



IARA NOBRE CARMONA

**CARACTERIZAÇÃO E USO DO BIOCARVÃO DE BAGAÇO DE  
MALTE VISANDO O TRATAMENTO DE ESGOTO SANITÁRIO**

LAVRAS – MG  
2021

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE LAVRAS**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA**  
**MADEIRA**

**CARACTERIZAÇÃO E USO DO BIOCÁRVÃO DE BAGAÇO DE MALTE**  
**VISANDO O TRATAMENTO DE ESGOTO SANITÁRIO**

Dissertação apresentada à  
Universidade Federal de Lavras  
como parte das exigências do  
Programa de Pós-Graduação em  
Ciência e Tecnologia da Madeira  
para obtenção de título de Mestre.

Prof. Dr<sup>a</sup>. Maria Lucia Bianchi  
Orientadora

LAVRAS – MG  
2021

**Ficha catalográfica elaborada pelo Sistema de Geração de Ficha Catalográfica da Biblioteca  
Universitária da UFLA, com dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).**

Carmona, Iara Nobre.

Caracterização e uso do biocarvão de bagaço de malte visando o  
tratamento de esgoto sanitário / Iara Nobre Carmona. - 2021.

52 p. : il.

Orientador(a): Maria Lucia Bianchi.

Dissertação (mestrado acadêmico) - Universidade Federal de Lavras,  
2021.

Bibliografia.

1. Adsorção. 2. Resíduo agroindustrial. 3. Efluentes. I. Bianchi, Maria  
Lucia. II. Título.

**IARA NOBRE CARMONA**

**CARACTERIZAÇÃO E USO DO BIOCÁRVÃO DE BAGAÇO DE MALTE  
VISANDO O TRATAMENTO DE ESGOTO SANITÁRIO**

**CHARACTERIZATION AND USE OF MALT BAGASSE BIOCHAR FOR THE  
TREATMENT OF SANITARY SEWAGE**

Dissertação apresentada à  
Universidade Federal de Lavras  
como parte das exigências do  
Programa de Pós-Graduação em  
Ciência e Tecnologia da Madeira  
para obtenção de título de Mestre.

APROVADA em 05 de março de 2021.  
Dr. Tiago José Pires de Oliveira - UFLA  
Dra. Evanise Silva Penido - UFLA  
Dra. Vânia Aparecida de Sá - UFAL

Prof<sup>a</sup>. Dra. Maria Lucia Bianchi  
Orientadora

**LAVRAS-MG  
2021**

*“O amor é a única coisa que transcende o tempo e o espaço”*

Aos meus queridos e eternos irmãos Clarissa, Diego e Rômulo  
A minha amiga e fiel ‘comparsa’ de vida Raíssa Valentim  
E a todos que de alguma forma me apoiaram nesta caminhada

**DEDICO**

## AGRADECIMENTOS

Como já dizia Albert Einstein: “Não existem sonhos impossíveis para aqueles que realmente acreditam que o poder realizador reside no interior de cada ser humano. Sempre que alguém descobre esse poder, algo antes considerado impossível torna-se realidade”. Hoje, vivo mais uma realidade que se deu início em um sonho, mas que foi preciso muito esforço, determinação, paciência, perseverança, ousadia e maleabilidade para chegar até aqui, e nada disso eu teria conseguido sozinha. Por isso, minha eterna gratidão àqueles que sonharam e continuam sonhando comigo.

Agradeço a minha professora e orientadora Maria Lucia Bianchi que, com muita paciência e atenção, dedicou do seu valioso tempo para me orientar em cada passo deste trabalho. Pelas palavras de incentivo, por todo apoio, confiança e correções. Obrigada por ser exemplo de profissional e ser humano para tantos alunos, incluindo a mim.

Agradeço aos meus irmãos de sangue e de alma, Clarissa, Diego e Rômulo, por todo amor, conselhos e ajuda, por serem meus exemplos de tantos valores e aprendizados. A minha amiga de longa data, Emylle Maia, pela parceria e por sempre me apoiar nas minhas ‘loucuras’. A uma das minhas pessoas preferidas neste universo, Raíssa Valentim, que está comigo transcendendo o tempo e o espaço ‘ao infinito e além’, por toda sua capacidade de fazer eu me sentir melhor nos piores momentos, pelo seu carinho, amor, compreensão e apoio. Vocês são minha família, meu porto seguro, e eu os amo muito.

Aos meus colegas de pós-graduação que se tornaram verdadeiros amigos, em especial José Alves, Renato Oliveira, João Ucella e Michelly Casagrande, por toda parceria e cumplicidade em sala de aula, laboratórios da CTM e, principalmente, na vida. Com vocês, o mestrado tornou-se muito mais leve. Ao meu irmão do meio científico, Vitor Augusto, por toda ajuda nas análises químicas e pelas caronas até à UFLA. Vocês são incríveis.

Obrigada a todos que, mesmo não citados aqui, tanto contribuíram para a conclusão desta etapa e para a pessoa que tenho me tornado.

## RESUMO

A indústria cervejeira gera muito resíduo sólido durante o processo de produção. Grande parte deste resíduo (bagaço de malte) é utilizado na alimentação animal ou adubação em campos. Porém, muitas cervejarias não o reutilizam. As indústrias tentam manter os custos de minimização de resíduos tão baixos quanto possível, ao passo que a legislação pertinente se mantém restritiva. Nesse sentido, o estudo teve como objetivo avaliar a eficiência de biocarvões produzidos a partir de bagaço de malte, no tratamento de esgoto sanitário. O bagaço de malte foi caracterizado quimicamente. Foram empregados dois pré-tratamentos nas amostras de bagaço de malte antes da produção dos biocarvões, além da testemunha: (i) lavagem do bagaço de malte com água fria e (ii) lavagem do bagaço de malte com água quente, ambos com mesmo volume de água. As amostras tratadas e não tratadas, de granulometria entre 40 e 60 mesh, foram pirolizadas nas temperaturas de 350 e 500 °C, com taxa de aquecimento de 10 °C min<sup>-1</sup>, durante 2 horas. Os biocarvões foram caracterizados quanto à análise química imediata, CHNS-O, TG, FTIR e cálculo de área superficial estimada. Para a realização do tratamento do efluente por adsorção, foram utilizados os seis biocarvões preparados. Dessa forma, foi realizado um planejamento fatorial 2<sup>2</sup>. Os níveis das variáveis em estudo nesse planejamento foram: massa (0,3 e 0,9 g) e agitação (200 e 300 rpm). A variável resposta analisada foi a eficiência de remoção de Carbono Orgânico Total (TOC). O bagaço de malte apresenta características desejáveis para um material precursor, como o alto teor de carbono fixo (≈ 20%) e teor elevado de extrativos (≈29%). Os pré-tratamentos de lavagem do material em água fria e em água quente não influenciaram nas propriedades dos biocarvões. As melhores condições de adsorção em biocarvão de bagaço de malte resultaram em uma remoção de aproximadamente 38% de TOC com os biocarvões produzidos a 500 °C sem lavagem e produzido a 350 °C, lavado com água quente. Esse número representa um indicativo de aplicabilidade dos biocarvões de bagaço de malte na remoção de matéria orgânica.

**Palavras-chave:** adsorção, resíduo agroindustrial, matéria orgânica, efluentes.

## ABSTRACT

The brewing industry generates a lot of solid waste during the process. Much of this residue (malt bagasse) is used in animal feed or fertilization in fields. However, many breweries do not reuse it. Industries try to keep waste minimization costs as low as possible, while relevant legislation remains restrictive. In this sense, the study aimed to evaluate the efficiency of biochars produced from malt bagasse in the treatment of sanitary sewage. Malt bagasse was chemically characterized. Two pretreatments were used in the samples of malt bagasse before the production of the biochars, in addition to the control: (i) washing the malt bagasse with cold water and (ii) washing the malt bagasse with hot water, both with the same volume of water. The treated and untreated samples, with a particle size between 40 and 60 mesh, were pyrolyzed at temperatures of 350 and 500 ° C, with a heating rate of 10 ° C min<sup>-1</sup>, for 2 hours. Biochars were characterized in terms of immediate chemical analysis, CHNS-O, TG, FTIR and estimated surface area calculation. To perform the treatment of the effluent by adsorption, the six biochars prepared were used. Thus, a factorial design 2<sup>2</sup> was carried out. The levels of the variables under study in this planning were: mass (0.3 and 0.9 g) and agitation (200 and 300 rpm). The response variable analyzed was the removal efficiency of Total Organic Carbon (TOC). Malt bagasse has desirable characteristics for a precursor material, such as high fixed carbon content ( $\approx 20\%$ ) and high extractive content ( $\approx 29\%$ ). The pre-treatments for washing the material in cold water and in hot water did not influence the properties of the biochars. The best adsorption conditions in malt bagasse biochar resulted in a removal of approximately 38% of TOC with the 500-S (500 °C/not washed) and 350-Q (350°C/washed with hot water) biochars. This number represents an indication of the applicability of malt bagasse biochars in the removal of organic matter.

**Key-words:** adsorption, agro-industrial waste, organic matter, effluents.



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Composição do bagaço de malte. ....	6
Figura 2 - Processo de produção de cerveja da microcervejaria Funil, Lavras – MG.....	11
Figura 3 - Cilindros de aço (A) adaptados em forno do tipo mufla (B). ....	12
Figura 4 – Curva termogravimétrica do bagaço de malte sem lavagem (BM-S), lavado em água fria (BM-F) e lavado em água quente (BM-Q) sob atmosfera de N <sub>2</sub> e vazão de 50 mL min <sup>-1</sup> ....	23
Figura 5 – Curvas termogravimétricas dos biocarvões produzidos a 350°C, sem lavagem (350-S), lavado em água fria (350-F) e lavado em água quente (350-Q) sob atmosfera de N <sub>2</sub> e vazão de 50 mL min <sup>-1</sup> . ....	24
Figura 6 – Curvas termogravimétricas dos biocarvões produzidos a 500 °C, sem lavagem (500-S), lavado em água fria (500-F) e lavado em água quente (500-Q) sob atmosfera de N <sub>2</sub> e vazão de 50 mL min <sup>-1</sup> . ....	24
Figura 7 - Espectros de FT-IR do bagaço de malte sem lavagem (BM-S), bagaço de malte lavado em água fria (BM-F) e lavado em água quente (BM-Q). ....	25
Figura 8 - Espectros de FT-IR dos biocarvões produzidos a 350 °C. ....	26
Figura 9 - Espectros de FT-IR dos biocarvões produzidos em 500 °C. ....	27

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Composição típica de esgotos sanitários.....	4
Tabela 2 - Características do efluente tratado da ETE/UFLA.....	4
Tabela 3 - Tratamentos dos biocarvões a partir do bagaço de malte.....	13
Tabela 4 - Planejamento Fatorial Completo 2 <sup>2</sup> . ....	18
Tabela 5 - Valores médios da composição química do bagaço de malte. ....	19
Tabela 6 - Valores médios de umidade, materiais voláteis, cinzas e carbono fixo do bagaço de malte.....	20
Tabela 7 - Valores médios de RGC (Rendimento Gravimétrico em Biocarvão), umidade, materiais voláteis, cinzas e carbono fixo dos biocarvões produzidos. ....	20
Tabela 8 - Valores médios de carbono, hidrogênio, nitrogênio, enxofre e oxigênio dos biocarvões produzidos.....	21
Tabela 9 - Dados de caracterização do esgoto sanitário da ETE-UFLA a partir de amostras retiradas na última semana de novembro de 2020.....	27
Tabela 10 - Quantidade de TOC removida, em porcentagem, para cada tratamento em cada ensaio de adsorção.....	29
Tabela 11 - Valores médios de remoção de TOC dentro de cada fator avaliado. ....	29

## **LISTA DE SIGLAS, SÍMBOLOS, ABREVIATURAS**

CERVBRASIL - Associação Brasileira da Indústria Cervejeira

SNIS - Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento

CONAMA - Conselho Nacional do Meio Ambiente

UFLA - Universidade Federal de Lavras

MG - Minas Gerais

DQO - Demanda Química de Oxigênio

DBO – Demanda Biológica de Oxigênio

TOC - Total Organic Carbon

COT - Carbono Orgânico Total

ST - Sólidos Totais

STF - Sólidos Totais Fixos

STV - Sólidos Totais Voláteis

BM-S - Bagaço de Malte sem lavagem (testemunha)

BM-F - Bagaço de Malte lavado em água fria

BM-Q - Bagaço de Malte lavado em água quente

350-S - Biocarvão de 350 °C sem lavagem

350-F - Biocarvão de 350 °C lavado em água fria antes de ser produzido

350-Q - Biocarvão de 350 °C lavado em água quente antes de ser produzido

500-S - Biocarvão de 500 °C sem lavagem

500-F - Biocarvão de 500 °C lavado em água fria antes de ser produzido

500-Q - Biocarvão de 500 °C lavado em água quente antes de ser produzido

TGA - Análise termogravimétrico

FTIR - Espectroscopia na região do infravermelho com transformada de Fourier

RGB - Rendimento Gravimétrico em Biocarvão

## SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO .....	1
2	OBJETIVOS .....	2
2.1	Objetivo Geral .....	2
2.2	Objetivos específicos.....	2
3	REFERENCIAL TEÓRICO .....	3
3.1	Tratamento de esgotos sanitários .....	3
3.2	Bagaço de malte .....	5
3.3	Adsorção .....	7
3.4	Biocarvão .....	8
4	MATERIAL E MÉTODOS .....	11
4.1	Biomassa: bagaço de malte .....	11
4.2	Preparação dos biocarvões .....	11
4.3	Caracterização do bagaço de malte e dos biocarvões.....	13
4.3.1	Composição química .....	13
4.3.2	Análise química imediata .....	15
4.3.3	Análise elementar .....	15
4.3.4	Análise termogravimétrica (TGA) .....	16
4.3.5	FTIR .....	16
4.4	Caracterização do efluente .....	16
4.5	Planejamento fatorial dos ensaios de adsorção .....	17
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	18
5.1	Caracterização química do bagaço de malte e dos biocarvões.....	18
5.2	Análise termogravimétrica (TGA) .....	22
5.3	FTIR .....	24
5.4	Caracterização do efluente .....	27
5.5	Ensaio de adsorção .....	28
6	CONCLUSÕES.....	29
7	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	31

## 1 INTRODUÇÃO

Considerando a produção mundial, o Brasil está entre os três maiores fabricantes de cerveja do mundo, em termos de volume e faturamento, perdendo somente para a China e os Estados Unidos (MARCUSO & MÜLLER, 2019). As grandes cervejarias possuem um amplo sistema de distribuição e promoção, sendo capaz de atingir cerca de 1,2 milhão de pontos de vendas, comercializando 13,3 bilhões de litros de cerveja (CERVIERI, 2017). Como possui um importante efeito multiplicador, atualmente, a atuação do mercado cervejeiro movimentava uma extensa rede, que é responsável por 1,6% do PIB e 14% da indústria de transformação nacional (CERVBRASIL, 2018). No entanto, diante deste quadro de crescimento, preocupações sobre o impacto que esse setor pode causar em relação ao ambiente, ainda são insignificantes.

