

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DIRETORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO**

KAROLINE YOSHIKO GONÇALVES

**ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DAS VARIÁVEIS DE PRODUÇÃO DO
BIOCHAR PARA ADSORÇÃO DE NUTRIENTES**

DISSERTAÇÃO

PONTA GROSSA

2021

KAROLINE YOSHIKO GONÇALVES

**ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DAS VARIÁVEIS DE PRODUÇÃO DO
BIOCHAR PARA ADSORÇÃO DE NUTRIENTES**

**Analysis of the influence of biochar production variables for nutrient
adsorption**

Dissertação apresentada como requisito para obtenção do título de Mestre em Engenharia de Produção da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Orientador: Prof. Dr. Aldo Braghini Junior.
Coorientador: Prof. Me. Nabi Assad Filho.

**PONTA GROSSA
2021**



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Esta licença permite que outros remixem, adaptem e criem a partir do trabalho para fins não comerciais, desde que atribuam o devido crédito e que licenciem as novas criações sob termos idênticos. Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.



**Ministério da Educação
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Câmpus Ponta Grossa**



KAROLINE YOSHIKO GONCALVES

ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DAS VARIÁVEIS DE PRODUÇÃO DO BIOCHAR PARA ADSORÇÃO DE NUTRIENTES

Trabalho de pesquisa de mestrado apresentado como requisito para obtenção do título de Mestre Em Engenharia De Produção da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR). Área de concentração: Gestão Industrial.

Data de aprovação: 04 de Fevereiro de 2021

Prof Aldo Braghini Junior, Doutorado - Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Prof Carlos Eduardo Pellegrino Cerri, Doutorado - Universidade de São Paulo (Usp)

Prof Cassiano Moro Piekarski, Doutorado - Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Prof Joao Carlos Colmenero, Doutorado - Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Documento gerado pelo Sistema Acadêmico da UTFPR a partir dos dados da Ata de Defesa em 04/02/2021.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a **Deus**, que me guiou durante essa jornada, me mantendo firme diante das dificuldades que surgiram e principalmente, agradeço pela minha vida e saúde.

Agradeço de forma especial:

Aos meus pais, **Luiz Carlos Gonçalves** e **Maria Yossiko Nishizawa Gonçalves**, por serem minha base, meu ombro amigo e minha força. Obrigada por todo suporte que me deram, pelas palavras de incentivo e pelas suas preocupações.

Aos meus irmãos, **Kássio** e **Karlos** pela amizade, companheirismo e momentos de descontração.

Ao meu noivo, **Emerson**, pelo seu apoio, compreensão e companheirismo.

Aos meus **amigos**, que tornaram essa caminhada mais leve. Obrigada pela amizade, pelo respeito, pelos conselhos, pelas risadas e pelos momentos que partilhamos.

Ao **Prof. Anderson, Eriel** e **Simone** que me auxiliaram durante as realizações das análises desta pesquisa. À **Prof. Tânia** e meus amigos **Gustavo** e **Fernando** que prontamente me atenderam quando precisei de ajuda.

Ao meu orientador, **Prof. Dr. Aldo Braghini Junior**, e meu co-orientador, **Prof. Me. Nabi Assad Filho**. Obrigado pelas suas muitas contribuições, orientações, valiosas sugestões, paciência e todo tempo dedicado a esta pesquisa.

À **Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior** (Capes), pela concessão da bolsa e apoio financeiro durante o mestrado.

Muito obrigada a todos.

RESUMO

GONÇALVES, Karoline Yoshiko. **Análise da influência das variáveis de produção do biochar para adsorção de nutrientes**. 2021. 102 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Ponta Grossa, 2021.

