente adsorvente para remoção de cor.

Quanto aos filtros de carvão ativado, Alves (2020) utilizando filtro de carvão ativado e areia obteve uma taxa de redução de 44,01% para cor aparente.

6.6.2. *Turbidez*

Quanto a esse parâmetro, com os dados coletados dos quatro filtros utilizados foi possível construir o gráfico da Figura 49, no qual pode-se analisar comparativamente a performance de cada filtro e avaliar o mais eficiente na redução de turbidez na Filtração 01, partindo da amostra bruta do efluente do reator UASB (amostra 0).

Figura 49 - Turbidez dos efluentes da Filtração 01 dos filtros produzidos.



Fonte: Autor (2024).

Analisando a Figura 49, pode-se constatar a priori que o filtro de biocarvão da casca de coco apresentou os melhores resultados de redução de turbidez no decorrer do seu uso. Verificou-se que assim como na cor aparente, à medida que a maioria dos filtros iam sendo utilizados, havia redução da eficiência dos mesmos, ou seja, os valores de turbidez iam aumentando, porém, esses valores não chegavam ao valor inicial da amostra do reator UASB (82 uT).

Com isso, visando avaliar a eficiência dos filtros quanto à turbidez na Filtração 01, foi construída a Tabela 16, utilizando os dados da Figura 49 e aplicando a Equação 3.

Tabela 16 - Avaliação das eficiências para turbidez da Filtração 01 dos filtros produzidos.

Amostra	Filtro de biocarvão da casca de coco	Filtro de biocarvão do sabugo de milho	Filtro de biocarvão do bagaço da cana-de-açúcar	Filtro de carvão ativado
	Eficiência (%)	Eficiência (%)	Eficiência (%)	Eficiência (%)
1	79,27	64,63	58,54	80,49
2	85,37	52,44	52,44	80,49
3	69,51	43,90	52,44	-
4	67,07	43,90	51,22	-
5	64,63	40,24	51,22	-
6	65,85	39,02	53,66	-
7	63,41	37,80	54,88	-
8	64,63	36,59	53,66	-
9	63,41	34,15	57,32	-
10	62,20	30,49	58,54	-
Eficiência Média (%)	68,54	42,32	54,39	80,49

Fonte: Autor (2024).

Os resultados da Tabela 16 confirmam que o filtro de biocarvão da casca de coco registrou a maior eficiência de redução de turbidez dentre os filtros analisados com eficiência média de 68,54%, seguido pelo filtro de biocarvão do bagaço da cana-de-açúcar com 54,39% e pelo filtro de biocarvão do sabugo de milho com 42,32%.

Vale ressaltar que embora o filtro de carvão ativado tenha apresentado uma eficiência média de 80,49%, esse valor se referiu apenas a média das duas amostras coletadas. Porém, comparando-se as duas amostras iniciais de todos os filtros, mesmo assim, o filtro de biocarvão da casca de coco apresentaria uma eficiência média de redução de turbidez de 82,32%, superior ao do filtro de carvão ativado.

Analisando estatisticamente os dados da Figura 49, com exceção do carvão ativado, aplicando o teste de Kruskal-Wallis para comparação de três amostras independentes, obteve-se um p-valor calculado de 0,0003, valor inferior a 0,05, com isso os resultados obtidos de turbidez na Filtração 01 para os filtros testados apresentaram diferenças estatísticas entre si.

Com isso, visando identificar quais as diferenças estatísticas entre os filtros, foram calculados os dados da Tabela 17.

Tabela 17 - Análise comparativa dos dados de turbidez dos filtros de biocarvão na Filtração 01 aplicando o teste de Kruskal-Wallis para comparação de três amostras independentes.

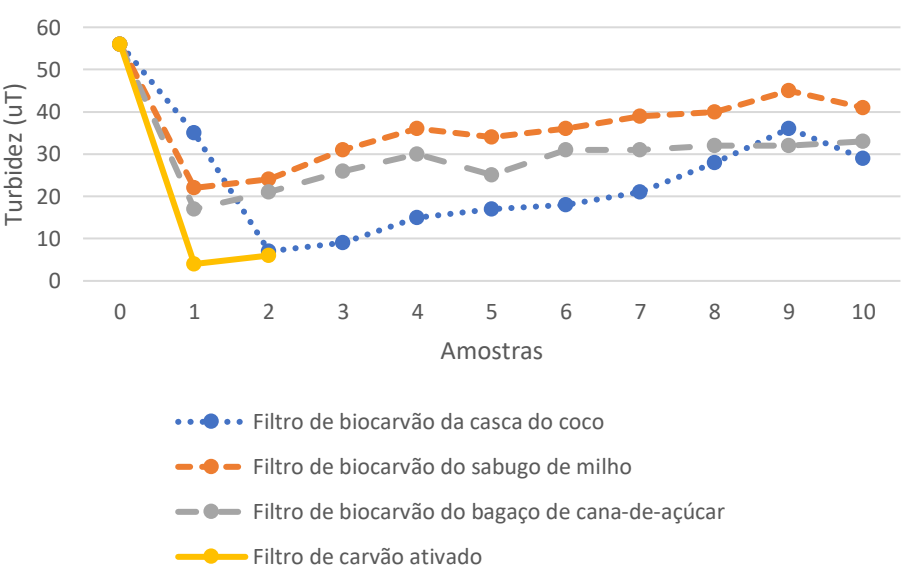
Fatores Comparados	Diferença Observada	Diferença Crítica	Há diferença estatística?
Cana - Coco	10,045	9,871	Sim
Cana - Milho	6,227	9,871	Não
Coco - Milho	16,273	9,871	Sim

Fonte: Autor (2024).

Assim, com os resultados da Tabela 17, observando estatisticamente, apenas o filtro de biocarvão da casca de coco diferiu dos demais filtros no tocante à turbidez.

Quanto à análise de turbidez na Filtração 02, com os dados coletados dos quatro filtros utilizados foi possível elaborar o gráfico da Figura 50, no qual pode-se analisar comparativamente o desempenho de cada filtro.

Figura 50 - Turbidez dos efluentes da Filtração 02 dos filtros produzidos.



Fonte: Autor (2024).

Analisando a Figura 50, pode-se observar que o filtro do biocarvão da casca de coco apresentou novamente os melhores resultados de redução de turbidez no decorrer do seu uso na Filtração 02. Notou-se que assim como na Filtração 01, à medida que todos filtros iam sendo utilizados, havia uma redução da eficiência dos mesmos, ou seja, os valores de turbidez iam

aumentando, porém esses valores não alcançavam o valor inicial da amostra do reator UASB (56 uT).

Com isso, visando avaliar a eficiência dos filtros quanto à turbidez na Filtração 02, foi construída a Tabela 18, utilizando os dados da Figura 50 e aplicando a Equação 3.

Tabela 18 – Avaliação das eficiências para turbidez da Filtração 02 dos filtros produzidos.

Amostra	Filtro de biocarvão da casca de coco	Filtro de biocarvão do sabugo de milho	Filtro de biocarvão do bagaço da cana-de-açúcar	Filtro de carvão ativado
	Eficiência (%)	Eficiência (%)	Eficiência (%)	Eficiência (%)
1	37,50	60,71	69,64	92,86
2	87,50	57,14	62,50	89,29
3	83,93	44,64	53,57	-
4	73,21	35,71	46,43	-
5	69,64	39,29	55,36	-
6	67,86	35,71	44,64	-
7	62,50	30,36	44,64	-
8	50,00	28,57	42,86	-
9	35,71	19,64	42,86	-
10	48,21	26,79	41,07	-
Eficiência Média (%)	61,61	37,86	50,36	91,07

Fonte: Autor (2024).

Assim como verificado na Filtração 01, a Filtração 02 apresentou resultados semelhantes, os dados da Tabela 18 confirmam que o filtro de biocarvão da casca de coco conseguiu obter a maior eficiência dentre os filtros analisados com eficiência média de 61,61%, seguido pelo filtro de biocarvão do bagaço da cana-de-açúcar com 50,36% e pelo filtro de biocarvão do sabugo de milho com 37,86%.

Conforme observado na Tabela 18, embora o filtro de carvão ativado tenha apresentado eficiência média de 91,07%, a mesma se referiu apenas a análise de duas amostras. Com isso, comparando-se as duas amostras iniciais de todos os filtros, o filtro de carvão ativado (91,07%)

superaria o filtro de biocarvão de casca de coco (62,50%) no quesito eficiência média de turbidez.

Analisando estatisticamente os dados da Figura 50, com exceção do carvão ativado, aplicando o teste de Kruskal-Wallis para comparação de três amostras independentes, obteve-se um p-valor calculado de 0,022, valor inferior a 0,05, com isso os resultados obtidos de turbidez na Filtração 02 para os filtros testados apresentaram diferenças estatísticas entre si. Com isso, visando identificar quais as diferenças estatísticas entre os filtros, foram calculados os dados da Tabela 19.

Tabela 19 - Análise comparativa dos dados de turbidez dos filtros de biocarvão na Filtração 02 aplicando o teste de Kruskal-Wallis para comparação de três amostras independentes.

Fatores Comparados	Diferença Observada	Diferença Crítica	Há diferença estatística?
Cana - Coco	4,091	9,871	Não
Cana - Milho	7,091	9,871	Não
Coco - Milho	11,182	9,871	Sim

Fonte: Autor (2024).

Assim, com os resultados da Tabela 19, observando estatisticamente, apenas os filtros de biocarvão da casca coco e de biocarvão do sabugo de milho diferiram entre si, nas demais hipóteses, os filtros apresentaram resultados semelhantes para turbidez.