A indústria cervejeira gera muito resíduo sólido durante o processo. Além disso, também são gerados os efluentes, que apresentam valores consideráveis de matéria orgânica, podendo chegar a 150.000 mg L<sup>-1</sup> de Demanda Química de Oxigênio (DQO), e faixas de pH extremas (SELUY & ISLA, 2014). Uma técnica frequentemente utilizada para monitorar matéria orgânica é a determinação de carbono orgânico total (COT), também empregada para avaliar a eficiência de métodos de degradação de compostos orgânicos tóxicos (APLIN et al., 2001; NOGUEIRA et al., 2005).

Somente no ano de 2018, a indústria cervejeira produziu 14,1 bilhões de litros de cerveja no Brasil, gerando mais de 20 kg de resíduos para cada 100 L de cerveja produzidos (JUCHEN et al., 2018). O bagaço de malte corresponde a 85% dos resíduos gerados na produção de cerveja (MUSSATTO et al., 2006). Estes números, observados na perspectiva da sustentabilidade, impactam fortemente, mostrando a carência de uma gestão de resíduos eficiente, já que sua destinação é de responsabilidade do gerador, incorrendo em desrespeito legal caso sua remoção seja inadequada.

Este resíduo, chamado também de bagaço de malte, é constituído essencialmente pela casca do malte e apresenta, em média, em sua constituição 30% de proteínas e 65% de fibras, sendo considerado um subproduto industrial com baixo valor agregado (REINOLD, 1997). Grande parte do resíduo é utilizado na produção de compostos destinados à alimentação animal ou adubação em campos. Porém, muitas cervejarias não o reutilizam. De modo geral, as indústrias tentam manter os custos de minimização de

resíduos tão baixos quanto possível, ao passo que a legislação pertinente se mantém restritiva.

Existe uma demanda crescente por estudos que empreguem resíduos agroindustriais na preparação de produtos. Isso se dá em razão do interesse por produtos ecologicamente corretos, provenientes de fonte renovável, biodegradáveis e de baixo custo e por suas características oferecerem diversas possibilidades de utilização (ROCHA et al., 2012; HONORATO et al., 2015).

Dentre os materiais que tem surgido na remoção de poluentes do meio aquoso, destaca-se o biocarvão (carvão derivado de biomassa), que apresenta excelentes características adsorventes (ADIB et al., 2015; QIAN et al., 2015). Dessa forma, com a finalidade de diversificar a fonte de matéria prima para produção de biocarvões e diminuir os custos dos processos de adsorção, sugere-se a utilização de diferentes biomassas, na preparação desses adsorventes. Assim, resíduos como casca de arroz, palha de milho, casca de coco, dentre outros, vêm sendo utilizados para produzir biocarvões para remoção de contaminantes orgânicos, em diversos tipos de efluentes (ALAM et al., 2020; WANG et al., 2020; PARTLAN et al., 2020).

A utilização do bagaço de malte transformado em um material com maior capacidade adsorvente, como o biocarvão, pode ser uma ótima opção para contribuir na proteção do meio ambiente, promovendo uma nova alternativa no tratamento de esgotos sanitários já que este resíduo pode ser obtido em grandes quantidades. Esse bioadsorvente poderia ser utilizado, inclusive, pelas próprias cervejarias, seja para purificar a água captada ou para auxiliar no tratamento do efluente a ser descartado.

## **2 OBJETIVOS**

### **2.1 Objetivo Geral**

Avaliar a eficiência de biocarvões produzidos a partir de bagaço de malte, principal resíduo sólido da indústria cervejeira, no tratamento de esgoto sanitário.

### **2.2 Objetivos específicos**

- Caracterizar quimicamente o bagaço de malte.
- Preparar biocarvões de bagaço de malte em diferentes temperaturas e pré-tratamentos.

- Caracterizar os biocarvões e o bagaço de malte por meio de análise química imediata, análise elementar, TG/TGA e FTIR.
- Avaliar, por meio de um planejamento fatorial, a eficiência de remoção de Carbono Orgânico Total (TOC) dos biocarvões em contato com o esgoto sanitário proveniente da Estação de Tratamento de Esgoto (ETE) da Universidade Federal de Lavras (UFLA) - MG.

### **3 REFERENCIAL TEÓRICO**

#### **3.1 Tratamento de esgotos sanitários**

O crescimento acelerado da população mundial, juntamente com o crescente volume de esgotos sanitários produzidos, vem contribuindo para a degradação do meio ambiente, desestabilização dos ecossistemas e causando graves problemas ambientais e sociais (OLIVEIRA et al., 2019). Isso porque, esses efluentes são despejados nos recursos hídricos e no solo com pouco ou nenhum tipo de tratamento. Além disso, não existe um sistema de tratamento padrão para ser utilizado, pois vários fatores irão influenciar na escolha das opções tecnológicas, tais como: disponibilidade de área, qualidade desejada para o efluente tratado, da legislação referente ao local, entre outros (PIMENTA et al., 2002).

Pimenta et al. (2002) ressalta ainda que o investimento no tratamento de efluentes pode significar um grande salto para o desenvolvimento em termos da dotação da infraestrutura requerida para proteger o meio ambiente e melhorar a qualidade de vida da população, assim como propiciar novas oportunidades de negócios. Assim, a coleta, o tratamento e a disposição ambientalmente adequada de efluentes são fundamentais para a melhoria do quadro de saúde da população e pré-requisito para busca da sustentabilidade.

Um importante fator a ser controlado por esse setor é o descarte de efluentes tratados em corpos d'água sob condições adequadas, correspondentes àquelas exigidas pelos órgãos protetores, como o CONAMA, que dispõe sobre as condições e padrões de lançamento de efluentes em corpos hídricos do Brasil, através da Resolução nº. 430 de maio de 2011 (BRASIL, 2011).

Atualmente, poucas cidades no Brasil possuem Estações de Tratamento de Esgoto

(ETE), onde cerca de 50% dos esgotos gerados tem tratamento (SNIS, 2019), que possuem as principais etapas: pré-tratamento (gradeamento e desarenação), tratamento primário (floculação e sedimentação), tratamento secundário (processos biológicos de oxidação), tratamento de lodo e tratamento terciário (polimento da água). Para avaliar a eficiência dos tratamentos, deve-se conhecer a composição típica de esgotos sanitários (Tabela 1).

Tabela 1 - Composição típica de esgotos sanitários.

<b>Concentração (mg/L)</b>	<b>Fraca</b>	<b>Média</b>	<b>Forte</b>
DQO*	339	508	1016
DBO**	133	200	400
Nitrogênio total	23	35	69
Fósforo total	3,7	5,6	11
Sólidos totais	537	806	1612
Sólidos suspensos fixos	29	43	83
Sólidos suspensos voláteis	101	152	304

\*Demanda Química de Oxigênio; \*\*Demanda Biológica de Oxigênio

Fonte: Adaptado de Metcalf & Eddy (2016).

Atualmente, na ETE da Universidade Federal de Lavras (UFLA), está implantado o sistema de tratamento de esgoto com reatores UASB (Upflow Anaerobic Sludge Blanket Reactor), que é uma tecnologia de tratamento biológico de esgotos baseada na decomposição anaeróbia da matéria orgânica, e Filtros Biológicos Submersos (FBS). Na Tabela 2 são apresentados as principais características do efluente já tratado, com exceção do Carbono Orgânico Total (COT ou TOC). O TOC tem sido indicado como o parâmetro mais importante para a determinação global da matéria orgânica em ambientes aquáticos, como alternativa às incertezas e dificuldades nos ensaios para a determinação da DBO (KNAPICK et al., 2016 ).

Tabela 2 - Características do efluente tratado da ETE/UFLA.

<b>Variável</b>	<b>Média ± Desvio padrão</b>
pH	7,2 ± 0,4
Turbidez (UNT)	6,3 ± 1,1
Sólidos totais (mg L <sup>-1</sup> )	546,3 ± 51,9
DQO (mg L <sup>-1</sup> )	86,6 ± 42,7
DBO (mg L <sup>-1</sup> )	40,0 ± 17,7
Nitrogênio total	19,6 ± 4,7

Fonte: Adaptado de Silva et al. (2019).



No entanto, apesar de várias cidades brasileiras já contarem com ETEs, a maioria não coleta e nem trata seus efluentes. Além disso, há grande descontinuidade dos programas de saneamento, muito comum no Brasil, por estarem dependentes de injunções político-econômicas. A principal consequência da descontinuidade é a crescente falta de conformidade entre o crescimento populacional das cidades e a necessária infraestrutura urbana para atendimento da população, além de desperdício de dinheiro com a eventual perda de serviços realizados, problemas contratuais com empreiteiras e necessidade de novos planejamentos (NUVOLARI, 2003). Dessa forma, é desejável sistemas de tratamento simplificados e mais próximos ao que realmente ocorre na natureza.

O final de 2019 foi marcado por uma crise emergencial na saúde causada pelo vírus SARS-CoV-2, um tipo de coronavírus. Embora até o presente momento não tenha sido relatada a existência de casos com transmissão fecal-oral do novo coronavírus no mundo (WHO, 2020), muitos estudos mostram que é possível que ocorra essa transmissão, especialmente em países subdesenvolvidos, com baixa cobertura de saneamento ambiental. Chen et al. (2020) mostraram que a maior presença de fármacos à base de cloroquina inibiu os reatores anaeróbios, reduzindo a remoção de matéria orgânica (na forma DQO), mostrando que esses sistemas são facilmente afetados pela maior presença do fármaco. Portanto, diante do novo cenário no país, recomenda-se que as ETEs passem por readequações, tendo em vista a melhora do processo de descontaminação (ROLLEMBERG et al., 2020).

### **3.2 Bagaço de malte**

O mercado cervejeiro no Brasil vem crescendo de forma exponencial nos últimos anos, devido, principalmente, ao grande movimento para criação de micro cervejarias: Em 2013 havia cerca de 200 fábricas registradas, enquanto que em 2018 esse número cresceu para 889 (MARCUSO & MÜLLER, 2019). O ano de 2019 encerrou-se mostrando a consolidação do crescimento deste mercado, chegando a aproximadamente 1209 estabelecimentos com cervejarias legalmente instaladas, e cerveja é o produto com maior número de registros no Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA) com 27329 produtos registrados (MARCUSO & MÜLLER, 2019). Em contrapartida, com a grande produção também há a grande quantidade de resíduos sólidos e líquidos gerados nas indústrias.

O principal e mais abundante é o bagaço de malte, que provém do processo de obtenção do mosto, pela fervura do malte moído e dos adjuntos, que após a filtração resulta num resíduo que geralmente é destinado para ração animal (AQUARONE et al., 2001). Esse resíduo é composto, principalmente, por restos de grãos de cevada, isto é, o pericarpo, o revestimento da semente, a casca e a camada de aleurona do grão original (MUSSATTO, 2013) e, embora a composição química possa variar, o bagaço de malte é um material lignocelulósico (Figura 1).

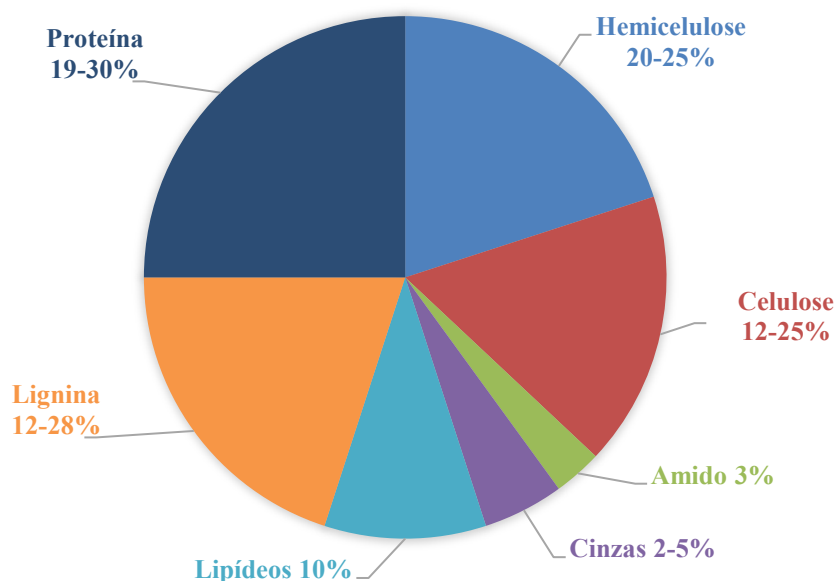


Figura 1 - Composição do bagaço de malte.

Fonte: Adaptado de Lynch et al. (2016) e Szwajgier et al. (2010).

Esse subproduto também pode ser utilizado para alimentação humana. Segundo Dobrzanski et al. (2008), o alto valor de fibras e os resíduos de proteínas e açúcares tornam este bagaço com potencial de utilização em produtos elaborados na panificação, cujo o incremento em fibras traz benefícios nutricionais ao consumidor.