Na atividade agrícola é comum o uso de fertilizantes para correção do solo visando maior produtividade, no entanto, sua baixa eficiência e um alto nível de perda, devido a não absorção pelas plantas, podem levar a prejuízos financeiros e poluição ambiental. Nesse sentido, o biochar com adição de nutrientes, tem se destacado como um excelente fertilizante já que apresenta inúmeros benefícios ao solo e as plantas. Contudo, como conseguir uma alta porosidade, característica necessária do biochar para adsorção de nutrientes, ainda é uma questão em debate. Nesse contexto, a presente pesquisa possui como objetivo avaliar a contribuição das variáveis de produção do biochar que auxiliam na adsorção de nutrientes. Após a identificação das variáveis mais importantes (biomassa e temperatura de produção), foi possível produzir o biochar a partir de eucalipto Citriodora e Grandis, a 350 e 500 °C, com e sem modificação química. A porosidade das amostras foi quantificada e classificada (micro, meso e macroporos) com o auxílio da Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) e o processamento digital de imagens através do *software ImageJ*. Os resultados foram analisados graficamente e estatisticamente. A amostra de carvão produzida a partir de eucalipto Citriodora, pirolisada a 350 °C sem modificação química, apresentou resultados estatisticamente significativos, uma vez que os microporos são influenciados pela temperatura e os mesoporos pela biomassa utilizada no processo de produção. Já as análises gráficas sugerem que as amostras que apresentam melhor comportamento são produzidas a partir do eucalipto Citriodora, pirolisados a 500 °C, sendo que, as amostras com modificação de 1,5% de FeCl₃ apresentaram maior área total de poros e, sem a modificação química, apresentaram maior quantidade de poros.

Palavras-chave: Biochar. Porosidade. Temperatura de Pirólise. Biomassa. Modificação Química.

ABSTRACT

GONÇALVES, Karoline Yoshiko. **Analysis of the influence of biochar production variables for nutrient adsorption.** 2021. 102 f. Dissertation (Master Degree in Production Engineering) - Federal Technology University - Paraná. Ponta Grossa, 2021.

In agricultural activity, it is common to use fertilizers to correct qualified soil, greater productivity, however, its low efficiency and a high level of loss, due to non-absorption by plants, can cause financial losses and environmental resources. In this sense, biochar with the addition of nutrients, has stood out as an excellent fertilizer since it has numerous benefits to the soil and plants. However, how to achieve high porosity, a necessary characteristic of biochar for nutrient adsorption, is still a matter of debate. In this context, the present research aims to assess the contribution of biochar production variables that assist in the adsorption of nutrients. After identifying the most important variables (biomass and temperature of production), it was possible to produce the biochar from Citriodora and Grandis eucalyptus, at 350 and 500 °C, with and without chemical modification. The porosity was quantified and organized (micro, meso and macropores) with the aid of Scanning Electron Microscopy (SEM) and digital image processing using the ImageJ software. The results were caused graphically and statistically. The resulting coal sample from Citriodora eucalyptus, pyrolyzed at 350 °C without chemical modification, presented statistically obtained results, since the micropores are influenced by the temperature and the mesopores by the biomass taking advantage of the production process. Graphical analyzes, on the other hand, are the ones that present the best behavior and are produced from Citriodora eucalyptus, pyrolyses at 500 °C, and, as modified with the 1.5% FeCl₃ modification, another larger total pore area and, without chemical modification, more pores.

Keywords: Biochar. Porosity. Pyrolysis temperature. Biomass. Chemical modification.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Estrutura da pesquisa	15
Figura 2 - Etapas do processamento digital de imagem	25
Figura 3- Processo produtivo de carvão	27
Figura 4 - Etapas da pesquisa	31
Figura 5 - Aquisição da imagem a partir do MEV	36
Figura 6 - Pré-processamento da imagem	37
Figura 7- Segmentação da imagem	38
Figura 8 - Extração de atributos	39
Figura 9 - Boxplot para quantidade de microporos	58
Figura 10- Teste Tukey	60
Figura 11 - Palavras com maior retorno no software VOSviewer.	74
Figura 12 - Procedimento iterativo da fase de processamento.	76