Diante dos resultados obtidos nas duas filtrações realizadas, pode-se afirmar que todos os filtros produzidos se mostraram eficientes para a redução do parâmetro físico de turbidez, porém, assim como no parâmetro de cor aparente, houve um destaque para o filtro de biocarvão da casca de coco, algo já previsível, tendo em vista que os parâmetros de cor aparente e turbidez estão diretamente relacionados. Segundo Von Sperling (1996), a turbidez é parcela constituinte da cor aparente, podendo interferir na passagem da luz na água, conferir aparência turva à mesma e com isso, aumentar o seu valor. Já, na determinação da cor verdadeira, há a eliminação dessas partículas em suspensão através do método aplicado não influenciando significativamente no seu valor.

De acordo com Oliveira et al. (2023), analisando diversos artigos nacionais e internacionais, constatou-se que os biocarvões quando aplicados no pós-tratamento de efluentes visam, principalmente, a remoção de matéria orgânica e melhorar o parâmetro físico de turbidez das águas residuárias.

Diante disso, estudos de Melo (2014) comprovam a eficiência do uso de biocarvões na melhoria desse parâmetro, pois, utilizando filtros de areia e biocarvão da casca de coco, conseguiu-se uma redução de 95% de turbidez de amostras de um efluente de reator UASB. Já, trabalhos de Sthoher et al. (2012), utilizando filtros de biocarvão de bagaço de laranja, relatam que uso desse material proporcionou uma redução significativa de turbidez de 54,54%. Enquanto que pesquisas de Riahi et al. (2009), utilizando biocarvão de palmeira como meio filtrante, reportam uma eficiência máxima de 54,9% de redução do parâmetro de turbidez.

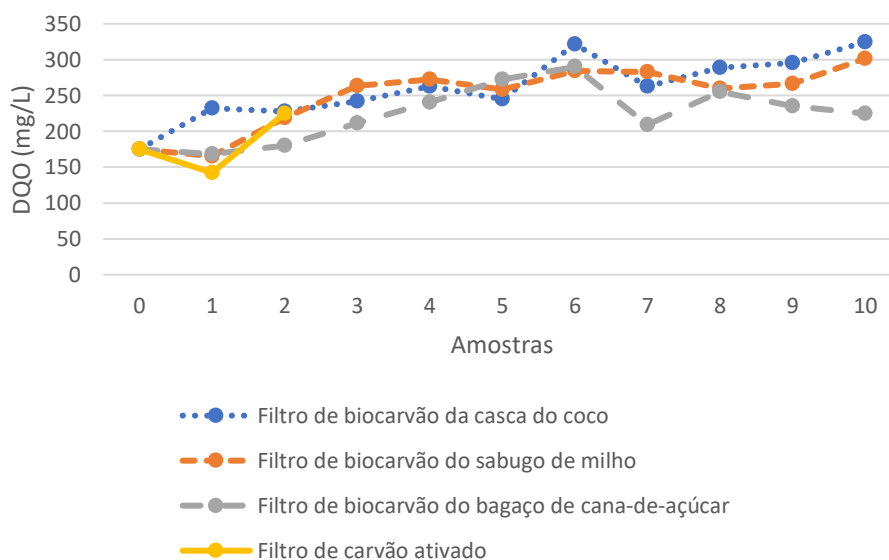
Quanto aos filtros de carvão ativado, Chuang et al. (2005), aplicando um filtro de areia e carvão ativado no pós-tratamento de efluentes industriais, obtiveram uma taxa de remoção de turbidez de 86%.

Além disso, estudos de Aisse et al. (2007) relataram uma redução de 83% de turbidez para efluentes de reatores UASB, utilizando filtros de areia e carvão ativado. Por fim, trabalhos de Alves (2020) reportam uma taxa de redução de 90% para turbidez aplicando filtros lentos de areia e carvão ativado.

6.6.3. DQO

Quanto a esse parâmetro, com os dados coletados dos quatro filtros utilizados, foi possível obter o gráfico da Figura 51, no qual pode-se analisar comparativamente a comportamento de cada filtro e avaliar o mais eficiente na redução desse parâmetro na Filtração 01, partindo da amostra bruta do efluente do reator UASB (amostra 0).

Figura 51 - DQO dos efluentes da Filtração 01 dos filtros produzidos.



Fonte: Autor (2024).

Analisando a Figura 51, pode-se observar que nenhum dos filtros produzidos apresentou eficiência de redução para o parâmetro de DQO, ou seja, houve aumento desse parâmetro nas amostras filtradas quando comparadas com a amostra bruta inicial do reator UASB (175 mg/L).

Com isso, visando comprovar a ineficiência dos filtros verificada na Figura 51 para o parâmetro de DQO, foi construída a Tabela 20, aplicando a Equação 3.

Tabela 20 - Avaliação das eficiências para DQO da Filtração 01 dos filtros produzidos.

Amostra	Filtro de biocarvão da casca de coco	Filtro de biocarvão do sabugo de milho	Filtro de biocarvão do bagaço da cana-de-açúcar	Filtro de carvão ativado
	Eficiência (%)	Eficiência (%)	Eficiência (%)	Eficiência (%)
1	*	6,02	4,38	19,18
2	*	*	*	*
3	*	*	*	-
4	*	*	*	-
5	*	*	*	-
6	*	*	*	-
7	*	*	*	-
8	*	*	*	-
9	*	*	*	-
10	*	*	*	-
Eficiência Média (%)	*	*	*	*

*valor negativo

Fonte: Autor (2024).

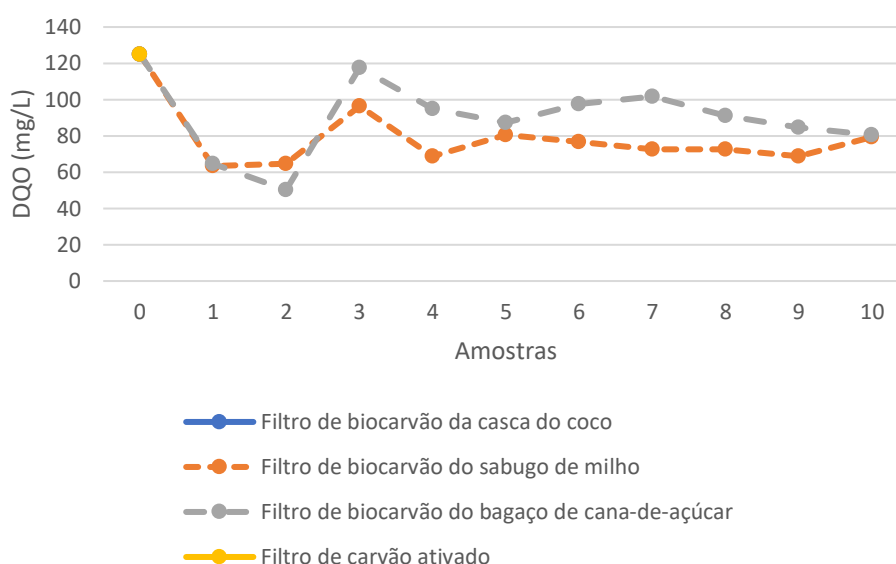
Conforme observado na Tabela 20, nenhum dos filtros apresentou eficiência para a DQO. Porém, a nível de curiosidade, comparando-se apenas as primeiras amostras dos filtros, o filtro de carvão ativado apresentaria a melhor eficiência média com 19,18%, seguido filtro de biocarvão de sabugo de milho com 6,02% e pelo filtro de biocarvão do bagaço da cana-de-açúcar com 4,38%.

Analisando estatisticamente os dados da Figura 51, com exceção do carvão ativado, utilizando o teste de Kruskal-Wallis para comparação de três amostras independentes, obteve-

se um p-valor calculado de 0,433, valor superior a 0,05, com isso os resultados obtidos de DQO na Filtração 01 para os filtros testados apresentaram valores semelhantes estatisticamente entre si.

Quanto à análise de DQO na Filtração 02, com os dados coletados dos quatro filtros utilizados, foi possível elaborar o gráfico da Figura 52. No entanto, vale ressaltar que os dados obtidos para os filtros de biocarvão da casca do coco e do carvão ativado foram descartados, pois apresentaram valores de DQO negativos, mesmo sendo realizados em duplicata.

Figura 52 - DQO dos efluentes da Filtração 02 dos filtros produzidos.



Fonte: Autor (2024).

Analisando a Figura 52, pode-se observar que diferentemente da Filtração 01, alguns filtros conseguiram apresentar eficiência de redução para o parâmetro de DQO. Nota-se que o filtro de biocarvão do sabugo de milho apresentou os melhores resultados seguido pelo filtro de biocarvão do bagaço da cana-de-açúcar.

Diante disso, visando avaliar a eficiência dos filtros quanto à DQO na Filtração 02, foi construída a Tabela 21 utilizando os dados da Figura 52 e aplicando a Equação 3.

Tabela 21 - Avaliação das eficiências para DQO da Filtração 02 dos filtros produzidos.

Amostra	Filtro de biocarvão da casca de coco	Filtro de biocarvão do sabugo de milho	Filtro de biocarvão do bagaço da cana-de-açúcar	Filtro de carvão ativado
	Eficiência (%)	Eficiência (%)	Eficiência (%)	Eficiência (%)
1	-	49,29	48,23	-
2	-	48,23	59,85	-
3	-	22,89	5,99	-
4	-	45,06	23,94	-
5	-	35,56	30,28	-
6	-	38,73	21,83	-
7	-	41,90	18,66	-
8	-	41,90	27,11	-
9	-	45,06	32,39	-
10	-	36,62	35,56	-
Eficiência Média (%)	-	40,52	30,39	-

Fonte: Autor (2024).

Com os resultados da Tabela 21, pode-se confirmar que o filtro de biocarvão do sabugo de milho apresentou a maior eficiência de redução de DQO dentre os filtros analisados com eficiência média de 40,52%, seguido pelo filtro de biocarvão do bagaço da cana-de-açúcar com 30,39%.