Atualmente, estuda-se o uso de resíduos industriais em diferentes processos de tratamento de águas residuais, com o intuito de reduzir custos e os impactos ambientais. Nos trabalhos realizados por Melo et al. (2019) e Fontana et al. (2016), o bagaço de malte foi utilizado na remoção dos corantes azul de metileno e laranja direto 39, cujas capacidades de adsorção de cor chegaram a 76 e 96 % respectivamente.

Os resultados positivos destas pesquisas evidenciam o potencial do bagaço de malte como bioissorvente no tratamento de efluentes. No entanto, a maioria dos trabalhos

utilizando o bagaço de malte restringem a sua aplicação somente para adsorção de corantes e em sistemas de batelada. Ainda são poucos os trabalhos que utilizam essa biomassa por sistemas contínuos, e pouco ou nada evidentes no tratamento de esgotos.

### 3.3 Adsorção

A adsorção envolve a separação de uma substância de uma fase, acompanhada pelo seu acúmulo ou concentração na superfície de outra. Esse processo se dá pela transferência de determinada substância (adsorvato) que está em solução em uma fase fluida para a interface de uma fase sólida (adsorvente), formando uma interação entre adsorvato e adsorvente (RUTHVEN, 1984).

A adsorção pode ocorrer tanto física quanto quimicamente. Quando a adsorção é física, as moléculas adsorvidas mantem sua identidade original e são atraídas à superfície por forças de atração-repulsão, do tipo Van der Waals. Além destas, a natureza das forças envolvidas pode ser do tipo momento dipolar, quadrupolar ou polarização (RUTHVEN, 1984). Já a adsorção química envolve a troca ou compartilhamento de elétrons entre as moléculas de adsorbato e a superfície do adsorvente. Essas ligações são muito mais fortes que a forças físicas. Isto faz com que a dessorção seja bem mais difícil, já que as moléculas adsorvidas podem sofrer reações irreversíveis (ROUQUEROL et al., 2014).

A maioria dos processos industriais que envolve separação por adsorção tem preferência pela adsorção física, por ser reversível, o que facilita a utilização do mesmo adsorvente por vários ciclos de adsorção-dessorção. Já a adsorção química é um processo mais seletivo e dominante em correntes com baixa concentração do composto alvo (ROUQUEROL et al., 2014).

Atualmente, são realizados diversos estudos que visam substituir o carvão por outros materiais, que também possuem elevada capacidade de separar os compostos dissolvidos em fluidos, tanto em líquidos quanto em gases. Um estudo que pode servir de exemplo para a minimização dos impactos ambientais e proteção do meio ambiente foi desenvolvido por Sousa et al. (2007), que utilizaram a casca de coco verde para remover metais tóxicos presentes em amostras preparadas. Estas são produzidas em laboratório para simular um tipo de efluente líquido existente em diversas fábricas. A eficiência do material como adsorvente alcançou valores de até 98,5% para a redução de cádmio ( $Cd^{2+}$ ), um dos metais analisados nessa pesquisa.

Quando aplicada em estações de tratamento no meio industrial, há necessidade de que a adsorção seja executada de maneira contínua, feita em equipamentos denominados colunas ou torres de adsorção. Na adsorção em coluna, a solução entra e sai continuamente na mesma, de modo que o equilíbrio completo nunca é estabelecido em nenhum estágio entre o soluto em solução e o volume adsorvido (DENBINSKI et al., 2019).

Denbinski et al. (2019), com a realização dos experimentos de adsorção em coluna de leito fixo, utilizando serragem carbonizada como material adsorvente, alcançaram valores de até 81,74% de remoção de cromo trivalente e concluíram que é possível melhorar os padrões de lançamento do efluente da indústria de couro, atendendo a legislação vigente e reduzindo a concentração de agentes poluidores presentes no mesmo.

Truong et al. (2020) utilizaram biocarvão e cinzas voláteis como adsorvente de matéria orgânica na água e observaram que, mesmo com grupos carboxila e fenoxila carregados negativamente em pH 7, o biocarvão puro exibiu maior absorvidade em comparação às cinzas. Segundo os autores, a diferença no comportamento de adsorção pode ser atribuída à maior área superficial de biocarvão ( $230 \text{ m}^2 \text{ g}^{-1}$ ) em comparação com a de cinzas ( $18,2 \text{ m}^2 \text{ g}^{-1}$ ) e a possível existência de interação  $\pi$ - $\pi$  entre as estruturas aromáticas do biocarvão da matéria orgânica.

Pesquisas desse tipo demonstram ser excelentes alternativas à redução da poluição de água (JUNG et al., 2015; LEE et al., 2018; MENYA et al., 2018). Sendo ainda importante ressaltar que acarreta em um processo economicamente viável, pelo fato de se tratarem de resíduos e, que ao invés de serem descartados, são reciclados para beneficiar, tanto o próprio empreendimento, quanto a natureza que o contorna. A adsorção, portanto, acaba se tornando uma operação sustentável e ambientalmente desejável.

### **3.4 Biocarvão**

O biocarvão representa uma conversão de C de biomassa para C de biocarvão de aproximadamente 50% (LEHMANN et al. 2002). É um material poroso, constituído principalmente de carbono produzido a partir de uma variedade de biomassas por meio da decomposição, na ausência de oxigênio, em temperaturas que podem variar de 150 a aproximadamente 600 °C (IBI, 2015; TRIPATHI et al., 2016; FEITOSA et al., 2020).

As propriedades do biocarvão são diferentes das do carvão ativado, embora ambos sejam materiais ricos em carbono. O biocarvão é um produto não totalmente carbonizado,

porque a sua produção pela pirólise é frequentemente realizada a temperaturas mais baixas se comparadas ao processo de produção do carvão ativado (OLESZCZUK et al., 2012). À medida que a temperatura ultrapassa os 300 °C, a biomassa elimina os compostos voláteis presentes na matéria que consiste em gases, óleos e alcatrão, apresentando os resíduos na forma de biocarvão (ZHENG et al., 2010).

O biocarvão pode ser utilizado diretamente como um substituto do carvão vegetal, mas a sua aplicação no solo agrega maior valor, pois, quando usado como um condicionador do solo, pode aumentar sua fertilidade e melhorar a sua qualidade, elevando o pH (HOSSAIN et al., 2011). Também pode aumentar a capacidade de retenção de umidade e melhorar a capacidade de troca catiônica, ajudando o solo a manter os nutrientes. Manolikaki e Diamadopoulos (2020), ao adicionarem biocarvões produzidos a partir de subprodutos da cervejaria a um solo calcário argiloso, observaram melhoria na fertilidade do solo, aumentando principalmente os níveis de carbono, nitrogênio e fósforo.

Outra utilização possível para esse produto é com a função de adsorvente, uma vez que possui muitas propriedades atraentes para ser utilizado para esse fim. Segundo Tong et al. (2014), o biocarvão possui alta aromaticidade e grande área superficial, sendo considerado um ótimo sorvente de poluentes orgânicos e inorgânicos. Promraksa e Rakmak (2020) produziram biocarvão a partir das cascas do palmiste e concluíram que pode ser considerado como um adsorvente alternativo de baixo custo de produção para aplicação na captura de CO<sub>2</sub>, cuja capacidade de adsorção foi de 0,46 mmol g<sup>-1</sup>.

Alguns estudos já foram realizados para avaliar a capacidade de adsorção e a eficiência na remoção de metais pesados em ambientes aquosos. Dentre as biomassas utilizadas para esse fim, destacam-se os resíduos de cana-de-açúcar estudados por Ferreira et al. (2015), Figueredo et al. (2017) e Ferreira (2018) para a remoção de íons cobre, chumbo e cromo, respectivamente. Os biocarvões produzidos obtiveram eficiência de remoção de 96% para chumbo e acima de 99% para cobre e cromo.

Correa-Navarro et al. (2020) produziram biocarvão a partir do bagaço de fique (*Portulaca pusilla*) e observaram que a capacidade de adsorção de cafeína e diclofenaco em solução aquosa foi gradualmente aumentada quando a temperatura e o tempo de residência para a produção de biocarvão foram aumentados (650 °C, 750 °C e 850 °C; 2 h e 3 h). A umidade, bem como o conteúdo de lignina e celulose na biomassa, também têm influência considerável na formação de biocarvão. A celulose presente na biomassa

auxilia na formação de alcatrão, enquanto alto teor de lignina é favorável para a produção de carvão (TOMCZYK et al., 2020).

Estudos anteriores demonstraram que o uso de biocarvão em áreas úmidas construídas (*Wetland* - lagoas ou canais artificiais rasos que abrigam plantas aquáticas para simular ecossistemas naturais) pode melhorar significativamente sua capacidade de remover coliformes (DE ROZARI et al., 2015). Kizito et al. (2017), ao analisarem três colunas diferentes em zonas úmidas construídas com fluxo vertical no tratamento de efluente, concluíram que a coluna embalada em biocarvão pode fornecer uma remoção significativamente maior de orgânicos, nitrogênio e fósforo, em comparação com as colunas compactadas em cascalho, ao tratar efluentes digeridos anaerobicamente. A melhor remoção de poluentes nos biocarvões pode ser atribuída à maior área de superfície e maior porosidade, o que possibilitou maior adsorção de poluentes, maior colonização microbiana e conseqüentemente maior degradação biológica de poluentes.

Franciski et al. (2018) utilizaram o bagaço de malte de cevada como um precursor para a obtenção de biochar e biochar ativado por CO<sup>2</sup>. Ambos os materiais foram devidamente caracterizados e aplicados para remover o corante azul de metileno de soluções aquosas. Concluiu-se que o material volátil foi removido durante o processo de pirólise, mas os valores de área superficial e volume de poro foram pouco afetados. Nesse sentido, apenas a pirólise não foi suficiente para fazer do material um bom adsorvente. Porém, a ativação adicional com CO<sup>2</sup> foi capaz de produzir um material mesoporoso com área superficial de 80 m<sup>2</sup> g<sup>-1</sup>.

Machado et al. (2020) também produziram biocarvão a partir do bagaço de malte e puderam verificar que a temperatura de pirólise influenciou nos rendimentos dos produtos. Um aumento na temperatura de pirólise (de 500 para 700 °C) e no tempo de espera (de 10 para 50 min) causou uma diminuição no rendimento do biocarvão, uma redução no conteúdo de matéria volátil e um aumento na quantidade de cinzas. Além disso, o uso de temperaturas de pirólise mais altas levou à formação de uma porcentagem maior de bio-óleo, o que pode resultar em um bloqueio adicional dos poros do biochar. Portanto, temperaturas mais baixas podem ser mais interessantes.

Por fim, os biocarvões revelam potencial de contribuir para resolver questões econômicas, de saúde pública e ambientais, problemas que são generalizados e precisam ser superados. Em resumo, são necessárias mais pesquisas sobre tecnologia de biocarvão, adequação e sustentabilidade como um descontaminador.

## 4 MATERIAL E MÉTODOS

Para cumprimento dos objetivos propostos, foram estabelecidas as seguintes etapas para a execução da pesquisa: coleta do resíduo sólido e do efluente, caracterização do resíduo sólido (bagaço de malte), produção dos biocarvões, caracterização do biocarvão, caracterização do efluente e ensaios de adsorção. Os experimentos foram conduzidos nas dependências do Departamento de Química e Departamento de Ciências Florestais da UFLA.

### 4.1 Biomassa: bagaço de malte

O bagaço de malte foi coletado na microcervejaria Funil (Figura 2), localizada no município de Lavras, estado de Minas Gerais, na fase final do processo de produção da cerveja. O efluente foi coletado na Estação de Tratamento de Esgoto (ETE) da UFLA. Os materiais coletados foram devidamente acondicionados no freezer, em embalagens plásticas. As amostras de bagaço de malte foram descongeladas em temperatura ambiente por aproximadamente 24 horas antes de serem usadas, seguida de secagem em estufa a 60 °C por 48 horas. Posteriormente o material foi moído em moinho de facas do tipo Wiley e peneirado para obtenção de granulometria entre 40 e 60 mesh.



Figura 2 - Processo de produção de cerveja da microcervejaria Funil, Lavras – MG.

Fonte: do autor, 2021.

### 4.2 Preparação dos biocarvões

Foram empregados dois pré-tratamentos nas amostras de bagaço de malte antes

da preparação dos biocarvões, além da testemunha (sem nenhum tipo de tratamento), a fim de eliminar substâncias que possam prejudicar o processo de adsorção: (i) lavagem do bagaço de malte com água fria (a 25 °C) e (ii) lavagem do bagaço de malte com água quente (a 80 °C). O tratamento foi realizado utilizando-se 100 mL de água destilada para cada 10 g de material. Após, o material foi filtrado e seco em estufa a  $103 \pm 2$  °C por 24 horas.

As amostras tratadas e não tratadas, passadas na peneira de 40 mesh e retidas na peneira de 60 mesh, foram colocadas em cilindros de aço inoxidável (10,6 cm de diâmetro e 42 cm de altura), que foram selados e acomodados em um forno adaptado que permite a liberação de gases durante a pirólise (Figura 3), conforme descrito em Lustosa Filho et al. (2017).



Figura 3 - Cilindros de aço (A) adaptados em forno do tipo mufla (B).

Fonte: do autor, 2021.

A pirólise foi realizada elevando a temperatura até 350 ou 500 °C, a uma taxa de aquecimento de  $10$  °C  $\text{min}^{-1}$ , mantendo a temperatura por 2 horas para fornecer tempo suficiente para a carbonização completa. Foram realizados 6 tratamentos (Tabela 3).

Para todos os ensaios de adsorção, os biocarvões foram previamente secos em estufa a  $103 \pm 2$  °C por 24 h e resfriados até temperatura ambiente em dessecador contendo sílica-gel, onde ficaram armazenados até o uso.



Tabela 3 - Tratamentos dos biocarvões a partir do bagaço de malte.