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1- Média da umidade das amostras de carvão e desvio padrão.....	45
Gráfico 2- Quantidade média de poros dos carvões produzidos a 350 °C	46
Gráfico 3- Quantidade média de poros dos carvões produzidos a 500 °C	47
Gráfico 4- Área total média de poros dos carvões produzidos a 350 °C	48
Gráfico 5- Área total média de poros dos carvões produzidos a 500 °C	48
Gráfico 6- Quantidade média de poros dos carvões produzidos a partir do eucalipto Grandis.....	49
Gráfico 7- Quantidade média de poros dos carvões produzidos a partir do eucalipto citriodora	50
Gráfico 8 - Área total média de poros dos carvões produzidos a partir do eucalipto Grandis.....	51
Gráfico 9- Área total média de poros dos carvões produzidos a partir do eucalipto Citriodora.....	51
Gráfico 10- Quantidade média de poros dos carvões produzidos sem modificação química.....	52
Gráfico 11- Área total média dos poros dos carvões produzidos sem modificação química.....	53
Gráfico 12- Quantidade média de poros dos carvões produzidos com modificação química de 0,75% FeCl ₃	53
Gráfico 13- Área total média de poros dos carvões produzidos com modificação química de 0,75% FeCl ₃	54
Gráfico 14- Quantidade média de poros dos carvões produzidos com modificação química de 1,5% FeCl ₃	55
Gráfico 15- Área total média de poros dos carvões produzidos com modificação química de 1,5% FeCl ₃	55

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Extração média de nutrientes pela cultura do milho destinada à produção de grãos e silagem em diferentes níveis de produtividades	18
Tabela 2- Tabela de dimensionamento dos poros segundo a International Union of Pure and Applied Chemistry	24
Tabela 3- Nomenclaturas utilizadas para caracterização das amostras	34
Tabela 4 - Teor de umidade da matéria-prima	43
Tabela 5- Teor de umidade das amostras de carvão	44
Tabela 6 - Teste de normalidade Shapiro-Wilk para microporos	57
Tabela 7 - Teste de Kruskal-Wallis	57
Tabela 8 - Teste de normalidade Shapiro-wilk para mesoporos	58
Tabela 9 - Análise de variância para área de mesoporos	59
Tabela 10 - Análise de variância para quantidade de mesoporos	59
Tabela 11 - Resultado da análise da porosidade do carvão produzido a partir de eucalipto Grandis em uma ampliação de 1000x	95
Tabela 12 - Resultado da análise da porosidade do carvão produzido a partir de eucalipto Citriodora em uma ampliação de 1000x	96

LISTA DE QUADROS

Quadro 1- Características citadas pelos autores.....	41
Quadro 2 - Palavras-chave (keywords) utilizadas na RBS.....	75
Quadro 3 - Cronograma utilizado na RBS.....	76
Quadro 4 - Resumo geral da quantidade de artigos da RBS	77
Quadro 5 - Periódicos na área de avaliação de Engenharias III e quantidade de artigos catalogados na Revisão Bibliográfica Sistemática (RBS).....	79
Quadro 6 - Processamento digital das amostras de carvão com o auxílio do software ImageJ.	82

LISTA DE SIGLAS

NPK	Nitrogênio, fósforo e potássio
ODS	Objetivos de Desenvolvimento Sustentável
RBS	Revisão bibliográfica sistemática
PIB	Produto interno bruto
VBP	Valor bruto da produção
DAP	Fosfato diamônico
MAP	Fosfato monoamônico
TSP	Superfosfato triplo
SSP	Superfosfato simples
SRF	<i>Slow release fertilizer</i>
SSA	Área superficial específica
CEC	<i>Cation exchange capacity</i>
AEC	<i>Anion exchange capacity</i>
CM	Estrume de frango
ES	Serragem de eucalipto
CH	Casca de café
SB	Bagaço de cana-de-açúcar
PB	Casca de pinheiro
TGA	Análise termogravimétrica
FTIR	Espectroscopia no infravermelho por transformada de Fourier
DRX	Análise de difração de raios-X
BBFs	Fertilizantes a base de biochar
ICP-OES	Espectrometria de emissão óptica de plasma acoplada indutivamente
ADS	Lama digerida anaerobicamente
WS	Serragem de madeira
BC	Biochar
HC	Hydrochar
TXRF	Espectroscopia de reflexão total por fluorescência de raios X
PDI	Processamento digital de imagens
MEV	Microscopia eletrônica de varredura