Porém, analisando estatisticamente os dados da Figura 52, aplicando o teste de Kruskal-Wallis para comparação de três amostras independentes, obteve-se um p-valor calculado de 0,083, valor superior a 0,05, com isso os resultados obtidos de DQO na Filtração 02 para os filtros testados apresentaram valores semelhantes estatisticamente entre si.

Diante dos resultados obtidos nas duas filtrações realizadas, pode-se constatar que na Filtração 01, todos os filtros se mostraram ineficientes quanto à remoção da DQO, o que pode estar atrelado ao fato de que o efluente coletado do reator UASB para Filtração 01 se apresentava mais concentrado ao contrário do efluente utilizado na Filtração 02 que se mostrava mais diluído. Além disso, o aumento da DQO também pode estar associado à degradação do próprio biocarvão aplicado na produção dos filtros, devido aos mesmos serem constituídos

basicamente de matéria orgânica, e o contato com o efluente gera a liberação dessa matéria orgânica para as amostras filtradas, algo também verificado nos estudos de Sthoher et al. (2012), que apresentaram aumento de DQO (66,66%) e DBO (147,05%), devido à degradação do biocarvão do bagaço da laranja em contato com o efluente.

Trabalhos de Ribeiro (2016) também verificaram um aumento da DQO, utilizando filtros constituídos de biocarvão da casca de coco e brita para o tratamento de efluentes domésticos brutos, onde esse aumento foi justificado pelo possível arraste das partículas finas do biocarvão junto às amostras filtradas.

Porém estudo de Melo (2014) apresentou eficiência de remoção de matéria orgânica (DQO) de 89%, aplicando um filtro combinado de areia e biocarvão da casca de coco. Contudo foram testadas as mesmas amostras de efluentes em um filtro constituído de apenas areia e percebeu-se uma eficiência semelhante, assim constatando que o biocarvão da casca de coco teve pouca influência em relação à remoção da DQO.

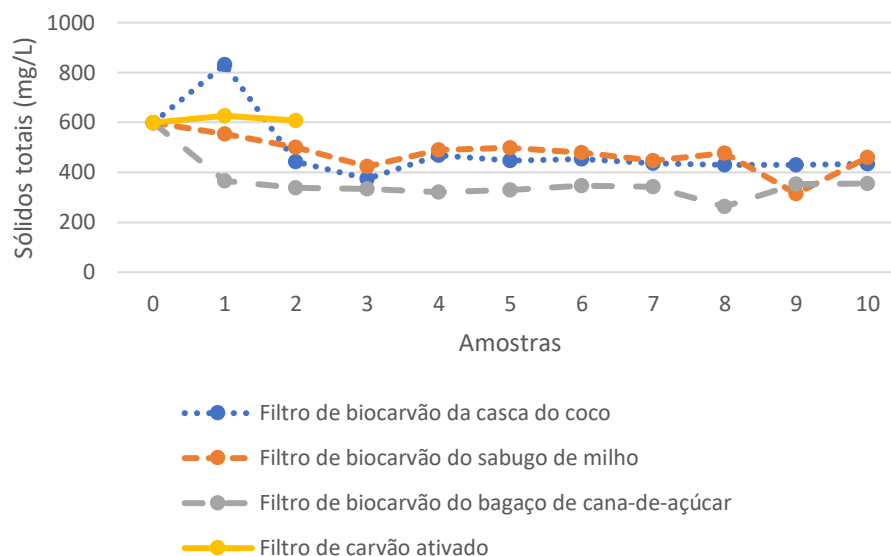
No entanto, vale ressaltar a importância dos resultados obtidos na Filtração 02, onde pode-se concluir que, para amostras de efluentes de reator UASB mais diluídas, os filtros de biocarvão do bagaço da cana-de-açúcar e do sabugo de milho podem ser aplicados com perspectivas de remoção de DQO significativas.

Quanto aos filtros de carvão ativado, na literatura, Chuang et al. (2005), aplicando um filtro de areia e carvão ativado no pós-tratamento de efluentes industriais, obtiveram uma taxa de remoção de DQO de 33%.

6.6.4. *Sólidos Totais*

Quanto a esse parâmetro, com os dados coletados dos quatro filtros utilizados foi possível construir o gráfico da Figura 53, no qual pode-se analisar comparativamente o comportamento de cada filtro na Filtração 01, partindo da amostra bruta do efluente do reator UASB (amostra 0).

Figura 53 - Sólidos totais dos efluentes da Filtração 01 dos filtros produzidos.



Fonte: Autor (2024).

Analisando a Figura 53, pode-se constatar que o filtro de biocarvão do bagaço de cana-de-açúcar apresentou os melhores resultados de redução de sólidos totais no decorrer do seu uso, seguido pelo filtro de biocarvão do sabugo de milho. Notou-se também que no filtro de carvão ativado houve um aumento dos sólidos totais nas duas amostras coletadas.

Diante disso, visando avaliar a eficiência dos filtros quanto aos sólidos totais na Filtração 01, foi construída a Tabela 22 utilizando os dados da Figura 53 e aplicando a Equação 3.

Tabela 22 - Avaliação das eficiências para sólidos totais da Filtração 01 dos filtros produzidos.

Amostra	Filtro de biocarvão da casca de coco	Filtro de biocarvão do sabugo de milho	Filtro de biocarvão do bagaço da cana-de-açúcar	Filtro de carvão ativado
	Eficiência (%)	Eficiência (%)	Eficiência (%)	Eficiência (%)
1	*	7,51	39,07	*
2	26,21	16,36	43,57	*
3	37,56	29,38	44,41	-
4	21,87	18,20	46,58	-
5	25,21	16,86	45,08	-
6	24,21	20,03	42,24	-
7	27,21	25,38	42,74	-
8	28,21	20,37	56,09	-
9	28,05	47,41	41,24	-
10	27,38	23,21	40,57	-
Eficiência Média (%)	20,70	22,47	44,16	*

*valor negativo

Fonte: Autor (2024).

Os resultados da Tabela 22 confirmam que o filtro de biocarvão do bagaço da cana-de-açúcar registrou a maior eficiência de redução de sólidos totais dentre os filtros, analisados com eficiência média de 44,16%, seguido pelo filtro de biocarvão do sabugo de milho com 22,47% e pelo filtro de biocarvão da casca de coco com 20,70%.

Conforme mencionado anteriormente, o filtro de carvão ativado mostrou-se ineficaz na redução desse parâmetro.

Analisando estatisticamente os dados da Figura 53, com exceção do carvão ativado, utilizando o teste de Kruskal-Wallis para comparação de três amostras independentes, obteve-se um p-valor calculado de 0,0001, valor inferior a 0,05, com isso os resultados obtidos de sólidos totais na Filtração 01 para os filtros testados apresentaram diferenças estatísticas entre si. Com isso, visando identificar quais as diferenças estatísticas entre os filtros, foram calculados os dados da Tabela 23.

Tabela 23 - Análise comparativa dos dados de sólidos totais dos filtros de biocarvão na Filtração 01 aplicando o teste de Kruskal-Wallis para comparação de três amostras independentes.

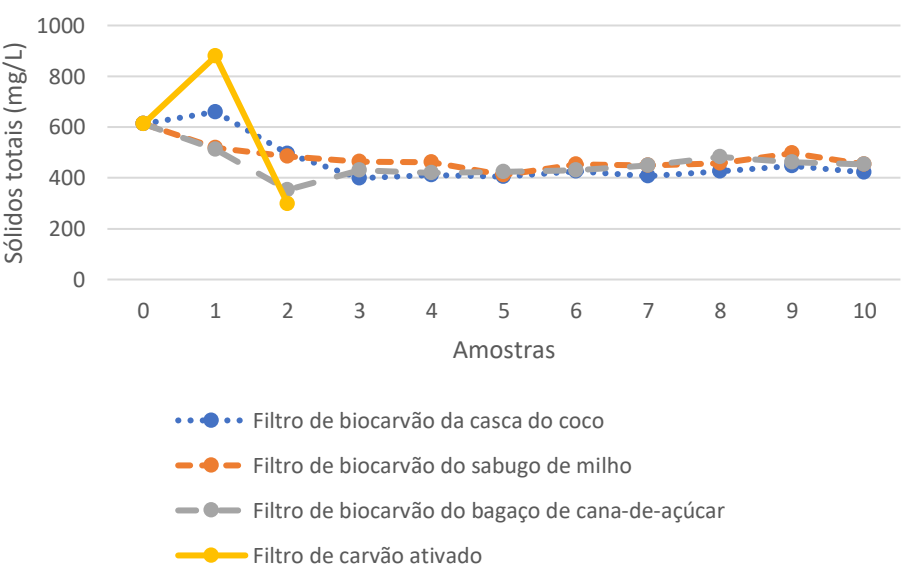
Fatores Comparados	Diferença Observada	Diferença Crítica	Há diferença estatística?
Cana - Coco	13,954	9,871	Sim
Cana - Milho	16,318	9,871	Sim
Coco - Milho	2,364	9,871	Não

Fonte: Autor (2024).

Assim, com os resultados da Tabela 23, observando estatisticamente, apenas o filtro de biocarvão do bagaço da cana-de-açúcar diferiu dos demais filtros no tocante aos sólidos totais na Filtração 01.

Quanto à análise de sólidos totais na Filtração 02, com os dados coletados dos quatro filtros utilizados foi possível elaborar o gráfico da Figura 54, no qual pode-se analisar comparativamente a performance de cada filtro e avaliar o mais eficiente na redução desse parâmetro.

Figura 54 - Sólidos Totais dos efluentes da Filtração 02 dos filtros produzidos.



Fonte: Autor (2024).