<b>Biocarvão</b>	<b>Temperatura (°C)</b>	<b>Pré-tratamento</b>	<b>Denominação</b>
1	350	Sem lavagem	350-S
2	350	Água fria	350-F
3	350	Água quente	350-Q
4	500	Sem lavagem	500-S
5	500	Água fria	500-F
6	500	Água quente	500-Q

### 4.3 Caracterização do bagaço de malte e dos biocarvões

O bagaço de malte foi caracterizado quanto a composição química (teores de extrativos, lignina e holoceluloses), análise química imediata (umidade, materiais voláteis, cinzas e carbono fixo), análise elementar (CHNS-O), análise termogravimétrica (TGA) e espectroscopia na região do infravermelho com transformada de Fourier (FTIR).

Os biocarvões foram caracterizados quanto a análise química imediata (umidade, materiais voláteis, cinzas e carbono fixo), análise elementar (CHNS-O), análise termogravimétrica (TG e TGA) e espectroscopia na região do infravermelho com transformada de Fourier (FTIR).

#### 4.3.1 Composição química

Para a análise de composição química do bagaço de malte foram determinados o teor de extrativos totais, teor de lignina solúvel e insolúvel e o teor de holocelulose. A fração utilizada para estas análises foi a que passou pela peneira de 40 mesh e ficou retida na peneira de 60 mesh. O teor de extrativo total foi determinado conforme a norma TAPPI 204 om-88 (TECHNICAL ASSOCIATION OF THE PULP AND PAPER INDUSTRY - TAPPI, 2001), substituindo o etanol/benzeno por etanol/tolueno. Para a quantificação dos extrativos totais foram utilizados cerca de 2 g de bagaço de malte seco em cadinho de vidro com placa porosa previamente tarado. Em seguida foi feita a extração do resíduo em *Soxhlet*, por aproximadamente 5 horas, em solução de tolueno/etanol 2:1 (v/v). Passado esse período a solução foi substituída por etanol e permaneceu por mais 4 horas.

Posteriormente, o material lignocelulósico foi lavado com água quente até que o filtrado ficasse incolor. Em seguida, o material foi seco em estufa a  $103 \pm 2$  °C, por

aproximadamente 12 horas. A quantificação dos materiais extraíveis foi realizada por diferença de massa, conforme a Equação 1. O material livre de extrativos foi utilizado para determinar o teor de lignina.

$$Text (\%) = \frac{Ms - M_{s_{ext}}}{Ms} \times 100 \quad (1)$$

Em que:

Text = Teor de extrativo (%);

Ms = Massa seca (g);

M<sub>s<sub>ext</sub></sub> = Massa seca sem extrativo (g).

O teor de lignina insolúvel foi determinado pelo método de Klason modificado, conforme o procedimento proposto por Gomide e Demuner (1986). Cerca de 0,30 g de material seco e livre de extrativos foi inserido em um tubo de ensaio junto com a solução de ácido sulfúrico 72%. Em seguida, as amostras foram levadas ao banho maria a  $30 \pm 0,2$  °C por aproximadamente 1 hora, sob agitação constante. Após esse tempo, as misturas foram diluídas em água deionizada e transferidas para um recipiente de vidro, sendo esse totalmente fechado, com tampa de borracha e lacre de alumínio.

Posteriormente, os frascos foram inseridos em autoclave onde permaneceram sob temperatura de aproximadamente 118 °C por 1 hora. Após resfriadas, as misturas foram filtradas em cadinho de vidro com placa porosa, previamente preparado com uma camada de óxido de alumínio. A lignina inserida no cadinho foi lavada com água deionizada até completa remoção do ácido sulfúrico. Em seguida, os cadinhos foram levados à estufa a  $103 \pm 2$  °C até massa constante. O teor de lignina Klason foi obtido conforme a Equação 2.

$$\% L(ins) = \frac{Mr}{Ma} \times 100 \quad (2)$$

Em que: L (ins): Teor de lignina insolúvel (%);

Mr: Massa do resíduo (g);

Ma: Massa da amostra inicial (g).

O teor de lignina solúvel foi obtido conforme a metodologia sugerida por

Goldschmid (1971). O filtrado da lignina Klason foi diluído em água deionizada em um balão volumétrico de 250 mL, logo após foi obtida a leitura no espectrofotômetro de UV-Vis nos comprimentos de onda de 280 nm e 215 nm. A partir da Equação 3 foi determinado o teor de lignina solúvel. A lignina total é a soma da lignina insolúvel mais a lignina solúvel.

$$\text{Lignina solúvel (\%)} = \frac{(4,538 \times A_{215}) - A_{280}}{300 \times P} \times 100 \quad (3)$$

Em que:

$A_{215}$  = Absorbância obtida no comprimento de onda de 215 nm;

$A_{280}$  = absorbância obtida no comprimento de onda de 280 nm;

P = Massa seca da amostra (g).

O teor de holoceluloses foi determinado conforme a Equação 4.

$$\text{HOLO} = 100 - (\text{Tlig} + \text{Text} + \text{Tcz}) \quad (4)$$

Em que:

HOLO = Teor de holocelulose (%);

Tlig = Teor de lignina total (%);

Text = Teor de extrativos (%);

Tcz = Teor de cinzas (%).

#### 4.3.2 Análise química imediata

A umidade, o teor de materiais voláteis, o teor de cinzas e de carbono fixo do bagaço de malte e dos biocarvões foram quantificados pela análise imediata de acordo com a NBR 8112 (ABNT, 1986). O teor de carbono fixo foi quantificado por diferença de massa. Foram usadas frações de biomassa retidas entre 40-60 mesh após moagem e peneiramento.

#### 4.3.3 Análise elementar

Carbono, nitrogênio, hidrogênio, enxofre e oxigênio foram quantificados na análise elementar. O teor de oxigênio foi quantificado por diferença. As análises foram

realizadas em um analisador universal (Elemental, modelo Vario Micro Cube) utilizando amostras que passaram pela peneira de 200 mesh e ficaram retidas na peneira de 270 mesh. O analisador usa hélio e oxigênio como gás de entrada e gás de ignição, respectivamente. Amostras de 2 mg de bagaço de malte e biocarvão foram acondicionadas em cápsulas de estanho e completamente incineradas a 1200 °C.

#### 4.3.4 Análise termogravimétrica (TGA)

O comportamento e estabilidade térmica do bagaço de malte e dos biocarvões foram investigados por TGA em um analisador Shimadzu-DTG 60 H. Foram pesados 4 mg de amostra que passaram pela peneira de 200 mesh e ficaram retidos na peneira de 270 mesh. Esta análise foi realizada de 25 a 900 °C, com taxa de aquecimento de 10 °C min<sup>-1</sup> sob atmosfera de N<sub>2</sub> e vazão de 50 mL min<sup>-1</sup>.

#### 4.3.5 FTIR

Foram realizadas análises de espectroscopia vibracional no infravermelho, empregando um espectrômetro FT-IR Varian 600-IR com transformada de Fourier (FTIR), com acessório GladiATR da Pike Technologies acoplado para medidas por reflectância total atenuada (ATR) a 45° com cristal de seleneto de zinco. A faixa espectral analisada foi de 400 a 4.000 cm<sup>-1</sup>, resolução de 4 cm<sup>-1</sup> e 32 varreduras.

### 4.4 Caracterização do efluente

O esgoto sanitário foi proveniente da ETE-UFLA. Foram avaliadas as seguintes variáveis de qualidade: Carbono Orgânico Total (TOC), utilizando aparelho Shimadzu TOC<sub>5000</sub> com catalisador de sensibilidade normal; Demanda Química de Oxigênio (DQO), Demanda Biológica de Oxigênio (DBO), Sólidos Totais (ST), Sólidos Voláteis Totais (SVT) e Sólidos Suspensos Totais (SST), pelo método apresentado no *Standard Methods for the Examination Water and Wastewater* (APHA; AWWA; WEF, 2005); e o pH utilizando-se um medidor de pH digital.

Para a análise de TOC foram preparadas soluções em balões de 25 mL, utilizando água ultrapura (Milli-Q) e reagentes analíticos Shimadzu. Para o preparo dos padrões de Carbono Total (CT) foi utilizado ftalato ácido de potássio sem tratamento prévio. Os padrões de Carbono Inorgânico (CI) foram obtidos pela mistura de hidrogeno carbonato de sódio (44,25%) e carbonato de sódio (55,75%). Este último foi seco por 1h à

temperatura de 285 °C. O TOC é dado pela subtração de CT e CI. Para a determinação de carbono total, a amostra injetada é carreada para um tubo de combustão a 680 °C contendo platina suportada em alumina e sofre oxidação catalítica a CO<sub>2</sub>. Para a determinação de carbono inorgânico a amostra injetada reage com o ácido fosfórico 25%, sendo que todo carbono inorgânico é convertido a CO<sub>2</sub>. O CO<sub>2</sub> produzido, tanto na oxidação catalítica como proveniente de carbono inorgânico, é quantificado por absorção no infravermelho não dispersivo.

#### 4.5 Planejamento fatorial dos ensaios de adsorção

O planejamento fatorial é uma técnica de delineamento de experimentos que permite que as variáveis de interesse, que apresentam influências significativas na resposta do fenômeno estudado, sejam avaliadas conjunta e simultaneamente. A execução desse planejamento tem por finalidade suprir informações sobre o relacionamento de diferentes fatores, ou seja, explicitar quais são os efeitos de cada fator na resposta analisada e como eles se relacionam em nível de interação entre os fatores. Sendo assim, segundo Button (2016), o planejamento fatorial de experimentos é uma abordagem utilizada para montar e organizar um experimento, definindo a princípio quais são os fatores e os níveis de regulagens a fim de avaliar como estes fatores influenciam nas respostas do processo.

Ao ser definido um experimento fatorial onde os  $k$  fatores são representados por  $n$  níveis (valores de referência para teste e análise), o mesmo é conhecido como planejamento fatorial  $n^k$ . Os níveis de um fator são comumente denotados pelos sinais (+) alto e (-) baixo (MONTGOMERY & RUNGER, 2003). As principais vantagens do uso de planejamento fatorial são: redução do número de ensaios sem prejuízo da qualidade de informação, estudo simultâneo de diversas variáveis que influenciam em um processo com número reduzido de ensaios e elaboração de conclusões através de resultados qualitativos (BUTTON, 2016).

Para realização do tratamento por adsorção foram utilizados os seis biocarvões, como denominados na Tabela 3. Foram investigados dois fatores que influenciam o processo adsorptivo: a quantidade do adsorvente ( $m$ ) e a velocidade de agitação ( $A$ ). Dessa forma, foi realizado um planejamento fatorial  $2^2$  em triplicata. Os níveis (mínimo e máximo) das variáveis em estudo nesse planejamento foram: massa (0,3 e 0,9 g) e agitação (200 e 300 rpm), conforme Sobrinho et al. (2019).

A variável dependente ou resposta analisada foi a eficiência de remoção de TOC dada em porcentagem (Equação 6).

$$ER\% = \frac{TOCi - TOCf}{TOCi} * 100 \quad (6)$$

Em que:

ER% = Eficiência de Remoção de TOC (%);

TOCi (mg L<sup>-1</sup>) = Concentração de Carbono Orgânico Total inicial (esgoto bruto);

TOCf (mg L<sup>-1</sup>) = Concentração de Carbono Orgânico Total final (esgoto tratado).

Os níveis dos fatores foram codificados como -1 (baixo) e 1 (alto). A atribuição dos sinais aos níveis superiores (+) ou inferiores (-) foi feita de forma arbitrária e não interfere na realização dos experimentos ou interpretação dos resultados.

Os ensaios em batelada foram conduzidos na mesa agitadora Shaker, sendo retiradas alíquotas após duas horas para determinação de TOC. Foram preparados frascos de vidro de 50 mL contendo 30 mL de efluente com quantidades de material adsorvente, como indicado na Tabela 4.

Tabela 4 - Planejamento Fatorial Completo 2<sup>2</sup>.

Experimento	Agitação (A)	Massa (m)
1	-1	-1
2	1	-1
3	-1	1
4	1	1
Níveis		
<b>Fatores</b>	-1	1
<b>A (rpm)</b>	200	300
<b>m (g)</b>	0,3	0,9

FONTE: do autor, 2021

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.1 Caracterização química do bagaço de malte e dos biocarvões

Os resultados obtidos para a composição química do bagaço de malte são apresentados na Tabela 5. A lignina total é a soma da lignina insolúvel (Klason) e solúvel, enquanto o teor de holocelulose é a soma dos teores de celulose e hemiceluloses. Todos os teores foram calculados em base seca.

Observa-se que os extrativos totais foram elevados em relação a madeira. A presença de elevados teores de extrativos é uma característica vantajosa para a produção de energia, por causa do poder calorífico desses componentes (BUFALINO et al., 2012; CASTRO et al., 2013). Para Medeiros et al. (2014), a presença de extrativos em materiais lignocelulósicos é um ponto importante quando se almeja produzir carvão vegetal, pois eles aumentam a densidade do material lignocelulósico, favorecendo assim a produção de um carvão mais denso.

Tabela 5 - Valores médios da composição química do bagaço de malte.

<b>Composição química estrutural</b>	<b>Média</b>	<b>Desvio padrão</b>
Extrativos (%)	28,85	0,17
Lignina insolúvel (%)	11,53	0,38
Lignina total (%)	11,73	0,39
Holocelulose (%)	42,06	9,61
<b>Composição química elementar</b>	<b>Média</b>	<b>Desvio padrão</b>
Carbono (%)	48,30	0,20
Hidrogênio (%)	6,99	0,07
Nitrogênio (%)	5,39	0,09
Enxofre (%)	0,43	0,05
Oxigênio (%)*	35,32	0,29

\*Obtido por diferença (100% - %C - %H - %N - %S - % cinzas)

O teor de lignina encontrado (11,73%) foi inferior ao de Qin et al. (2018), com 19,57%, e ao de Massardi et al. (2020), com 20,80%. Essa diferença pode ser devida, principalmente, à diversidade de tipos de malte e receitas cervejeiras. No entanto, o teor de holocelulose (42,06%) foi similar ao encontrado na literatura (WILKINSON et al., 2014; QIN et al., 2018; MASSARDI et al., 2020).