LISTA DE ACRÔNIMOS

NASA	Agência Espacial Norte-Americana
IUPAC	<i>International Union of Pure and Applied Chemistry</i>

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	10
1.1 OBJETIVOS.....	12
1.1.1 Objetivo Geral.....	12
1.1.2 Objetivos Específicos	12
1.2 JUSTIFICATIVA.....	13
1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO	14
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	16
2.1 AGRICULTURA.....	16
2.2 Carvão Utilizado como Fertilizante.....	19
2.2.1 Porosidade do Carvão.....	23
2.3 PROCESSO TRADICIONAL DE PRODUÇÃO DE CARVÃO	26
3 MATERIAIS E MÉTODOS	31
3.1 IDENTIFICAÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS DO BIOCHAR PARA USO NA AGRICULTURA.....	31
3.2 PROCEDIMENTO DE PRODUÇÃO DO BIOCHAR.....	32
3.2.1 Biomassa.....	32
3.2.2 Pré-tratamento	32
3.2.3 Pirólise.....	33
3.2.4 Codificação.....	33
3.3 CARACTERIZAÇÃO	34
3.3.1 Teor de Umidade.....	34
3.3.2 Caracterização da Porosidade	35
3.3.2.1 Aquisição da imagem	35
3.3.2.2 Pré-processamento	36
3.3.2.3 Segmentação	37
3.3.2.4 Extração de atributos.....	38
3.3.2.5 Classificação	39
3.3.3 Análise Estatística da Porosidade	39
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	41
4.1 IDENTIFICAÇÃO DE CARACTERÍSTICAS	41
4.2 TEOR DE UMIDADE	43
4.3 ANÁLISE DA POROSIDADE	46
4.4 IDENTIFICAÇÃO DOS PARÂMETROS DE PRODUÇÃO DO BIOCHAR.....	60
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	62
REFERÊNCIAS	64

APÊNDICE A – Revisão Bibliográfica Sistemática (RBS)	72
APÊNDICE B – Processamento de Imagens no <i>software</i> ImageJ.....	81
APÊNDICE C – Análise da Porosidade realizada com o auxílio do <i>software</i> ImageJ	94

1 INTRODUÇÃO

O agronegócio é o setor da economia que alimenta o mundo, sendo a agricultura a responsável por produzir frutas, hortaliças, legumes e cereais para o consumo humano e para a criação de animais, além da produção de fibras e geração de energia. Entre os anos de 1964 e 2014 a produção de grãos (trigo, milho e arroz) cultivados aumentou em 188 %, 52 % a mais que o crescimento da população mundial para o mesmo período (FAO, 2018).

Visando uma maior produtividade e qualidade dos alimentos produzidos na lavoura, é necessário que o solo em que são cultivados sejam férteis. Para isso, os agricultores utilizam práticas de manejo adequadas, como a rotação de culturas, plantio direto e o manejo da fertilidade através da calagem, gessagem e adubação equilibrada com macro e micronutrientes, utilizando fertilizantes inorgânicos e/ou orgânicos (COELHO, 2006).

Anualmente, são aplicados aproximadamente 15 milhões de toneladas de fertilizantes a base de fósforo em todo o mundo, no entanto apenas de 5 à 30 % do produto é absorvido, sendo o restante perdido para o ambiente devido as chuvas (WANG et al., 2012).