Analisando a Figura 54, pode-se observar a priori que o filtro do biocarvão da casca de coco, diferentemente da Filtração 01, apresentou os melhores resultados de redução de sólidos totais no decorrer do seu uso na Filtração 02, porém os filtros de biocarvão do bagaço de cana-de-açúcar e de biocarvão de sabugo de milho apresentaram resultados bem próximos. Notou-se

também que, nas primeiras amostras dos filtros de carvão ativado e do biocarvão da casca de coco, houve um aumento dos sólidos totais.

Diante disso, visando avaliar a eficiência dos filtros quanto aos sólidos totais na Filtração 02, foi construída a Tabela 24, utilizando os dados da Figura 54 e aplicando a Equação 3.

Tabela 24 – Avaliação das eficiências para sólidos totais da Filtração 02 dos filtros produzidos.

Amostra	Filtro de biocarvão da casca de coco	Filtro de biocarvão do sabugo de milho	Filtro de biocarvão do bagaço da cana-de-açúcar	Filtro de carvão ativado
	Eficiência (%)	Eficiência (%)	Eficiência (%)	Eficiência (%)
1	*	15,33	16,64	*
2	19,25	20,88	42,41	51,39
3	34,91	24,47	29,69	-
4	32,79	24,63	31,65	-
5	34,09	32,95	31,00	-
6	30,67	26,10	29,85	-
7	33,77	26,75	26,92	-
8	30,51	25,45	21,37	-
9	27,24	18,76	24,63	-
10	31,16	25,94	25,94	-
Eficiência Média (%)	28,67	24,13	28,01	4,00

*valor negativo

Fonte: Autor (2024).

Com os resultados da Tabela 24, pode-se confirmar que o filtro de biocarvão da casca do coco apresentou a maior eficiência de redução de sólidos totais dentre os filtros analisados com eficiência média de 28,67%, seguido pelo filtro de biocarvão do bagaço da cana-de-açúcar com 28,01% e pelo filtro de biocarvão do sabugo de milho com 24,13%.

Porém, analisando estatisticamente os dados da Figura 54, com exceção do carvão ativado, aplicando o teste de Kruskal-Wallis para comparação de três amostras independentes,

obteve-se um p-valor calculado de 0,166, valor superior a 0,05, com isso os resultados obtidos de sólidos totais na Filtração 02 para os filtros testados apresentaram valores semelhantes estatisticamente entre si.

Diante dos resultados obtidos nas duas filtrações realizadas, pode-se constatar que na Filtração 01 (efluente mais concentrado), o filtro de biocarvão da cana-de-açúcar apresentou melhores resultados para remoção de sólidos totais, porém, na Filtração 02 (efluente mais diluído), todos os filtros de biocarvão apresentaram resultados semelhantes.

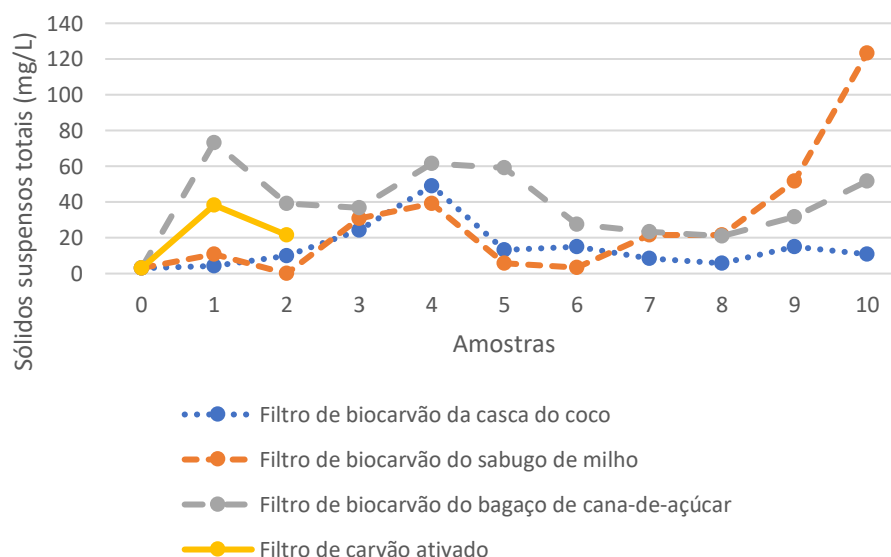
Na literatura, estudos de Ribeiro (2016) obtiveram uma redução de apenas 12,6% para sólidos totais utilizando filtros de biocarvão da casca de coco no tratamento de efluentes domésticos brutos, pois percebeu-se a passagem de grande quantidade de partículas finas para as amostras filtradas decorrentes da composição dos filtros. Já, Sthoher et al. (2012), verificaram aumento da quantidade de sólidos totais (33.9%) nas amostras filtradas de um filtro de biocarvão do bagaço da laranja.

Porém Ribeiro (2016) conseguiu uma eficiência de remoção de sólidos totais de 64,8%, aplicando um filtro de biocarvão de madeira numa amostra de esgoto doméstico bruto.

6.6.5. Sólidos Suspensos Totais

Quanto a esse parâmetro, com os dados coletados dos quatro filtros utilizados foi possível construir o gráfico da Figura 55, no qual pôde-se analisar comparativamente o desempenho de cada filtro na Filtração 01, partindo da amostra bruta do efluente do reator UASB (amostra 0).

Figura 55 - Sólidos suspensos totais dos efluentes da Filtração 01 dos filtros produzidos.



Fonte: Autor (2024).

Analisando a Figura 55, pode-se observar que nenhum dos filtros produzidos apresentou eficiência de redução para o parâmetro de sólidos suspensos totais, ou seja, houve aumento desse parâmetro em todas as amostras filtradas quando comparadas com a amostra bruta inicial do reator UASB (3 mg/L).

Com isso, visando comprovar a ineficiência dos filtros verificada na Figura 55 para o parâmetro de sólidos suspensos totais, foi construída a Tabela 25, aplicando a Equação 3.

Tabela 25 - Avaliação das eficiências para sólidos suspensos totais da Filtração 01 dos filtros produzidos.

Amostra	Filtro de biocarvão da casca de coco	Filtro de biocarvão do sabugo de milho	Filtro de biocarvão do bagaço da cana-de-açúcar	Filtro de carvão ativado
	Eficiência (%)	Eficiência (%)	Eficiência (%)	Eficiência (%)
1	*	*	*	*
2	*	100,00	*	*
3	*	*	*	-
4	*	*	*	-
5	*	*	*	-
6	*	*	*	-
7	*	*	*	-
8	*	*	*	-
9	*	*	*	-
10	*	*	*	-
Eficiência Média (%)	*	*	*	*

*valor negativo

Fonte: Autor (2024).

Conforme observado na Tabela 25, nenhum dos filtros apresentou eficiência para os sólidos suspensos totais.

Analisando estatisticamente os dados da Figura 55, com exceção do carvão ativado, utilizando o teste de Kruskal-Wallis para comparação de três amostras independentes, obteve-se um p-valor calculado de 0,003, valor inferior a 0,05, com isso os resultados obtidos de sólidos

suspensos totais na Filtração 01 para os filtros testados apresentaram diferenças estatísticas entre si. Com isso, visando identificar quais as diferenças estatísticas entre os filtros, foram calculados os dados da Tabela 26.

Tabela 26 - Análise comparativa dos dados de sólidos suspensos totais dos filtros de biocarvão na Filtração 01 aplicando o teste de Kruskal-Wallis para comparação de três amostras independentes.

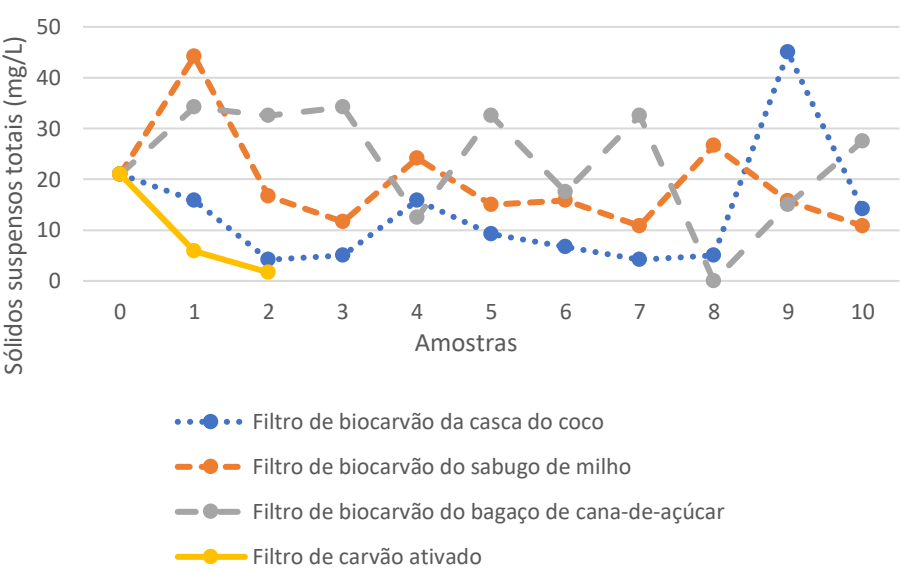
Fatores Comparados	Diferença Observada	Diferença Crítica	Há diferença estatística?
Cana - Coco	13,364	9,871	Sim
Cana - Milho	10,091	9,871	Sim
Coco - Milho	3,273	9,871	Não

Fonte: Autor (2024).

Assim, com os resultados da Tabela 26, observando estatisticamente, apenas o filtro de biocarvão do bagaço da cana-de-açúcar diferiu dos demais filtros no tocante aos sólidos suspensos totais.

Quanto à análise de sólidos suspensos totais na Filtração 02, com os dados coletados dos quatro filtros utilizados, foi possível elaborar o gráfico da Figura 56, no qual pode-se analisar comparativamente o desempenho de cada filtro.