No que se refere a análise elementar, os resultados obtidos para o bagaço de malte foram semelhantes aos encontrados por Ponte et al. (2019) para o bagaço de cana-de-açúcar (38,9% de oxigênio e 0,6% de enxofre), poda de cajueiro (44,2% de carbono e 5,9% de hidrogênio) e poda de mangueira (43,0% de carbono e 36,4% de oxigênio). De acordo com os dados da análise elementar, os elementos químicos predominantes foram carbono e oxigênio, os quais são os componentes majoritários da celulose, hemiceluloses e lignina. Com relação a composição imediata (Tabela 6), os tratamentos empregados no bagaço de malte apresentaram diferença entre si somente na variável umidade, indicando que a lavagem em água fria e em água quente não influenciou nos teores de materiais voláteis, cinzas e carbono fixo.

Segundo Obernberger e Thek (2004), é alta a quantidade de materiais voláteis nos combustíveis de biomassa, variando em geral entre 76 e 86 % (base seca), o que resulta em maior emissão de gases na combustão. Ainda assim, o resultado obtido para materiais voláteis do bagaço de malte foi abaixo do encontrado em outras biomassas, como a palha de milho (80,73%) (NAKASHIMA et al., 2014) e bagaço de sorgo (80,07%) (ORELLANA et al., 2020). Os resultados da análise podem ser empregados para prever a composição dos produtos da pirólise (AQSHA et al., 2017). O alto teor de material volátil, associado ao baixo teor de cinzas, favorece a conversão termoquímica.

Tabela 6 - Valores médios de umidade, materiais voláteis, cinzas e carbono fixo do bagaço de malte.

<b>Tratamento</b>	<b>Umidade (%)</b>	<b>Voláteis (%)</b>	<b>Cinzas (%)</b>	<b>Carbono fixo (%)</b>
BM-S	8,31 a	75,57 a	3,56 a	20,86 a
BM-F	7,51 c	76,39 a	3,59 a	20,01 a
BM-Q	7,83 b	76,37 a	3,73 a	19,89 a

BM-S: bagaço de malte sem lavagem; BM-F: bagaço de malte lavado em água fria; BM-Q: bagaço de malte lavado em água quente. Médias seguidas de mesma letra, nas colunas, não diferem entre si a 5% de probabilidade de erro pelo teste de Tukey.

O rendimento em biocarvão e o teor de materiais voláteis diminuíram com a elevação da temperatura de preparo do material (Tabela 7). A temperatura de pirólise é o mais importante parâmetro a se considerar no processo de produção do biocarvão. O teor de C fixo do biocarvão está diretamente relacionado ao aumento da temperatura final de pirólise, e o mesmo acontece com o teor de cinzas, ou seja, para uma mesma matéria-prima, quanto maior a temperatura de pirólise maior é o teor de cinzas produzido (TRAZZI et al., 2018), corroborando com os dados obtidos nesta pesquisa.

Tabela 7 - Valores médios de RGC (Rendimento Gravimétrico em Biocarvão), umidade, materiais voláteis, cinzas e carbono fixo dos biocarvões produzidos.

<b>Biocarvão</b>	<b>RGB (%)</b>	<b>Umidade (%)</b>	<b>Voláteis (%)</b>	<b>Cinzas (%)</b>	<b>C fixo (%)</b>
350-S	30,00 a	4,00 a	20,00 a	10,00 c	70,67 c
350-F	30,50 a	1,00 c	20,00 a	11,00 b	69,00 d
350-Q	30,50 a	1,00 c	20,00 a	10,00 c	69,33 d
500-S	27,00 b	3,00 b	11,00 c	12,00 a	77,67 a
500-F	25,99 b	3,00 b	11,00 c	12,33 a	77,00 ab
500-Q	27,33 b	3,00 b	12,67 b	11,00 b	76,33 b

Médias seguidas de mesma letra, nas colunas, não diferem entre si a 5% de probabilidade de erro pelo teste de Tukey.



Os teores de carbono fixo ficaram em torno de 77% nos biocarvões de 500 °C, valor similar à madeira de *Eucalyptus urograndis* (77,78%) estudada por Carmona et al. (2019) sob mesma temperatura. Os maiores teores de carbono fixo refletem em maior rendimento de utilização e os menores teores de cinzas refletem em menores desgastes e gastos com limpezas dos equipamentos utilizados no processo de carbonização (OLIVEIRA et al., 2012).

Os dados dos teores de C, H, N, S e O dos biocarvões estudados são apresentados na Tabela 8. São observadas diferenças estatísticas de C e O entre os biocarvões de 350 e 500 °C, não diferindo nos pré-tratamentos de lavagem realizados no material *in natura*. A proposta de certificação de biocarvões para países europeus e descritas no *European Biochar Certificate* – EBC (EBC, 2015), recomenda teores de C  $\geq$  50% e as normas propostas pelo *International Biochar Initiative* (IBI) (IBI, 2015) classifica os biocarvões em classes, sendo a classe 2 os biocarvões com teores de C  $\geq$  30% < 60% e classe 1 com teores de C  $\geq$  60%. Seguindo estes critérios, os 6 biocarvões deste estudo seriam considerados classe 1 pelo IBI e certificados pelo EBC.

Tabela 8 - Valores médios de carbono, hidrogênio, nitrogênio, enxofre e oxigênio dos biocarvões produzidos.

<b>Tratamento</b>	<b>C (%)</b>	<b>H (%)</b>	<b>N (%)</b>	<b>S (%)</b>	<b>O (%)*</b>
350-S	69,46 b	3,98 a	3,01 a	0,44 a	13,26 a
350-F	68,99 b	4,01 a	3,20 a	0,42 a	12,53 a
350-Q	68,89 b	3,87 a	3,27 a	0,42 a	13,30 a
500-S	75,57 a	3,03 a	3,00 a	0,40 a	6,23 b
500-F	75,68 a	3,01 a	3,00 a	0,39 a	5,40 b
500-Q	75,91 a	3,57 a	3,01 a	0,41 a	6,24 b

\* obtido por diferença (100% - %C - %H - %N - %S - % cinzas).(Médias seguidas de mesma letra, nas colunas, não diferem entre si a 5% de probabilidade de erro pelo teste de Tukey.

Biocarvões com teores de C abaixo de 60% já foram descritos pela literatura científica quando utilizados biocarvões de casca de banana e bagaço de laranja, por exemplo, utilizando temperaturas de 400 e 600 °C (FEITOSA et al., 2020). Conteúdos elevados de C como os apresentados pelos biocarvões de bagaço de malte indicam que provavelmente eles possuem maior recalcitrância, ou seja, maior resistência a degradação.

## 5.2 Análise termogravimétrica (TGA)

A análise termogravimétrica foi utilizada com o intuito de determinar de que forma o bagaço de malte tem sua degradação de acordo com o aumento da temperatura. Assim foi possível determinar em quais temperaturas, compostos como a lignina, as hemiceluloses e a celulose são degradadas, caracterizando o seu comportamento no processo de pirólise a ser realizado na produção dos biocarvões.

As curvas de TGA da Figura 4 apresentam a perda de massa referente a degradação térmica do bagaço de malte, sob atmosfera de nitrogênio, nos diferentes pré-tratamentos. Pode-se observar uma primeira perda de massa, de aproximadamente 10%, em temperatura entre 80 e 100 °C, referente a perda de umidade do material. O comportamento térmico de materiais lignocelulósicos *in natura* apresenta características semelhantes, visto que a composição é basicamente a mesma, celulose, lignina e hemiceluloses, variando apenas suas quantidades (CABEZA et al., 2015; REGO et al., 2019).

Alguns autores (ÓRFÃO et al., 1999; BRANCA & DI BLASI, 2003), estudando a cinética de degradação global da madeira, mostraram que existem três zonas principais de reação. A primeira consiste na degradação da fração mais reativa das hemiceluloses e ocorre em temperaturas mais baixas (< 250 °C). Na segunda zona (250 – 300 °C), ocorre a degradação principalmente de celulose, parte da lignina e o restante das hemiceluloses, considerando-se que as hemiceluloses reagem completamente durante o período de pré-aquecimento dessa fase. A terceira (> 300 °C), que ocorre nas temperaturas mais elevadas, corresponde à degradação de lignina e pequenas frações de celulose ainda restante, sendo a lignina dominante em altas conversões.

Observa-se que a porcentagem de perda de massa é pequena até aproximadamente 200 °C, e apenas a partir de 240 °C inicia-se uma perda significativa. Entre 240 e 540 °C ocorre a degradação de aproximadamente 70% da massa do bagaço de malte, decorrente das várias reações envolvidas no processo de degradação térmica das hemiceluloses, da celulose e da lignina. A lignina é termicamente mais resistente que os carboidratos da biomassa e sua degradação térmica ocorre numa faixa bem ampla que vai de 200 até temperaturas maiores que 400 °C (ALVES et al., 2009). Acima de 700 °C não foi observado perda de massa significativa, sobrando aproximadamente 15% de resíduo que incluem cinzas e parte do carbono fixo. Não foram observadas diferenças significativas nas curvas das três amostras analisadas, indicando que os pré-tratamentos

de lavagem do bagaço de malte com água fria, ou com água quente, têm pouca influência no comportamento térmico do material.

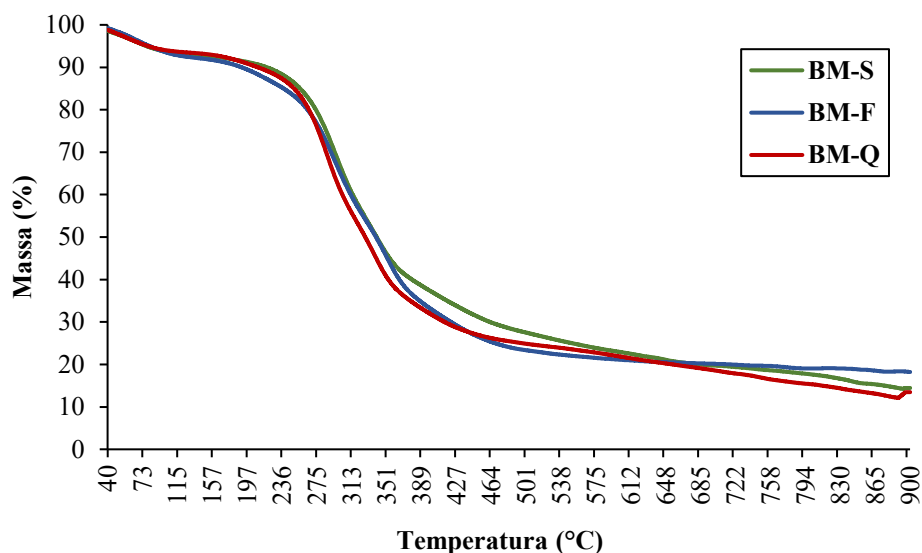


Figura 4 – Curva termogravimétrica do bagaço de malte sem lavagem (BM-S), lavado em água fria (BM-F) e lavado em água quente (BM-Q) sob atmosfera de  $N_2$  e vazão de  $50 \text{ mL min}^{-1}$ .

Utilizando-se os mesmos parâmetros de vazão de nitrogênio, taxa de aquecimento e massa de amostra na análise termogravimétrica dos biocarvões produzidos (Figuras 5 e 6), é possível verificar que os biocarvões são mais estáveis termicamente e sofrem menor perda de massa se comparados ao bagaço de malte.

Os biocarvões obtidos a  $350 \text{ }^\circ\text{C}$  (Figura 5: 350-S, 350-F e 350-Q) perderam cerca de 8% de massa até a temperatura de  $540 \text{ }^\circ\text{C}$ . De  $540$  a  $900 \text{ }^\circ\text{C}$  os biocarvões 350-S e 350-Q perdem mais 16% de massa, restando 76% de resíduo. Já o biocarvão 350-F perde mais 24% de massa nesse mesmo intervalo de temperatura, ficando com 68% de resíduo.

Na Figura 6 (biocarvões: 500-S, 500-F e 500-Q) observa-se que houve aproximadamente 7% de perda de massa até a temperatura de  $650 \text{ }^\circ\text{C}$ . De  $650$  a  $900 \text{ }^\circ\text{C}$  a perda de massa foi de mais 9%, restando 84% de resíduo para os três biocarvões produzidos.

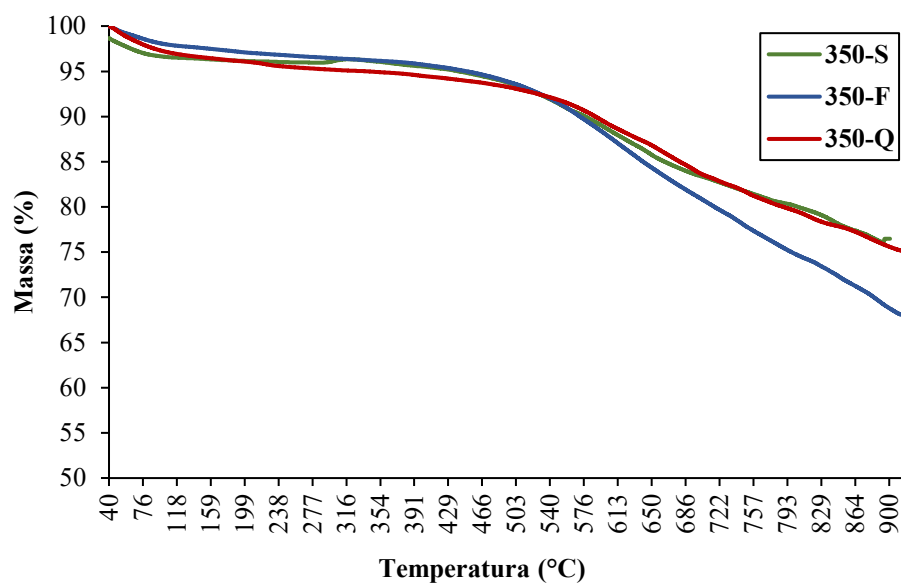


Figura 5 – Curvas termogravimétricas dos biocarvões produzidos a 350°C, sem lavagem (350-S), lavado em água fria (350-F) e lavado em água quente (350-Q) sob atmosfera de N<sub>2</sub> e vazão de 50 mL min<sup>-1</sup>.