Nesse sentido, o carvão tem se destacado na agricultura como um excelente fertilizante, pois aumenta a fertilidade do solo, a produtividade das culturas e o sequestro do carbono da atmosfera (LEHMANN, 2007, CAREY; McNAMARA; ZITOMER, 2015). O carvão utilizado na agricultura o qual recebe o nome de biocarvão ou biochar, é um material rico em carbono, produzido a partir da pirólise de uma determinada biomassa sob condição limitada ou completa ausência de oxigênio (LEHMANN, 2007; NOVAK; CANTRELL; WATTS, 2013; WU et al., 2013; XIAO; CHEN; ZHU, 2014). Além disso, o biochar possibilita alterar a absorção de fósforo, e, conseqüentemente a disponibilidade do mesmo no solo (BORNØ; MÜLLER-STÖVER; LIU, 2018), adsorver metais pesados, adsorção de cobre e zinco nas plantas e alterar as propriedades físico-químicas do solo (LIU et al, 2016).

A busca por utilização do biochar no solo, tem atraído cada vez mais atenção desde 2010. Pesquisas internacionais mostram que o carvão é eficaz em diferentes tipos de solo, já que possui características importante como sua alta capacidade de sorção, alta área superficial, capacidade de troca catiônica e aniônica, alteração do pH e nutrientes como fósforo, potássio, cálcio e magnésio (LEHMANN; JOSEPH,

2015).

Albuquerque et al. (2013), buscaram avaliar a aplicação em diferentes níveis do biochar sobre o crescimento e rendimento do trigo, para isso, inicialmente os autores caracterizaram o biochar para em seguida realizarem os experimentos e análises. Estes autores, identificaram que a adição do biochar apresentou um resultado positivo, porém inferior quando comparado a adição do uso de fertilizante mineral. No entanto, quando adicionado biochar e fertilizante mineral ao solo, obteve-se maior produção de grãos quando comparado as análises anteriores, apresentando seu efeito benéfico, além de aumentarem significativamente o pH do solo, condutividade elétrica e fósforo extraível por resina.

No entanto, as pesquisas não apresentam uma metodologia de como produzir biochar com tais características. Sabe-se apenas que sua eficácia no solo está diretamente ligada ao tipo de biomassa utilizada e as condições de produção do carvão (CAI et al., 2016; ZHANG et al., 2016; LAHORI et al., 2017). O biochar quando modificado por meio de compostos químicos, altera suas propriedades físico-químicas, possibilitando por exemplo, que este possua uma melhor capacidade de sorção (ZAMA et al., 2017). Além disso, a incorporação de nitrogênio no biochar permite sua utilização como fertilizante de liberação lenta com alta capacidade de retenção de água (WEN et al., 2017). Todas essas alterações tornam o biochar um excelente composto para aplicação no solo, pois aumenta a qualidade do mesmo (ZAMA et al., 2017).

Hamzah et al. (2013), propuseram determinar as propriedades físico-químicas do biochar produzido a partir de resíduos agrícolas, visando avaliar sua influência na fertilidade do solo, além de identificar como a temperatura e o tempo de pirólise, influenciam nas características finais do carvão. Estes autores identificaram que a biomassa utilizada para produção do biochar, está diretamente relacionada às suas características finais, bem como a temperatura da pirólise e o tempo de produção. Além disso, é possível verificar que a utilização do biochar se mostrou benéfica para melhoria da fertilidade do solo e aumento do crescimento das culturas.

Uttran et al. (2018), objetivaram investigar a sorção de íons de nitrogênio, fósforo e potássio (NPK) no biochar, para isso, inicialmente o carvão foi produzido e em seguida preparado para o processo de adsorção de NPK para então realização das análises. Estes autores, concluíram que a temperatura de pirólise influencia nas propriedades finais do produto, por exemplo, quanto maior a temperatura, menor a

capacidade de troca catiônica, e maior o teor de cinzas, carbono fixo, área superficial e pH.