Figura 56 - Sólidos suspensos totais dos efluentes da Filtração 02 dos filtros produzidos.



Fonte: Autor (2024).

Analisando a Figura 56, pode-se observar que o filtro do biocarvão da casca de coco apresentou os melhores resultados de redução de sólidos suspensos totais no decorrer do seu uso na Filtração 02.

Diante disso, visando avaliar a eficiência dos filtros quanto aos sólidos suspensos totais na Filtração 02, foi construída a Tabela 27, utilizando os dados da Figura 56 e aplicando a Equação 3.

Tabela 27 - Avaliação das eficiências para sólidos suspensos totais da Filtração 02 dos filtros produzidos.

Amostra	Filtro de biocarvão da casca de coco	Filtro de biocarvão do sabugo de milho	Filtro de biocarvão do bagaço da cana-de-açúcar	Filtro de carvão ativado
	Eficiência (%)	Eficiência (%)	Eficiência (%)	Eficiência (%)
1	24,62	*	*	72,24
2	80,14	20,62	*	92,05
3	76,19	44,43	*	-
4	24,62	*	40,48	-
5	56,33	28,57	*	-
6	68,24	24,62	16,67	-
7	80,14	48,43	*	-
8	76,19	*	100,00	-
9	*	25,34	28,57	-
10	32,52	48,43	*	-
Eficiência Média (%)	40,47	8,79	*	82,14

*valor negativo

Fonte: Autor (2024).

Com os resultados da Tabela 27, pode-se confirmar que o filtro de biocarvão da casca do coco apresentou a maior eficiência de redução de sólidos suspensos totais dentre os filtros analisados com eficiência média de 40,47%, seguido pelo filtro de biocarvão do sabugo de milho com 8,79%. Porém vale destacar que o filtro de carvão ativado apresentou resultados muito significativos mesmo sendo coletadas apenas duas amostras.

Analisando estatisticamente os dados da Figura 56, aplicando o teste de Kruskal-Wallis para comparação de três amostras independentes, obteve-se um p-valor calculado de 0,048, valor inferior a 0,05, com isso os resultados obtidos de sólidos suspensos totais na Filtração 02 para os filtros testados apresentaram diferenças estatísticas entre si. Com isso, visando identificar quais as diferenças estatísticas entre os filtros, foram calculados os dados da Tabela 28.

Tabela 28 - Análise comparativa dos dados de sólidos suspensos totais dos filtros de biocarvão na Filtração 02 aplicando o teste de Kruskal-Wallis para comparação de três amostras independentes.

Fatores Comparados	Diferença Observada	Diferença Crítica	Há diferença estatística?
Cana - Coco	10,045	9,871	Sim
Cana - Milho	4	9,871	Não
Coco - Milho	6,045	9,871	Não

Fonte: Autor (2024).

Assim, com os resultados da Tabela 28, observando estatisticamente, apenas os filtros de biocarvão da casca de coco e de biocarvão do bagaço da cana-de-açúcar diferiram entre si, nas demais hipóteses, os filtros apresentaram resultados semelhantes para sólidos suspensos totais.

Diante dos resultados obtidos nas duas filtrações realizadas, pode-se constatar que na Filtração 01 (efluente mais concentrado), os filtros produzidos se mostraram ineficazes para remoção dos sólidos suspensos totais, havendo um aumento desse parâmetro em todas as amostras filtradas. Esse fato pode estar relacionado com a passagem de partículas dos próprios biocarvões utilizados na construção dos filtros, mesmo com a colocação da tela de nylon na parte inferior dos filtros para que se evitasse esse carreamento. Porém, na Filtração 02 (efluente mais diluído), somente o filtro de biocarvão da cana-de-açúcar apresentou ineficiência na remoção desse parâmetro.

De acordo com Linhares (2017), a principal função dos filtros é o clareamento, atuando na remoção da turbidez e de grande parte dos sólidos suspensos totais presentes na água. Contudo filtros com biocarvão vêm apresentando aumento do parâmetro de sólidos suspensos totais, a citar, os estudos de Sthöher et al. (2012) em que houve um aumento de 37,64%, decorrentes da degradação do biocarvão do bagaço da laranja.

No tocante aos filtros de carvão ativado, na literatura, Chuang et al. (2005) conseguiram uma taxa de remoção de 72% para sólidos suspensos totais e Altman et al. (2016), uma remoção de 96% desse parâmetro.

7. CONCLUSÕES

Diante dos resultados obtidos no decorrer dessa pesquisa, concluiu-se inicialmente que todas as biomassas escolhidas (casca de coco, sabugo de milho e bagaço da cana-de-açúcar) apresentaram baixos teores de umidade, algo bastante relevante para a avaliar viabilidade do uso desses resíduos na produção dos biocarvões, pois quanto menor o teor de umidade, menor é a intensidade da fonte de calor necessária para realização da carbonização das biomassas.

Do processo de pirólise das biomassas para produção dos biocarvões a 400°C durante 1h, percebeu-se que todas as biomassas utilizadas apresentaram taxas de rendimento de produção compatíveis com os resultados contidos na literatura, com destaque para a biomassa da casca de coco com 35,91%.

Dos ensaios de caracterização, concluiu-se do MEV que grande parte das estruturas das biomassas foram conservadas nos biocarvões de todos os resíduos. Contudo, no biocarvão da casca de coco, percebeu-se diminuição do tamanho dos poros do material. Já nos biocarvões do sabugo de milho e do bagaço da cana-de-açúcar, observou-se leve aumento da quantidade de poros dos materiais. O carvão ativado apresentou grande quantidade de poros em sua área superficial com diversas cavidades arredondadas e aparentemente profundas, diferentemente das estruturas encontradas nos biocarvões produzidos.

No ensaio de caracterização BET, foi observado aumento das áreas superficiais e volumes de poros nos biocarvões produzidos quando comparados com as biomassas *in natura* de todos os materiais. No que se refere ao diâmetro médio dos poros, todos os materiais analisados foram classificados como mesoporos, considerados assim, materiais com alta capacidade de adsorver moléculas grandes em sua superfície.

No ensaio de caracterização TGA, constatou-se que todos os biocarvões são mais estáveis termicamente e sofrem menor perda de massa se comparados com as biomassas analisadas. Enquanto que, nos ensaios de pH e condutividade, observou-se que todas as amostras de biomassa, biocarvão e carvão ativado apresentaram pH igual ou superior a 7, em conformidade com a literatura. Quanto à condutividade elétrica, as amostras com casca de coco apresentam o maior valor em relação às demais amostras.

Da caracterização do efluente bruto coletado da ETE da Universidade Federal de Sergipe – *Campus* São Cristóvão para análise, pode-se concluir para os parâmetros físico-químicos de cor aparente, turbidez, DQO, sólidos totais e sólidos suspensos totais, que o mesmo se caracterizava como um efluente bastante diluído, sendo classificado como esgoto bruto de concentração fraca.

No tocante à eficiência do reator UASB da UFS, foram observadas reduções significativas quanto aos parâmetros de cor aparente e turbidez, 64,30% e 66,25%, respectivamente, na Coleta 01. Quanto aos parâmetros de DQO, sólidos totais e sólidos suspensos totais, somente foram obtidas reduções relevantes na primeira coleta (64,71%, 23,70% e 78,57%, respectivamente). Já na Coleta 02 foram obtidas reduções pouco relevantes a citar, a remoção de apenas 6,72% de DQO.

No que se refere à avaliação da eficiência dos filtros produzidos, para os parâmetros físicos de cor aparente e turbidez, pode-se verificar que todos os filtros de biocarvão produzidos se mostraram eficientes para a redução desses parâmetros, porém houve destaque para o filtro de biocarvão da casca de coco, o qual pode ser justificado pelos resultados obtidos nos ensaios de caracterização do biocarvão da casca de coco que demonstraram, por exemplo, elevada área superficial e maior volume e diâmetro dos poros para esse biocarvão em detrimento aos demais biocarvões produzidos.

Quanto à avaliação da eficiência dos filtros produzidos para o parâmetro de DQO, pode-se constatar que, para efluentes mais concentrados, todos os filtros se mostraram ineficientes, enquanto, para efluentes mais diluídos, os filtros de biocarvão do bagaço da cana-de-açúcar e do sabugo de milho podem ser aplicados com perspectivas de remoção de DQO significativas.

Verificou-se que o aumento da DQO identificado nas amostras filtradas pode estar associado à degradação do próprio biocarvão aplicado na produção dos filtros, devido aos mesmos serem constituídos basicamente de matéria orgânica, e o contato com o efluente gerar liberação dessa matéria orgânica para as amostras filtradas.

Quanto à avaliação da eficiência dos filtros para remoção de sólidos totais, pode-se concluir que para efluentes mais concentrados, o filtro de biocarvão da cana-de-açúcar apresentou melhores resultados, contudo, para efluentes mais diluídos, todos os filtros de biocarvão apresentaram resultados semelhantes. Já, no tocante à avaliação de eficiência para remoção de sólidos suspensos totais, pode-se verificar que, para efluentes mais concentrados, todos os filtros produzidos se mostraram ineficientes, porém, para efluentes mais diluídos, a maioria dos filtros se mostra eficiente, com exceção do filtro de biocarvão da cana-de-açúcar.

Diante do exposto, pode-se concluir que o uso de biocarvões provenientes de resíduos agroindustriais pode ser alternativa para tratamentos complementares de estações de tratamento de esgoto com reatores UASB, a depender das características dos efluentes e dos parâmetros físico-químicos que se desejam tratar. Além disso, é mais uma possibilidade de destinação adequada desses resíduos que seriam descartados sem nenhum tipo de aproveitamento, dessa forma, degradando o meio ambiente. Assim, os biocarvões produzidos da casca de coco, do

sabugo do milho e do bagaço da cana-de-açúcar podem ser aplicados para essa finalidade, pois apresentaram resultados interessantes e próximos dos obtidos na literatura por filtros de areia e carvão ativado. Vale ressaltar que, mesmo não sendo possível realizar a comparação estatística com o filtro de carvão ativado produzido, buscou-se nesse trabalho trazer dados da literatura para análise comparativa desses meios filtrantes.