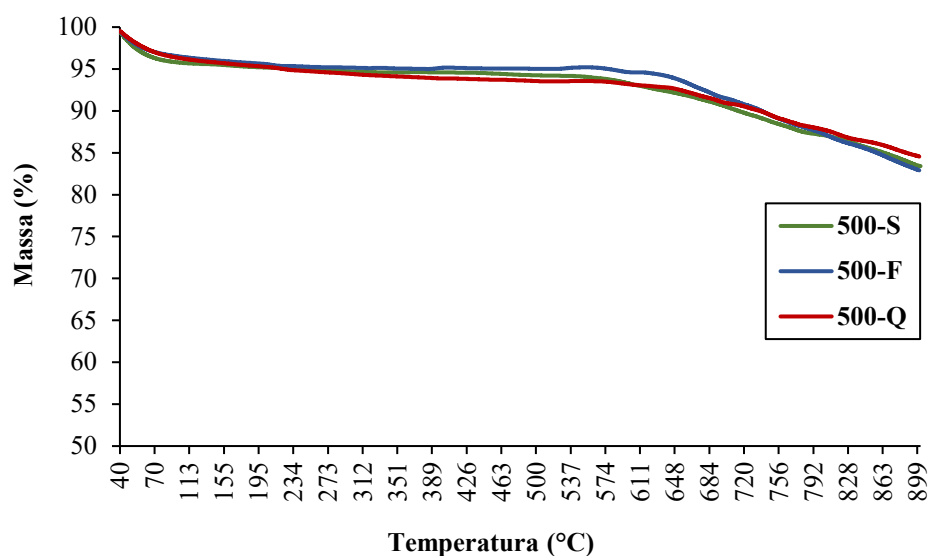


Figura 6 – Curvas termogravimétricas dos biocarvões produzidos a 500 °C, sem lavagem (500-S), lavado em água fria (500-F) e lavado em água quente (500-Q) sob atmosfera de N<sub>2</sub> e vazão de 50 mL min<sup>-1</sup>.

### 5.3 FTIR

Os grupos funcionais de superfície do bagaço de malte e das amostras de biocarvões produzidos foram qualitativamente identificados utilizando-se a análise de espectroscopia de infravermelho com a transformada de Fourier. Os espectros estão

apresentados nas Figuras 7, 8 e 9.

Na Figura 7 observa-se uma banda larga em  $3300\text{ cm}^{-1}$ , associados a grupos OH ligados intermolecularmente, podendo ser provenientes de umidade e das várias estruturas de carboidratos presentes no bagaço de malte. As bandas em  $2900$  e  $2850\text{ cm}^{-1}$  podem ser atribuídas a C-H de aromáticos (lignina), C-H de alifáticos (lipídeos e proteínas) e C-H de aldeídos (carboidratos). Atribui-se a banda em  $1784\text{ cm}^{-1}$  a C=O de grupos carboxílicos ácidos, contidos nas proteínas e lipídeos e carbonilas da lignina. A banda em  $1640$  pode ser atribuída a C=C de aromáticos. Em aproximadamente  $1020\text{ cm}^{-1}$  tem-se a banda associada à ligação C-O de éteres e ésteres da lignina e dos álcoois dos carboidratos.

Os biocarvões produzidos a  $350\text{ }^{\circ}\text{C}$  e  $500\text{ }^{\circ}\text{C}$  apresentaram bandas semelhantes (Figuras 8 e 9). As principais bandas encontradas são: aproximadamente  $1100\text{ cm}^{-1}$  associada à ligação C-O de éteres e ésteres da lignina e dos álcoois dos carboidratos;  $1560\text{ cm}^{-1}$  atribuída a C=C de aromáticos.

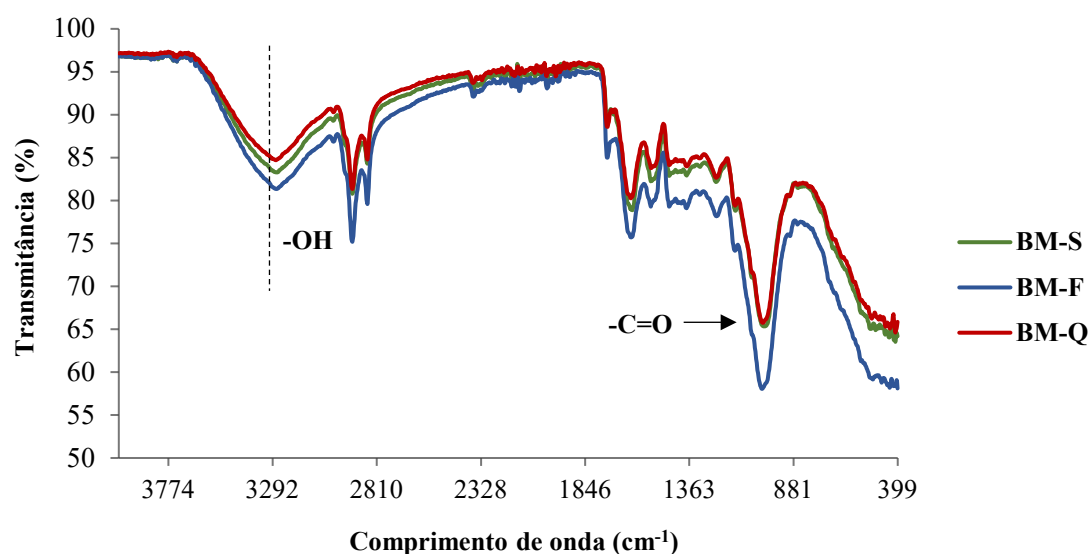


Figura 7 - Espectros de FT-IR do bagaço de malte sem lavagem (BM-S), bagaço de malte lavado em água fria (BM-F) e lavado em água quente (BM-Q).

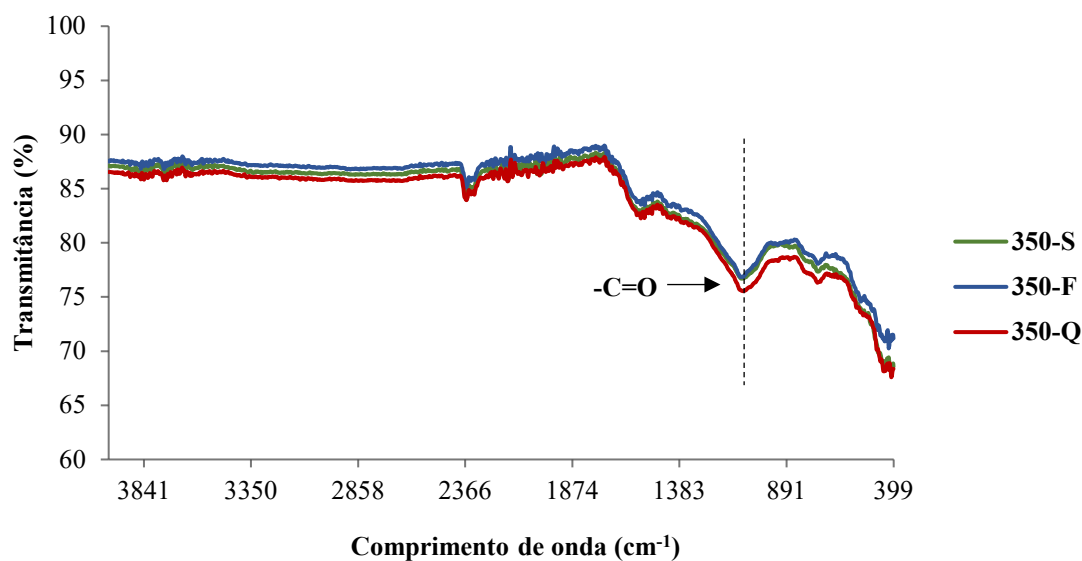


Figura 8 - Espectros de FT-IR dos biocarvões produzidos a 350 °C.

Ao comparar os espectros entre o bagaço de malte e os biocarvões, verifica-se que após a etapa de pirólise, algumas bandas que estavam presentes no espectro do material *in natura* desapareceram. Este comportamento ocorre devido à remoção ou desidratação de materiais voláteis e a quebra de ligações químicas durante a etapa de pirólise, além da aromatização do material.

O desaparecimento da banda a cerca de 2900  $\text{cm}^{-1}$  em particular, evidencia a remoção de hidrogênio. A liberação do material volátil durante a pirólise é essencial para a criação de mais poros no biocarvão (TRAZZI et al., 2018).

As bandas em torno de 3300  $\text{cm}^{-1}$  correspondem à presença de grupo OH resultante de ligações diméricas e da associação polimérica, sendo que a intensidade da banda depende da concentração.

É possível notar ainda que os pré-tratamentos de lavagem do material *in natura* não tiveram influência nos tipos de grupos funcionais presentes nos materiais. Ou seja, esse tipo de tratamento não mostrou-se eficaz para aumentar os tipos de grupos funcionais disponíveis nos adsorventes.

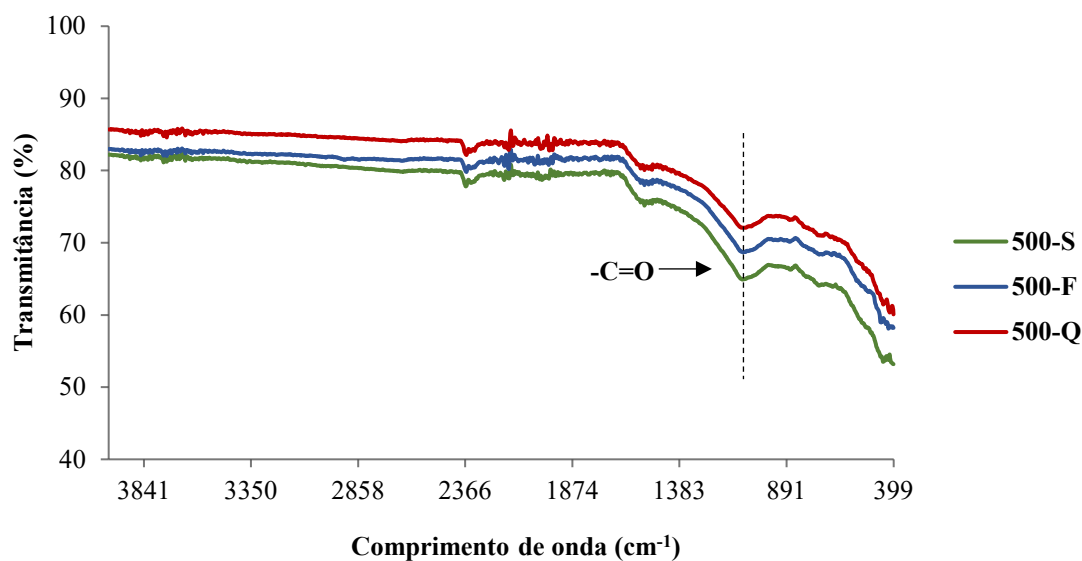


Figura 9 - Espectros de FT-IR dos biocarvões produzidos em 500 °C.

#### 5.4 Caracterização do efluente

Na Tabela 9 são apresentadas algumas características físico-químicas do esgoto sanitário da UFLA obtidas no mês de novembro de 2020. Os valores obtidos para DQO, DBO e sólidos são consideravelmente inferiores aos reportados na literatura (item 3.1), além de apresentar pH neutro, e isso se deve principalmente ao acesso limitado da instituição em período de pandemia, visto que a concentração do esgoto bruto pode variar de acordo com a contribuição per capita do poluente, o consumo per capita de água, a presença de despejos industriais, entre outros fatores específicos de cada local.

Tabela 9 - Dados de caracterização do esgoto sanitário da ETE-UFLA a partir de amostras retiradas na última semana de novembro de 2020.

Variável	Valor médio
TOC (mg/L)	26,84
DQO (mg/L)	61,90
DBO (mg/L)	5,71
pH	7,04
ST (mg/L)	211,67
STF (mg/L)	131,67
STV (mg/L)	80,00

De acordo com Moraes et al. (2020), as concentrações de sólidos na água são afetadas por todos os contaminantes presentes, com exceção dos gases dissolvidos; a fração dissolvida (sólidos totais - ST, sólidos totais voláteis - STV, sólidos totais fixos -

STF) influencia na demanda química de oxigênio (DQO), demanda biológica de oxigênio (DBO), condutividade elétrica e cor real das águas residuárias.

Para aperfeiçoar o estado da arte sobre processos biológicos aeróbios no tratamento de águas residuárias agroindustriais, além da caracterização, é de extrema importância a obtenção da taxa de remoção da matéria orgânica (MORAIS et al., 2020). Tal parâmetro poderá ser utilizado para diminuir o valor do tempo de ciclo ou de detenção hidráulica dos reatores aeróbios, assim como auxiliar em estudos sobre a capacidade de autodepuração dos corpos aquáticos.

## 5.5 Ensaios de adsorção

Na Tabela 10 encontram-se os dados obtidos por meio dos ensaios de adsorção em relação a eficiência de remoção de TOC do esgoto sanitário da ETE/UFLA. Obteve-se a partir de então a análise de variância, teste de Tukey e gráfico de regressão do fator principal para os seis adsorventes em estudo.