8. RECOMENDAÇÕES

Para a complementação desse estudo, sugerem-se:

- ✓ Testar faixas de temperatura maiores para o processo de pirólise;
- ✓ Construir outras configurações de filtros;
- ✓ Aplicar o processo de regeneração do biocarvão para reutilização dos filtros;
- ✓ Analisar outros parâmetros físico-químicos e biológicos;
- ✓ Utilizar os filtros para outros tipos de efluentes;
- ✓ Verificar a remoção de poluente inorgânico.

REFERÊNCIAS

- AISSE, M. M.; BONA, A.; JÜRGENSEN, D. Filtração rápida no polimento de efluentes de processo físico-químico com flotação. In: 24º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental. **Anais**. 2007.
- ALTMAN, J.; REHFELD, D.; TRÄDER, K.; SPERLICH, A.; JEKEL, M. Combination of granular activated carbon adsorption and deep-bed filtration as a single advanced wastewater treatment step for organic micropollutant and phosphorus removal. **Water Research**, v. 92, p. 131-139, 2016.
- ALVES, M. P. **Pós-tratamento de esgoto doméstico em filtros lentos, com diferentes meios filtrantes**. 73 p. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia Ambiental) – Universidade Estadual da Paraíba, Campina Grande: UEPB, 2020.
- ANA – AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO. **Atlas Esgotos: Despoluição de bacias hidrográficas**. 2017. Disponível em: https://arquivos.ana.gov.br/imprensa/publicacoes/ATLASESGOTOSDespoluicaoodeBaciasHidrograficas-ResumoExecutivo_livro.pdf. Acesso em: 22 nov. 2022.
- ANA – AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO. **O saneamento básico no Brasil**. 2023. Disponível em: <https://www.ana.gov.br/saneamento/>. Acesso em: 09 abr. 2023.
- ANTUNES, E.; SCHUMANN, J.; BRODIE, G.; JACOB, M. V.; SCHNEIDER, P. A. Biochar produced from biosolids using a single-mode microwave: characterisation and its potential for phosphorus removal. **Journal of Environmental Management**, v. 196, p. 119-126, 2017.
- APHA – **American Public Health Association**. Standard methods for the examination of water and wastewater (23^a ed.), 2017.
- BARBOSA, T. A.; SANTOS, R. M.; SILVA, W. R.; SÁ, M. S.; SILVA, M. G.; NAVICKIENE, S.; GOMES FILHO, R. R.; WISNIEWSKI JR, A. Biochar from sewage sludge: effect of pyrolysis on functional properties and pollutants fate. *Environmental Quality Management*, p. 1-13, 2024.
- BATISTA, R. R.; GOMES, M. M. Produção de biochar a partir da pirólise de biomassa: perspectivas e experiências brasileiras. **Revista Ibero Americana de Ciências Ambientais**, v.12, n.8, p.321-339, 2021.

BORGES, R. M.; MINILLO, A.; LEMOS, E. G. M.; PRADO, H. F. A.; TANGERINO, E. P. Uso de filtros de carvão ativado granular associado a microrganismos para remoção de fármacos no tratamento de água de abastecimento. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 21, n. 4, p. 709-720, 2016.

BRASIL. **Lei nº 9.433, de 8 de janeiro de 1997**. Institui a Política Nacional dos Recursos Hídricos e dá outras providências. Diário Oficial da União. Brasília, 1997

BRASIL. **Lei nº 14.026, de 15 de julho de 2020**. Atualiza o marco legal do saneamento básico e dá outras providências. Diário Oficial da União. Brasília, 2020.

BRASIL. **Resolução nº. 357, de 17 de março de 2005**. Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências. 2005.

BRASIL. **Resolução nº. 20, de 18 de junho de 1986**. Estabelece a classificação das águas doces, salobras e salinas do território nacional. 1986.

BRASIL. **Resolução nº. 430, de 13 de maio de 2011**. Dispõe sobre as condições e padrões de lançamento de efluentes, complementa e altera a Resolução nº 357, de 17 de março de 2005, do Conselho Nacional de Meio Ambiente – CONAMA. 2011.

BRASIL. Ministério da Integração e do Desenvolvimento Regional. **Plano Nacional de Saneamento Básico**. 2022. Disponível em: <https://www.gov.br/mdr/pt-br/assuntos/saneamento/plansab>. Acesso em: 18 jan. 2023.

CARMALIN, S. A.; LIMA, E. C. Removal of emerging contaminants from the environment by adsorption. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, v. 150, p. 1-17, 2018.

CARMONA, I. N. **Caracterização e uso do biocarvão de bagaço de malte visando o tratamento de esgoto sanitário**. 52 p. Dissertação (Mestrado acadêmico) – Universidade Federal de Lavras, Lavras: UFLA, 2021.

CARVALHO, R. S. **Produção e caracterização de biocarvão de bagaço de laranja para utilização no pós-tratamento de água residuária**. Tese (Doutorado em Desenvolvimento e Meio Ambiente) - Universidade Federal de Sergipe. São Cristóvão: 2018. 149 p.

CARVALHO, R. S.; ARGUELHO, M. L. P. M.; FACCIOLO, G. G.; OLIVEIRA, R. A.; PASSOS, E. S.; SILVA, A. V.; SANTOS, B. F. S. Utilização do biocarvão de bagaço de laranja na remoção de tetraciclina em água residuária. **Revista Matéria**, v. 26, n. 02, p. 1-14, 2021a.

CARVALHO, R. S.; FACCIOLI, G. G.; ARGUELHO, M. L. P. M.; PASSOS, E. S.; SANTOS, B. F. S.; OLIVEIRA, R. A. Tratamento de água residuária à base de biocarvão do bagaço de laranja para a irrigação da cultura do rabanete. **ForScience**, v. 9, n. 2, p. 1-19, 2021b.

CHERNICHARO, C. A. L.; RIBEIRO, T. B.; PERIGONI, E. S.; POSSETTI, G. R. C.; MIKI, M. K.; SOUZA, S. N. Contribuição para o aprimoramento de projeto, construção e operação de reatores UASB aplicados ao tratamento de esgoto sanitário - parte 1: tópicos de interesse. **Revista DAE**, v. 66, n. 214, p. 5-16, 2018a.

CHERNICHARO, C. A. L.; RIBEIRO, T. B.; GARCIA, G. B.; LERMONTOV, A.; PLATZER, C. J.; POSSETTI, G. R. C.; ROSSETO, M. A. L. L.; ROSSETO, R. Panorama do tratamento de esgoto sanitário nas regiões Sul, Sudeste e Centro-Oeste do Brasil: tecnologias mais empregadas. **Revista DAE**, v. 66, n. 213, p. 5-19, 2018b.

CHERNICHARO, C. A. L. **Princípios do Tratamento Biológico de Águas Residuárias: Reatores Anaeróbio**, 2ª ed. Belo Horizonte, 2007. 379 p.

CHUANG, S. H.; CHANG, T. C.; YOU, S. J.; OUYANG, C. F. Evaluation of wastewater reclamation processes in a high-tech industrial park. **Desalination**, v. 175, n. 2, p. 143-152, 2005.

COSTA JUNIOR, S. S. **Carvão ativado produzido a partir do endocarpo de coco de baia (Coccus nucifera) aplicado no tratamento de efluente têxtil**. 108 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Urbana e Ambiental) – Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa: UFPB, 2014.

COSTA, V. L. J. **Eficiência da ETE da UFS na remoção de matéria orgânica**. 2019. 57 f. Projeto de Pesquisa – Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão, 2019.

COUTO, G. M. **Utilização de serragens de *Eucalyptus sp.* na preparação de carvões ativados**. 89 p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Lavras, Lavras. 2009.

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 anaeróbio de estação de tratamento de efluentes para remoção do corante tartrazina. **Revista Matéria**, v. 26, n. 4, p. 01-15, 2021.

DENBINSKI, L. G., OLIVEIRA, L. H., AZZOLINI, J. C., DEON, A. M. Tratamento do efluente da indústria de couro utilizando coluna de adsorção em leito fixo. **Brazilian Journal of Development**, v. 5, n. 9, p. 14059-14073, 2019.

DEVENS, K. U.; PEREIRA NETO, S.; OLIVEIRA, D. L. A.; GONÇALVES, M. S. Characterization of Biochar from Green Coconut Shell and Orange Peel Wastes. **Revista Virtual de Química**, v. 10, n. 2, p. 1-7, 2018.

ENAIME, G.; BAÇAOUI, A.; YAACOUBI, A.; LUBKEN, M. Biochar for wastewater treatment – conversion technologies and applications. **Applied sciences**, v. 10, p. 1-29, 2020.

FAEDO, A. M. **Tecnologias convencionais e novas alternativas para o tratamento de efluentes domésticos**. 2010. 39 p. Monografia (Especialização em Engenharia do Controle da Poluição Ambiental), Universidade do Sul de Santa Catarina, Florianópolis.

FEITOSA, A. A.; TEIXEIRA, W. G.; RITTER, E.; REZENDE, F. A.; 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, P.; PROENÇA, M. B. Estudo sobre o uso de casca da banana, folha e tronco de bananeira como biomassa para substituição de lenha em caldeiras flamatubulares. In: Foro científico estudantil do Instituto Superior Tupy, 2010, Joinville. **Anais [...]**. Joinville, 2010.

FERREIRA, G. W. **Modelagem da remoção de azul de metileno por carvão ativado de borra de café em micro coluna de leito fixo**. 2018. 77 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Licenciatura em Química) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Londrina.

FERREIRA, S. D.; SILVESTRE, W. P.; PAULETTI, G. F.; ALTAFINI, C. R.; GODINHO, M. Use of biochar produced from elephant grass by pyrolysis in a screw reactor as a soil amendment. **Waste and Biomassa Valorization**, v. 10, n. 10, p. 3089-3100, 2019.

FIGUEREDO, N. A.; COSTA, L. M. D.; MELO, L. C. A.; SIEBENEICHLERD, E. A.; TRONTO, J. Characterization of biochars from different sources and evaluation of release of nutrients and contaminants. **Revista Ciência Agronômica**, v. 48, n. 3, p. 395-403, 2017.

FIORENTIN, L. D.; MENON B. T.; ALVES J. A. Análise de secagem do bagaço de laranja em camada fina utilizando modelos semi-teóricos e empíricos. **Revista Engevista**, v. 14, n. 1, p. 22-23, 2012.

FLORENCIO, L.; BASTOS, F. R. K. X.; AISSE, M. M. **Tratamento e utilização de esgotos sanitários**. 1 ed. Recife: ABES, 2006. 427 p.

FOLGOSI, V. **A tecnologia disponível e evolução do saneamento básico no Brasil**. São Paulo: FGV, 2014.

GEISSEN, V.; MOL, H.; KLUMPP, E.; UMLAUF, G.; NADAL, M.; PLOEG, M.; ZEE, S. E. A. T. M.; RITSEMA, C. J. Emerging pollutants in the environment: a challenge for water resource management. **International Soil and Water Conservation Research**, v. 3, n. 1, p. 57–65, 2015.

GIUSTINA, S. V. D.; MIRANDA, L. A. S.; MONTEGGIA, L. O. Remoção de matéria orgânica e sólidos suspensos por nova configuração de biofiltro aeróbio submerso no pós-tratamento de efluente de reator UASB. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 15, n. 3, p. 257-266, 2010.

GONÇALVES, F. G. **Caracterização de biocarvões e suas capacidades de retenção de nutrientes**. 86 p. Dissertação (Mestrado) – Departamento de Engenharia Química e de Materiais – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro: 2016.

GONZAGA, M. I. S.; SOUZA, D. C. F.; SANTOS, J. C. J. Use of organic waste biochar as an innovative alternative for increasing agricultural productivity in small rural communities. **Research, Society and Development**, v. 10, n. 4, p. 1-11, 2021.

HUGGINS, T. M. Granular biochar compared with activated carbon for wastewater treatment and resource recovery. **Revista Water Research**, v. 94, p. 225-232, 2016.

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Produção agropecuária**. 2021. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/explica/producao-agropecuaria/br>. Acesso em: 23 jul. 2023.

JESUS, J. H. F. de. **Uso de biocarvões e suas biomassas precursoras para remediação de hidrocarbonetos policíclicos aromáticos em água**. 82 f. Dissertação (Mestrado em Química) - Universidade Federal de Sergipe. São Cristóvão: UFS, 2016.

LIMA, L. F.; MONTEIRO, V. R. C.; BARQUILHA, C. E. R.; BRAGA, M. C. B. Produção de biocarvão a partir de lodo de esgoto e de cascas de laranja. **Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental**, v. 24, p. 1-15, 2020.

LINHARES, B. D. **Filtros granulares (areia e carvão ativado) para pós-tratamento de efluente anaeróbio**. 70 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife: UFP, 2017.

LOPES, H. M. **Caracterização química e física de biocarvão de lodo de esgoto sob diferentes temperaturas de pirólise**. 2013. 38 p. Trabalho de Conclusão de Curso

(Bacharelado em Agronomia) - Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária, Universidade de Brasília.

MACÊDO, L. P. M. P. **Viabilidade da produção de carvão ativado a partir de resíduos alternativos**. 92 p. Dissertação (Mestrado) – Curso de Mestrado em Desenvolvimento de Processos Ambientais – Universidade Católica de Pernambuco, Recife, 2012.

MAIA, A. A. D.; GATTÁS, P. L. L.; MORAIS, L. C. Uso de resíduos industriais na descontaminação aquática: estudo cinético do biocarvão da casca de laranja. **Revista de Gestão e Sustentabilidade Ambiental**, v. 6, n. 2, p. 368-384, 2017.

MARCELINO, I. P.; LOSS, A.; ANDRADE, M. A. N. Potencialidades do uso do biochar para melhoria dos atributos edáficos. **Revista Redução do risco de desastres e a resiliência no meio rural e urbano**, v. 2, p. 584-601, 2020.

MELO, A. R. B. **Pós-tratamento de efluente de reator UASB por filtração em areia e carvão ativado**. 69 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife: UFP, 2014.

MENDONÇA, S. R.; MENDONÇA, L. C. **Sistemas Sustentáveis de esgotos: orientações técnicas para projeto e dimensionamento de redes coletoras, emissários, canais, estações elevatórias, tratamento e reúso na agricultura**. 2 ed. São Paulo: Blucher, 2017. 364 p.

MENEZES, B. L. O.; ROCHA JUNIOR, F. R.; WESZ, G. N.; SOUSA, I. D. H.; LIMA, G. S.; MENDONÇA, L. C.; BARBOSA, T. A. Biochar in wastewater treatment: a systematic mapping. **Journal of Urban and Environmental**, v. 16, n. 2, p. 215-220, 2022.

METCALF, L; EDDY, H. P. **Wastewater engineering: treatment, disposal, reuse**. 3 ed. New York: McGraw-Hill, 2003.

METCALF, L; EDDY, H. P. **Tratamento de efluentes e recuperação de recursos**. McGraw Hill Brasil, 2015.

MOHAN, D.; JR, C. U. P.; STEELE, P. H. Pyrolysis of wood/biomass for bio-oil: A critical review. **Energy & Fuels**, v. 20, n. 3, p. 848-889, 2006.

MONTEIRO, V. R. C.; PRADO, L. L.; SANTOS, B. M.; BRAGA, M. C. B. Utilização de biocarvão para remoção de nitrogênio amoniacal de lixiviado de aterro sanitário. In: 30º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, 2019, Rio Grande do Norte. **Anais [...]**. Rio Grande do Norte: ABES, P. 1-8, 2019.

MOURA, L. F. S.; MARQUES, J. J.; FREITAS, J. A. Adsorção de dióxido de carbono utilizando o biochar produzido a partir de sementes de mangaba (*Hancornia speciosa*). **Scientia Plena**, v. 14, n. 03. p. 1-10, 2018.

NUVOLARI, A; TELLES, D. D.; RIBEIRO, J. T.; MIYASHITA, N. J.; ARAUJO, R. **Esgoto Sanitário: coleta, transporte, tratamento e reúso agrícola**. 1 ed. São Paulo: Blucher, 2003. 536 p.

NUVOLARI, A. **Esgoto Sanitário: coleta, transporte, tratamento e reúso agrícola**. 2 ed. São Paulo: Blucher, 2011. 562 p.

OLIVEIRA, A. R.; BARBOSA, T. A.; MENDONÇA, L. C. Adsorção de poluentes em águas residuárias utilizando biocarvão: revisão sistemática. **Research, Society and Development**, v. 12, n. 4, p. 1-21, 2023.

OLIVEIRA, E. N.; FERREIRA, M. F.; OLIVEIRA, W. F.; OLIVEIRA, R. R. Estudo bibliográfico das tecnologias utilizadas no tratamento do esgoto e a legislação em vigor no Brasil. **Natural Resources**, v. 9, n. 1, p. 20-27, 2019.

OLIVEIRA, C. M. R. **Aplicabilidade de sistemas simplificados para estações de tratamento de esgoto de cidades de pequeno porte**. 2014. 88 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Sanitária e Ambiental) – Faculdade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora.

OLIVEIRA, S. S. **Avaliação operacional de uma estação de tratamento de esgotos em uma universidade pública**. 2019. 110 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão.

OLIVEIRA, M. F. **Análise microbiológica como controle de qualidade de processo aeróbio alimentado por efluente de reator UASB**. 2020. 119p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão.

PAIVA, L. A. L.; VAN HAANDEL, A. C.; MOTA, L. S. Lodo ativado em bateladas sequenciais como opção de pós-tratamento de efluentes de reatores UASB. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 25, n. 2, p. 259-269, 2020.

PASSOS, E. S.; CARVALHO, R. S.; FACCIOLI, G. G.; ARGUELHO, M. L. P. M.; OLIVEIRA, R. A. Tratamento terciário de águas residuárias: análise microbiológica após

filtração com biochar do bagaço da laranja. **Revista Gestão e Sustentabilidade Ambiental**, v. 11, n. 3, p. 60-74, 2022.

PAULA, B. M.; VALE, G. B.; BRAGA, T. C. **Biocarvão produzido a partir de lodo de estação de tratamento de esgoto para remoção de corante tartazina**. 2019. 20 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Goiás.

PAULINO, E. K.; PINTO, M. A.; MACENA, D. A.; LIMA, A. C.; SANTANA, E. M. L.; SOUZA, J. G.; ALVES, M. R. Biocarvão do biossólido da estação de tratamento de esgoto de Presidente Prudente-SP. **Colloquium Exactarum**, v. 11, n. 4, p. 46-61, 2019.

PIMENTA, H. C. D.; TORRES, F. R. M.; RODRIGUES, B. S.; ROCHA JÚNIOR, J. M. O esgoto: a importância do tratamento e as opções tecnológicas. In: 22º Encontro Nacional de Engenharia de Produção, 2002, Santa Maria. **Anais [...]**. Santa Maria: UFSM, p. 1-8, 2002.

PIMENTA, A. F. **Tratamento de efluente de indústria de café via adsorção em biocarvão ativado**. 2018. 78 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Ambiental) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Londrina.