Pode-se observar que as melhores condições de adsorção em biocarvão de bagaço de malte resultaram em uma remoção de aproximadamente 38% de TOC. Esse número representa um indicativo de aplicabilidade dos biocarvões de bagaço de malte, visto que trabalhos como de Wu et al. (2004) relatam que a remoção de TOC é limitada em efluentes. Os autores conseguiram remoção de apenas 15% de TOC em lixiviado de aterro sanitário. Teixeira (2014) ao avaliar remoção de carbono orgânico dissolvido, que está correlacionado positivamente com o TOC, de águas de abastecimento por adsorção em carvão ativado granular, obteve valores negativos de adsorção. Dessa forma, a autora concluiu que a utilidade do uso do carbono orgânico dissolvido (COD) como parâmetro de avaliação da adsorção em colunas de carvão ativado granular é limitada, uma vez que muitos compostos que contribuem para o COD não são passíveis de adsorção.

No entanto, existem pesquisas que conseguem alcançar ótimos resultados de eficiência de remoção de TOC, como a feita por Hinojosa (2014) que, ao avaliar a remoção de matéria orgânica de efluente kraft por adsorção usando carvão ativado de casca de coco, obteve 98% de remoção de TOC dentro das melhores atribuições de massa de adsorvente, pH e temperatura do efluente. Nesse sentido, mostra-se necessário estudos que avaliem esses parâmetros no processo adsorptivo com biocarvões e/ou carvões ativados produzidos a partir de diferentes resíduos agroindustriais.



Tabela 10 - Quantidade de TOC removida, em porcentagem, para cada tratamento em cada ensaio de adsorção.

Experimento	Fatores		Eficiência de remoção de TOC (%)					
	m	RPM	350-S	350-F	350-Q	500-S	500-F	500-Q
1	-1	-1	17,25	1,94	18,74	19,19	14,34	10,92
2	1	-1	28,28	15,61	38,00	38,45	19,67	17,70
3	-1	1	21,46	15,46	18,41	25,78	14,01	13,90
4	1	1	35,73	21,46	33,98	25,30	31,89	25,04

O fator mais relevante no processo de remoção de TOC do esgoto sanitário através de adsorção, de acordo com os dados expostos na Tabela 11, foi a massa de adsorvente, visto que possui diferença significativa, enquanto que a velocidade de agitação (dada em rpm) apresentou médias de remoção de TOC estatisticamente iguais. Esse fato foi verificado para os seis adsorventes estudados.

Tabela 11 - Valores médios de remoção de TOC dentro de cada fator avaliado.

Fatores	Média remoção de TOC (%)	
Massa	0,3 g	15,95 b
	0,9 g	27,59 a
RPM	200	20,01 a
	300	20,53 a
Massa x RPM*	1	20,99 a
	2	15,33 b
Tratamento	350-S	25,68 a
	350-F	13,62 b
	350-Q	27,28 a
	500-S	27,18 a
	500-F	19,98 ab
	500-Q	16,89 ab

Médias seguidas de mesma letra, nas colunas, não diferem entre si a 5% de probabilidade de erro pelo teste de Tukey. \* Desdobramento de massa dentro de cada nível de RPM: 1 = 200 e 2 = 300.

## 6 CONCLUSÕES

O presente estudo, cumprindo com os objetivos propostos, desenvolveu os biocarvões a partir de uma fonte alternativa e de baixo custo que é o resíduo da indústria cervejeira, o bagaço de malte.

As análises de caracterização deste material demonstraram que além da sua grande disponibilidade ao longo de todo o ano e o seu baixo custo, ele apresenta características desejáveis para um material precursor, dentre as quais se verificaram: o alto teor de carbono fixo (por volta de 20%), implicando em um maior rendimento da produção de biocarvão; teor elevado de extrativos (29%).

Os biocarvões produzidos a partir do bagaço de malte possuem composição química favorável para serem utilizados como adsorventes alternativos. Além disso, os pré-tratamentos de lavagem do material não alteraram as características químicas dos biocarvões.

A partir dos ensaios de adsorção em batelada, foi possível comparar o desempenho dos biocarvões produzidos como adsorventes alternativos na remoção de Carbono Orgânico Total de esgoto sanitário, destacando-se os biocarvões 500-S e 350-Q que obtiveram maior eficiência de remoção nos parâmetros de maior massa de adsorvente e menor velocidade de agitação.

Com base na análise do experimento fatorial, pôde-se inferir que para os seis adsorventes analisados, os resultados dos ensaios de adsorção indicaram que o fator que mais interferiu no processo de remoção de TOC do esgoto sanitário através de processo de adsorção foi a massa do adsorvente.

Recomenda-se para trabalhos futuros:

- Testar mais temperaturas finais de carbonização para a produção de biocarvões de bagaço de malte;
- Testar maiores níveis dentro do fator massa de adsorvente, além de testar outros aspectos no processo adsorvente como pH, temperatura e concentração inicial de TOC;
- Caracterização mais abrangente dos esgotos bruto e tratado para a verificação das condições para o tratamento subsequente;
- Análise dos adsorventes após o tratamento para verificação da possibilidade de descarte e destino final desses materiais.

## 7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ADIB, M.; AL-QODAH, Z.; NGAH, C. W. Z. Agricultural bio-waste materials as potential sustainable precursors used for activated. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 46, n. 218, 2015.

ALAM, M. M.; HOSSAIN, M. A.; HOSSAIN, M. D.; JOHIR, M. A. H.; HOSSAIN, J.; RAHMAN, M. S.; ZHOU, J. L.; HASAN, A. T. M. K.; KARMAKAR, A. K.; AHMED, M. B. The potentiality of rice husk-derived activated carbon: From synthesis to application. **Processes**, 8(2), 2020.

ALVES, A.; GIERLINGER, N.; SCHWANNINGER, M.; RODRIGUES, J. Analytical pyrolysis as a direct method to determine the lignin content in wood Part 3 - Evaluation of species-specific and tissue-specific differences in softwood lignin composition using principal component analysis. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, n. 85, p. 30-37, 2009.

APHA/AWWA/WEF. EATON, A. D. et al. Standard methods for the examination of water and wastewater. 21<sup>a</sup> ed. Washington: American Public Health Association. 1082 p, 2005.

APLIN, A. J.; FEITZ, T. D.; WAITE, W. A T. **SCI. Technol.**, v. 44, n. 23, 2001.

AQSHA, A.; MOHAMMEDRAMADAN, M.; MOGHTADERI, B.; MAHINPEY, N. Catalytic pyrolysis of straw biomasses (wheat, flax, oat and barley) and the comparison of their product yields. **J. Anal. Appl. Pyrolysis**, v. 125, p. 201-208, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 8112: carvão vegetal: análise imediata. Rio de Janeiro, 1986.

AQUARONE, E.; BORZANI W.; SCHMIDELL W.; LIMA; A. U. *Biotechnology Industrial*. 4 ed. São Paulo: Edgard Blücher, p. 91-143, 2001.

BOEHM, H.P. Some aspects of the surface chemistry of carbon blacks and other carbons. **Carbon**, 32, p. 759-769, 1994.

BRANCA, C.; DI BLASI, C. D. Kinetics of the isothermal degradation of wood in the temperature range 528-708 K. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, v. 67, p. 207-219, 2003.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Conselho Nacional do Meio Ambiente - CONAMA. **Resolução nº 430 de 13/05/2011 (Federal)** - 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 do Meio Ambiente - CONAMA. 2011.

BUFALINO, L.; PROTÁSIO, T. P.; COUTO, A. M.; NASSUR, O. A. C.; SÁ, V. A.; TRUGILHO, P. F. Caracterização química e energética para aproveitamento da madeira de costaneira e desbaste de cedro australiano. **Brazilian Journal of Forestry Research**, 32(70): 129-137, 2012.

BUTTON, Sérgio T. Metodologia para planejamento experimental e análise de resultados. Apostila. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, FEM/UNICAMP -Universidade Estadual de Campinas. Campinas, 2016.

CABEZA, A. et al. Autocatalytic kinetic model for thermogravimetric analysis and composition estimation of biomass and polymeric fractions. **Fuel**, v. 148, p. 212–225, 2015.

CARMONA, I. N.; SAMPAIO, J. da S.; COELHO, S. R. de S.; MOUTINHO, V. H. P.; ANDRADE, F. W. C. Caracterização energética do carvão vegetal de *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis* plantados no oeste do Pará. **Revista Agroecossistemas**, v. 11, n. 2, 2019.

CASTRO, A. F. N. M.; CASTRO, R. V. O.; CARNEIRO, A. C. O.; LIMA, J. E.; SANTOS, R. C.; PEREIRA, B. L. C. Análise multivariada para seleção de clones de eucalipto destinados à produção de carvão vegetal. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, 48(6): 627-635, 2013.

CERVBRASIL - Associação Brasileira da Indústria da Cerveja. **Mercado cervejeiro**. Disponível em: <<http://www.cervbrasil.org.br/>>. Acesso em: 28/04/2019.

CERVIERI, O., JR. (2017). Panoramas setoriais 2030: Bebidas. Panoramas Setoriais 2030: Desafios e oportunidades para o Brasil (pp. 69-78). Rio de Janeiro, RJ: Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social.

CHEN, B., CHEN, Z. Sorption of naphthalene and 1-naphthol by biochars of orange peels with different pyrolytic temperatures. **Chemosphere**, v. 76(1), p. 127–133, 2009.

CHEN., N.; et al. Epidemiological and clinical characteristics of 99 cases of 2019 novel coronavirus pneumonia in Wuhan, China: a descriptive study. **The Lancet**, v. 395, n. 10223, p. 507-513, 2020.

CORREA-NAVARRO, Y. M., GIRALDO, L., MORENO-PIRAJÁN, J. C. Biochar from fique bagasse for remotion of caffeine and diclofenac from aqueous solution. **Molecules**, v. 25(8), p. 1-17, 2020.

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(9), p. 14059-14073, 2019.

DE ROZARI, P., GREENWAY, M., EL HANANDEH, A. An investigation into the effectiveness of sand media amended with biochar to remove BOD<sub>5</sub>, suspended solids and coliforms using wetland mesocosms. **Water Sci. Technol**, v. 71 (10), p. 1536–1544, 2015.

DOBRZANSKI, J.; DIAS, L. F.; AYALA, L. A. C. Caracterização e utilização do bagaço de cerveja em panificação. Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR: ISSN: 1981-366X, Ponta Grossa, 2008.

DOS SANTOS, ELBA GOMES; DE ALSINA, ODELSIA LEONOR SANCHEZ; DA SILVA, FLÁVIO LUIZ HONORATO. Desempenho de biomassas na adsorção de hidrocarbonetos leves em efluentes aquosos. **Química nova**, v. 30, n. 2, p. 327, 2007.

EBC - European Biochar Certificate, Guidelines for a Sustainable Production of biochar. Version 6.3E, 2015.

FEITOSA, A. A.; TEIXEIRA, W. G.; RITTER, E.; RESENDE, F. A.; KERN, J. Characterization of biochar samples of banana peels and orange bagasse carbonized at 400 and 600 °C. **Revista Virtual de Química**, 12(4), 901–912, 2020.

FERREIRA, P. P. L., BRAGA, R. M., TEODORO, N. M. A., MELO, V. R. M., MELO, D. M. A., MELO, M. A. F. Adsorção de Cu (II) e Cr (III) em efluentes líquidos utilizando a cinza do bagaço da cana-de-açúcar. **Cerâmica**, São Paulo, v. 61(360), 2015.

FERREIRA, L. A. (2018). Utilização do bagaço de cana-de-açúcar como adsorvente dos íons Cd(II), Cr(III) e Pb(II). Instituto Municipal de Ensino Superior de Assis – IMESA, 54, Assis, 2018.

FIGUEREDO, N. A., COSTA, L. M., 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**, Fortaleza, v. 48(3), 2017.

FONTANA, K. B.; CHAVES, E. S.; SANCHEZ, J. D. S.; WATANABE, E. R. L. R.; PIETROBELLI, J. M. T. A. LENZI, G. G. Textile dye removal from aqueous solutions by malt bagasse: isotherm, kinetic and thermodynamic studies. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, v. 124, p. 329-336, 2016.

FRANCISKI, M. A.; PERES, E. C.; GODINHO, M.; PERONDI, D.; FOLETTTO, E. L.; COLLAZZO, G. C.; DOTTO, G. L. Development of CO<sub>2</sub> activated biochar from solid wastes of a beer industry and its application for methylene blue adsorption. **Waste Management**, v. 78, p. 630-638, 2018.

GOLDSCHMID, O. Ultraviolet spectra. In: SARKANEN, K.V.; LUDWIG, C.H. (Eds). **Lignins**. New York: Wiley-Interscience, p.241-266, 1971.

GOMIDE, J.L.; DEMUNER, B.J. Determinação do teor de lignina em material lenhoso: Método Klason modificado. **O Papel**, v.47, n.8 p.36-38, 1986.

HINOJOSA, L. (2014). Remoção de matéria orgânica e cor de efluente kraft por adsorção usando carvão ativado e argila (dissertação de mestrado). 2014.

HONORATO, A. C., MACHADO, J. M., CELANTE, G., BORGES, W. G., DRAGUNSKI, D. C., CAETANO, J. Biossorção de azul de metileno utilizando resíduos agroindustriais. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 19, n. 7, p. 705-710, 2015.

HOSSAIN, M. K. et al. Influence of pyrolysis temperature on production and nutrient properties of wastewater sludge biochar. **Journal of Environmental Management**, New York, v. 92, n. 1, p. 223-228, 2011.

IBI (2015). Standardized product definition and product testing guidelines for biochar that is used in soil. v. 2.1. International Biochar Initiative. Disponível em: <<https://biochar-international.org/characterizationstandard/>>. Acesso em: 18/08/2020.

JUCHEN, P. T. *et al.* Biosorption of reactive blue BF-5G dye by malt bagasse: Kinetic and equilibrium studies. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, v. 6, n. 6, p. 7111–7118, 2018.

JUNG, C.; PHAL, N.; OH, J.; CHU, K. H.; JANG, M.; YOON, Y. Removal of humic and tannic acids by adsorption-coagulation combined systems with activated biochar. **Journal of Hazardous Materials**, 300, 808–814, 2015.

KNAPIK, H. G.; FERNANDES, C. V. S.; AZEVEDO, J. Modelagem de carbono orgânico em rios urbanos: aplicabilidade para o planejamento e gestão de qualidade de água. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, 21(4):841-854, 2016.

KIZITO, S.; LV, T.; WU, S.; AJMAL, Z.; LUO, H.; DONG, R. Treatment of anaerobic digested effluent in biochar-packed vertical flow constructed wetland columns: Role of media and tidal operation. **Science of the Total Environment**, 592, p. 197–205, 2017.

KYZAS, G.Z.; DELIYANNI, E.A.; MATIS, K.A. Activated carbons produced by pyrolysis of waste potato peels: Cobalt ions removal by adsorption. **Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects**, v. 490, p. 74-83, 2016.

LEE, D. J.; CHENG, Y. L.; WONG, R. J.; WANG, X. D. Adsorption removal of natural organic matters in waters using biochar. **Bioresource Technology**, 260, 413–416, 2018.

LEHMANN, J.; DA SILVA JR, J.P.; RONDON, M.; CRAVO, M.S.; GREENWOOD, J.; NEHLS, T.; STEINER, C. GLASER, B. Slash-and-char – a feasible alternative for soil fertility management in the central Amazon. Proceedings of the 17th World Congress of Soil Science, (pp. 1–12) Bangkok Thailand, 2001.

LUSTOSA FILHO, J.F.L.; PENIDO, E.S.; CASTRO, P.P.; SILVA, C.A.; MELO, L.C.A. Co-Pyrolysis of poultry litter and phosphate and magnesium generates alternative slow-release fertilizer suitable for tropical soils ACS Sustain. **Chem. Eng.**, 5, pp. 9043-9052, 2017.

LYNCH, K. M.; STEFFEN, E. J.; ARENDT, E. K. (2016). Brewers' spent grain: a review with an emphasis on food and health. Vol. 122, p. 553-568, 2016.

MACHADO, L. M. M.; LÜTKE, S. F.; PERONDI, D.; GODINHO, M.; OLIVEIRA, M. L. S.; COLLAZZO, G. C.; DOTTO, G. L. Simultaneous production of mesoporous biochar and palmitic acid by pyrolysis of brewing industry wastes. **Waste Management**, v. 113, p. 96-104, 2020.

MANOLIKAKI, I., DIAMADOPOULOS, E. Agronomic potential of biochar prepared from brewery byproducts. **Journal of Environmental Management**, 255, 2020.

MARCUSSO, E. F., MÜLLER, C. V. (2019). Anuário da cerveja no Brasil 2018: Crescimento e inovação. Disponível em: <<http://www.agricultura.gov.br/assuntos/inspecao/produtos-vegetal/pasta-publicacoes-DIPOV/anuario-da-cerveja-no-brasil-2018/view>>. Acesso em: 13/08/2020.

MASSARDI, M. M.; MASSINI, R. M. M.; SILVA, D. DE J. Caracterização Química Do Bagaço De Malte E Avaliação Do Seu Potencial Para Obtenção De Produtos De Valor Agregado. **The Journal of Engineering and Exact Sciences**, 6(1), 0083–0091, 2020.

MEDEIROS, P. N. NO; OLIVEIRA, L.; PAES, J. B. Relações entre as características da madeira e do carvão vegetal de duas Espécies da Caatinga. **Floresta e Ambiente**, 21(4): 484-493, 2014.

MELO, A. R.; MARQUES, C. R. M.; BORTOLATTO, L. B.; CAMPOS, D. DE P.; JUNKES, S. L. Aplicação do bagaço de malte na biossorção do corante azul de efluente de lavanderia têxtil. **FTT Journal of Engineering and Business**, 4, 38–52, 2019.



MENYA, E.; OLUPOT, P. W.; STORZ, H.; LUBWAMA, M.; KIROS, Y. Production and performance of activated carbon from rice husks for removal of natural organic matter from water: A review. **Chemical Engineering Research and Design**, 129, 271–296, 2018.

METCALF, E.; EDDY, M. (2016). Tratamento de efluentes e recuperação de recursos. 5ª ed. Porto Alegre: AMGH, 2016.

MONTGOMERY, Douglas C.; RUNGER, George C. Estatística aplicada e probabilidade para engenheiros. 2 ed. Rio de Janeiro: LTC, 2003.

MORAIS, N. W. S.; COELHO, M. M. H.; SILVA, F. S. S.; PEREIRA, E. L.; SANTOS, A. B. DOS. Physical-chemical characterization and determination of aerobic kinetic coefficients for the removal of organic matter from agro-industrial wastewater. **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, 25(3), 489–500, 2020.

MUSSATTO, S. I.; DRAGONE, G.; ROBERTO, I. C. Brewers' spent grain: generation, characteristics and potential applications. **J. Cereal Sci.**, 43 (1): 1-14, 2006.

MUSSATTO, S. I. Brewer's spent grain: a valuable feedstock for industrial applications. **J. Sci. Food Agric.**, 94: 1264-1275, 2013.

NAKASHIMA, G.T.; MARTINS, M.P.; SILVA, D.A da.; CHRISOSTOMO, W.; YAMAJI, F.M. Aproveitamento de resíduos vegetais para a produção de briquetes. **Revista Brasileira de Ciências Ambientais (Online)**, n.34, p.22-29, 2014.

NOGUEIRA, M. R. A.; SILVA, A. G. Trovó, **Sol. Energy**, v. 79, n. 384, 2005.

NUNES, C. A.; GUERREIRO, M. C. Estimation of surface area and pore volume of activated carbons by methylene blue and iodine numbers. **Quimica Nova**, São Paulo, v. 34, n. 3, p. 472–476, Jan. 2011.

NUVOLARI, Ariovaldo. Esgoto Sanitário: coleta, transporte, tratamento e reúso agrícola. São Paulo: Blucher, 536 p., 2003.

OLESZCZUK, P. et al. Activated carbon and biochar amendments decrease pore-water concentrations of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in sewage sludge. **Bioresource Technology**, Essex, v. 111, p. 84-91, 2012.

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, A. C.; ROCHA, M. F. V.; PEREIRA, B. L. C.; CARNEIRO, A. C. O.; CARVALHO, A. M. M. L.; VITAL, B. R. Avaliação de diferentes níveis de desbaste nas propriedades da madeira e do carvão vegetal de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla*. **Floresta**, Curitiba, v. 42, n. 1, p. 59-68, 2012.

ORELLANA, B. B. M. A.; VALE, A. T. DO; ORELLANA, J. B. P.; CHAVES, B. S.; MOREIRA, A. C. DE O. Caracterização de resíduos agroindustriais da região do distrito federal para fins energéticos. **Energia Na Agricultura**, 35(1), 46–61, 2020.

ÓRFÃO, J. J. M.; ANTUNES, F. J. A.; FIGUEIREDO, J. L. Pyrolysis kinetics of lignocellulosic materials – three independent reactions model. **Fuel**, v. 78, p. 349-358, 1999.

PARTLAN, E.; REN, Y.; APUL, O. G.; LADNER, D. A.; KARANFIL, T. Adsorption kinetics of synthetic organic contaminants onto superfine powdered activated carbon. **Chemosphere**, 253, 2020.

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. Santa Maria: UFSM, 2002.

PLIEGO-ARREAGA, R.; REGALADO, C.; AMARO-REYES, A.; GARCÍA-ALMENDÁREZ, B. E. Revista Mexicana de Ingeniería Química. **Revista Mexicana de Ingeniería Química**, 12(3), 505–511, 2013.

PONTE, M. R.; GADELHA, A. M. T.; MACHADO, Y. de L.; LOPES, A. M. S.; MALVEIRA, J. Q. et al. Blendas de bagaço de cana-de-açúcar, podas de mangueira e cajueiro: caracterização das propriedades e investigação de seus potenciais energéticos. **Revista Matéria**, v. 24, n. 2, 2019.

PROMRAKSA, A., RAKMAK, N. Biochar production from palm oil mill residues and application of the biochar to adsorb carbon dioxide. **Heliyon**, v. 6(5), 2020.

QIAN, K.; KUMAR, A.; ZHANG, H.; BELLMER, D.; HUHNKE, R. Recent advances in utilization of biochar. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 42, n. 1055, 2015.

QIN, F.; JOHANSEN, A. Z.; MUSSATO, S.I. Evaluation of different pretreatment strategies for protein extraction from brewer's spent grain. **Industrial Crops and Products**, v. 125, n. June, p. 443-453, 2018.

REINOLD, Matthias R. Manual Prático de Cervejaria. 1.ed. São Paulo: Aden, 1997.

REGO, F. et al. Fast determination of lignocellulosic composition of poplar biomass by thermogravimetry. **Biomass and Bioenergy**, v. 122, p. 375–380, 2019.

ROCHA, O. D., NASCIMENTO, G. D., CAMPOS, N. F., SILVA, V. D., DUARTE, M. M. B. Avaliação do processo adsorptivo utilizando mesocarpo de coco verde para remoção do corante cinza reativo BF-2R. **Química nova**, v. 35, n. 7, p. 1369-1374, 2012.

ROCHA, R. S.; REIS, R. M.; BEATI, A. A. G. F.; LANZA, M. R. V.; SOTOMAYOR, M. D. P. T.; BERTAZZOLI, R. Desenvolvimento e avaliação de eletrodos de difusão gasosa (EDG) para geração de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> in situ e sua aplicação na degradação do corante reativo azul 19. **Química Nova**, 35(10), 1961–1966, 2012.

ROLLEMBERG, S., BARROS, A. N. DE, LIMA, J. P. M. DE. Avaliação da contaminação, sobrevivência e remoção do coronavírus em sistemas de tratamento de esgoto sanitário. **Revista Tecnologia**, v. 41(1), 2020.

ROUQUEROL, F.; ROUQUEROL, J.; SING, K.S.W.; LLEWELLYN, P.; MAURIN, G., Adsorption by powders and porous solids. 2. ed. San Diego, Elsevier. v.1, 2014.

RUTHVEN, D. M. Principles of adsorption and adsorption processes. 1 ed, Canadá, John Wiley & Sons, v.1, 1984.

SELUY, L. G.; ISLA, M. A. A process to treat high-strength brewery wastewater via ethanol recovery and vinasse fermentation. **Industrial & Engineering Chemistry Research**, v. 53, p. 17043-17050, 2014.

SHI, Y.; HU, H.; REN, H. Dissolved organic matter (DOM) removal from biotreated coking wastewater by chitosan-modified biochar: Adsorption fractions and mechanisms. **Bioresource Technology**, 297(122), 281, 2020.

SILVA, J. R. M. E; OLIVEIRA, L. F. C. DE; FIA, R. Aplicação de efluente de estação de tratamento de esgoto em solo cultivado com grama esmeralda (*Zoysia japonica*). **Revista Engenharia Na Agricultura - Reveng**, 27(2), 157–169, 2019.

SOBRINHO, M. A. DA M., PAULINO, P. M., DE OLIVEIRA, D. E. B. Post-treatment of coagulated leachate by adsorption in ostreculture waste. **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, v. 24, p. 897–907, 2019.

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 adsorbente na remoção de metais tóxicos. Ceará: **Química Nova**, v. 30, n. 5, p. 1153-1157, 2007.

SZWAJGIER, D.; WAŚKO, A.; TARGOŃSKI, Z.; NIEDŹWIADEK, M.; BANCARZEWSKA, M. Use of a Novel Ferulic Acid Esterase from *Lactobacillus acidophilus* K1 for the Release of Phenolic Acids from Brewer's Spent Grain. **Journal of the Institute of Brewing**, 116 (3), p. 293-303, 2010.

TAN, X. et al. Application of biochar for the removal of pollutants from aqueous solutions. **Chemosphere**, v. 125, p. 70–85, 2015.

TAPPI – Technical Association of the Pulp and Paper Industry; Test methods; Atlanta, USA. 2000-2001.

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

TRIPATHI M., SAHU J.N. AND GANESAN P. Effect of process parameters on production of biochar from biomass waste through pyrolysis: A review. **Renew. Sustain. Energy Rev.**, 55, 467-481, 2016.

TONG, H.; HU, M.; LI, F. B.; LIU, C. S.; CHEN, M. J. Biochar enhances the microbial and chemical transformation of pentachlorophenol in paddy soil. **Soil Biology and Biochemistry**, v.70, p.142-150, 2014.

TOMCZYK, A., SOKOŁOWSKA, Z., BOGUTA, P. Biochar physicochemical properties: pyrolysis temperature and feedstock kind effects. **Reviews in Environmental Science and Biotechnology**, 2020.

TRUONG, H. B., IKE, I. A., OK, Y. S., & HUR, J. Polyethyleneimine modification of activated fly ash and biochar for enhanced removal of natural organic matter from water via adsorption. **Chemosphere**, v. 243, n. 125, p. 454, 2020.

WANG, H., SHAN, L., LV, Q., CAI, S., QUAN, G., & YAN, J. Production of hierarchically porous carbon from natural biomass waste for efficient organic contaminants adsorption. **Journal of Cleaner Production**, v. 263, n. 121, p. 352, 2020.

WHO issues consensus document on the epidemiology of SARS. **Wkly Epidemiol Rec**, v. 78, n. 43, p. 373-375, 2020.

WILKINSON, S.; SMART, K. A.; COOK, D. J. A comparison of dilute acid- and alkali-catalyzed hydrothermal pretreatments for bioethanol production from brewers' spent grains. **Journal of the American Society of Brewing Chemists**, v. 72, n. 2, p. 143-153, 2014.

WU, J.J.; WU, C.-C.; MA, H.-W.; CHANG, C.-C. Treatment of landfill leachate by ozone-based advanced oxidation processes. **Chemosphere**, v. 54, p. 997-1003, 2004.

ZHENG, W. et al. Sorption properties of greenwaste biochar for two triazine pesticides. **Journal of Hazardous Materials**, Amsterdam, v. 181, n. 1/3, p. 121- 6, 2010.