PLANSAB – Plano Nacional de Saneamento Básico. **Plano Nacional de Saneamento Básico**. 2013. Disponível em: <https://www.gov.br/mdr/pt-br/assuntos/saneamento/plansab>. Acesso em: 09 abr. 2023.

PORTO, V. H. S. F.; CUBA, R. M. F. Utilização de lodo de estação de tratamento de esgoto sanitário para preparo de biocarvão ativado para remoção de nitrato em meio aquoso. In: II Congresso Sul-Americano de Resíduos Sólidos e Sustentabilidade, 2019, Foz do Iguaçu. **Anais [...]**. Foz do Iguaçu: IBEAS, p. 1-10, 2019.

QUIRINO, W. F.; VALE, A. T.; ANDRADE, A. P. A.; ABREU, V. L. S.; AZEREDO, A. C. S. Poder calorífico da madeira e de resíduos lignocelulósicos. **Biomassa e Energia**. v. 1, p. 173-182, 2005.

QUISPE, J. I. B.; CAMPOS, L. C.; MASEK, O.; BOGUSH, A. Use of biochar-based column filtration systems for greywater treatment: a systematic literatura review. **Journal of water porcess engineering**, v. 48, p. 1-21, 2022.

RIAH, K.; BEN MAMMOUB, A.; THAYER, B. B. Date-palm fibers media filters as a potential technology for tertiary domestic wastewater treatment. **Journal of Hazardous Materials**, vol. 161, p. 608-613, 2009.

- RIBEIRO, N. U. F. **Estudo do uso do biochar no tratamento de esgoto sanitário**. 2016. 39 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Ambiental) – Departamento Acadêmico de Ambiental, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campo Mourão.
- RITTLL, T. F.; ARTS, B.; KUYPER, T. W. Biochar: An emerging policy arrangement in Brazil? **Environmental Science and Policy**, v. 51, p. 45-55, 2015.
- ROCHA, O. R. S.; NASCIMENTO, G. E.; CAMPOS, N. F.; SILVA, V. L.; DUARTE, M. M. M. B. Avaliação do processo adsorptivo utilizando mesocarpo de coco verde para remoção do corante cinza reativo BF-2R. **Revista Química Nova**, v. 35, n. 7, p. 1369-1374, 2012.
- RODRIGUES, E. B.; SEZERINO, P. H.; SILVEIRA, D. D.; SKORONSKI, E. LAPOLLI, F. R. Utilização do biocarvão como meio filtrante de wetland construído vertical empregado no tratamento de esgoto bruto. **Revista DAE**, v. 70, n. 235, p. 180-192, 2022.
- 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: IV Congresso Sul-Americano de Resíduos Sólidos e Sustentabilidade, 2021, Gramado. **Anais [...]**. Gramado: IBEAS, p. 1-5, 2021.
- SANTOS, C. M. **Uso de cascas de laranja como adsorvente de contaminantes no tratamento de água**. 126 p. Dissertação (Mestrado) – Campus Experimental de Sorocaba - Universidade Estadual de Paulista, Sorocaba: 2015.
- SATO, M. K.; LIMA, H. V.; COSTA, A. N.; RODRIGUES, S.; MOONEY, S.J.; CLARKE, M.; PEDROSO, A. J. S.; MAIA, C. M. B. F. Biochar as a sustainable alternative to açai waste disposal in Amazon, Brazil. **Process Safety and Environmental Protection**, v. 139, p. 36-46, 2020.
- SILVA, R. M.; SILVA, M. E. R.; FIRMINO, P. I. M.; SANTOS, A. B. Análise de desempenho e confiabilidade de reatores UASB em estações de tratamento de esgotos sanitários descentralizadas. **Revista DAE**, v. 70, n. 234, p. 78-92, 2022a.
- SILVA, L. G.; SILVA, E. M. R.; MONTEIRO, L. G. Biocarvão a partir de lodos de estações de tratamento de esgoto: uma revisão. **Revista DAE**, v. 70, n. 237, p. 229-243, 2022b.
- SILVA, Lyndon Johnson Vasconcelos. **Manual de Operação ETE UFS**. São Cristóvão, 2012.
- SINGH, R.; BABU, J. N.; KUMAR, R.; SRIVASTAVA, P.; SINGH, P.; RAGHUBANSHI, A. S. Multifaceted application of crop residue biochar as a tool for sustainable agriculture: Na ecological perspective. **Ecological Engineering**, v. 77, p. 324-347, 2015.

SNIS – Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento. **Painel de Esgotamento Sanitário – 2022**. 2022. Disponível em: <https://www.gov.br/cidades/pt-br/acesso-a-informacao/acoes-e-programas/saneamento/snis/painel/es>. Acesso em: 07 junho. 2023.

SOARES, P. R. L. **Produção de biocarvão e sua aplicação para a extração em fase sólida de agrotóxico em água**. 101 p. Dissertação (Mestrado em Química) – Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão: UFS, 2022.

SOUSA, F. W.; MOREIRA, S. A.; OLIVEIRA, A. G.; CAVALCANTE, R. M.; NASCIMENTO, R. F.; ROSA, M. F. Uso da casca de coco verde como adsorvente na remoção de metais tóxicos. **Revista Química Nova**, v. 30, n. 5, p. 1153-1157, 2007.

SOUZA, C. C.; SUZUKI, K. N.; LATINI, R. M.; CANESIN, F. P.; TEIXEIRA, A. M. R. F.; BERNEDO, A. V. B. Estudo de propriedades físico-químicas na avaliação da adsorção em biocarvão produzido com folhas de amendoeira-da-praia. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 26, n. 1, p. 171-179, 2021.

STRÖHER, A. P.; MENEZES, M. L.; FIORENTIN, L. D.; PEREIRA, N. C. Utilização do bagaço de laranja no tratamento de efluente proveniente da lavagem de jeans. **E-xacta**, v. 5, n. 1, p. 27-37, 2012.

SUN, Y., GAO, B., YAO, Y., FANG, J., ZHANG, M., ZHOU, Y., YANG, L. Effects of feedstock type, production method, and pyrolysis temperature on biochar and hydrochar properties. **Chemical Engineering Journal**, v. 240, p. 574 - 578, 2014.

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, 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**, Santa Maria, v. 28, n. 2, p. 875-887, 2018.

URBAN, R. C.; ISAAC, R. de L.; MORITA, D. M. Uso benéfico de lodo de estações de tratamento de água e de tratamento de esgoto: estado da arte. **Revista DAE**, v. 67, n. 219, p. 128-158, 2019.

VON SPERLING, M. **Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos**. 2 ed. Minas Gerais: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, Universidade Federal de Minas Gerais, 1996. 243 p.

XIANG, W.; ZHANG, X.; CHEN, J; ZOU, W.; HE, F.; HU, X.; TSANG, D. C. W.; OK, Y. S.; GAO, B. Biochar technology in wastewater treatment: a critical review. **Chemosphere**, v. 252, p. 1-14, 2020.

APÊNDICE

Apêndice A - Caracterização dos efluentes do filtro de biocarvão da casca do coco.

Amostra	Parâmetros físico-químicos analisados									
	Cor aparente (uH)		Turbidez (uT)		DQO (mg/L)		Sólidos totais (mg/L)		Sólidos suspensos totais (mg/L)	
	F1	F2	F1	F2	F1	F2	F1	F2	F1	F2
01	162	221	17	35	232	-	832	660	4	16
02	142	73	12	7	228	-	442	495	10	4
03	202	105	25	9	242	-	374	399	24	5
04	235	134	27	15	262	-	468	412	49	16
05	264	161	29	17	244	-	448	404	13	9
06	258	171	28	18	321	-	454	425	15	7
07	262	192	30	21	262	-	436	406	8	4
08	294	239	29	28	288	-	430	426	6	5
09	238	274	30	36	295	-	431	446	15	45
10	423	265	31	29	324	-	435	422	11	14

Fonte: Autor (2024).

Apêndice B - Caracterização dos efluentes do filtro de biocarvão do sabugo de milho.

Amostra	Parâmetros físico-químicos analisados									
	Cor aparente (uH)		Turbidez (uT)		DQO (mg/L)		Sólidos totais (mg/L)		Sólidos suspensos totais (mg/L)	
	F1	F2	F1	F2	F1	F2	F1	F2	F1	F2
01	173	200	29	22	165	63	554	519	11	44
02	340	247	39	24	219	65	501	485	0	17
03	371	273	46	31	264	96	423	463	31	12
04	383	306	46	36	272	69	490	462	39	24
05	405	314	49	34	258	80	498	411	6	15
06	415	322	50	36	284	76	479	453	3	16
07	430	331	51	39	282	73	447	449	22	11
08	440	361	52	40	259	73	477	457	22	27
09	455	379	54	45	267	69	315	498	52	16
10	492	368	57	41	301	79	460	454	123	11

Fonte: Autor (2024).

Apêndice C - Caracterização dos efluentes do filtro de biocarvão do bagaço da cana-de-açúcar.

	Parâmetros físico-químicos analisados									
	Cor aparente (uH)		Turbidez (uT)		DQO (mg/L)		Sólidos totais (mg/L)		Sólidos suspensos totais (mg/L)	
Amostra	F1	F2	F1	F2	F1	F2	F1	F2	F1	F2
01	262	130	34	17	168	65	365	511	73	34
02	338	181	39	21	180	50	338	353	39	32
03	338	220	39	26	212	117	333	431	37	34
04	347	246	40	30	241	95	320	419	62	12
05	347	251	40	25	272	87	329	423	59	32
06	337	255	38	31	290	98	346	430	27	17
07	330	252	37	31	209	102	343	448	23	32
08	333	264	38	32	255	91	263	482	21	0
09	317	258	35	32	235	84	352	462	32	15
10	306	264	34	33	225	80	356	454	52	27

Fonte: Autor (2024).