Contudo, as características necessárias do biochar para adsorção de nutrientes e como consegui-las, além da explicação do mecanismo de sorção ainda é uma questão em debate (CAI et al., 2016). Identificar o tipo de poro (macro, meso ou micro) é uma característica de suma importância para que o biochar aumente seu potencial de sorção (CHU et al., 2018), porém não são encontrados dados na literatura que tratem a respeito. Além de outros fatores, como concentração inicial de compostos químicos, pH inicial e dosagem de adsorvente (YANG et al., 2017).

Nesse contexto, o presente trabalho busca responder o seguinte problema de pesquisa: **Como produzir um biochar com alta área superficial específica capaz de adsorver nutrientes, visando a posterior produção de um fertilizante de liberação lenta?**

1.1 OBJETIVOS

Com base na problemática exposta apresentam-se os objetivos desta pesquisa, que podem ser divididos em nível geral e específico.

1.1.1 Objetivo Geral

Avaliar a contribuição das variáveis de produção do biochar que auxiliam na adsorção de nutrientes

1.1.2 Objetivos Específicos

- ❖ Identificar as variáveis mais importantes que podem influenciar no processo de produção do biochar com capacidade de adsorção de nutrientes;
- ❖ Analisar a tendência de comportamento das variáveis de entrada; e,
- ❖ Avaliar estatisticamente a significância das variáveis de entrada na capacidade de sorção do biochar produzido nesta pesquisa.

1.2 JUSTIFICATIVA

Em terras agricultáveis, é comum o uso de fertilizante para auxiliar no crescimento e desenvolvimento das culturas, visando uma maior produtividade, no entanto sua baixa eficiência e um alto nível de perda de fertilizantes químicos não absorvidos pelas plantas podem levar a perdas financeiras e poluição ambiental (DOMAGALSKI et al., 2007)

Para que as plantas absorvam adequadamente os nutrientes presentes no fertilizante, a água disponível no solo é essencial (ARTUZO et al.,2018). No entanto, a agricultura é um negócio a céu aberto, sujeito as condições climáticas que não podem ser controladas. De modo que a falta ou excesso de água, podem levar a prejuízos financeiros aos agricultores. Sendo assim, o presente trabalho justifica-se para o âmbito empresarial, uma vez que objetiva identificar as características necessárias do biochar, para produzir um fertilizante de liberação lenta.

Além disso, o uso de fertilizantes na agricultura, pode acarretar a poluição por nitratos das águas subterrâneas (ZHANG et al., 2016), perda de biodiversidade, contaminação e acidificação do solo, emissões de gases de efeito estufa e mudanças climáticas (WANG et al., 2012). Diante disso, justifica-se a importância desta pesquisa em uma perspectiva ambiental, já que mudanças alternativas ao biochar como a incorporação do nitrogênio ao biochar, possibilita, por exemplo alta capacidade de retenção de água. Além disso, justifica-se pelas contribuições socioambientais desenvolvidas com base nos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), uma vez que contribui para a produção de alimentos para a sociedade, visando a minização de impactos ambientais acarretados pelo uso de fertilizantes comum.

Por fim, justifica-se a importância do estudo para o meio acadêmico, uma vez que apesar da literatura apresentar diversos trabalhos voltados a aplicação do biochar, nota-se uma escassez relacionada a estudos que abordem quais as características fazem-se necessárias durante a produção do biochar para aumentar sua área superficial específica e conseqüentemente adsorver nutrientes, além de como consegui-las. Além disso, o estudo está inserido no Programa de Pós Graduação em Engenharia de Produção da Universidade Tecnológica do Paraná – Campus de Ponta Grossa, na área de Gestão Industrial na linha de pesquisa de Gestão da Produção e Manutenção.

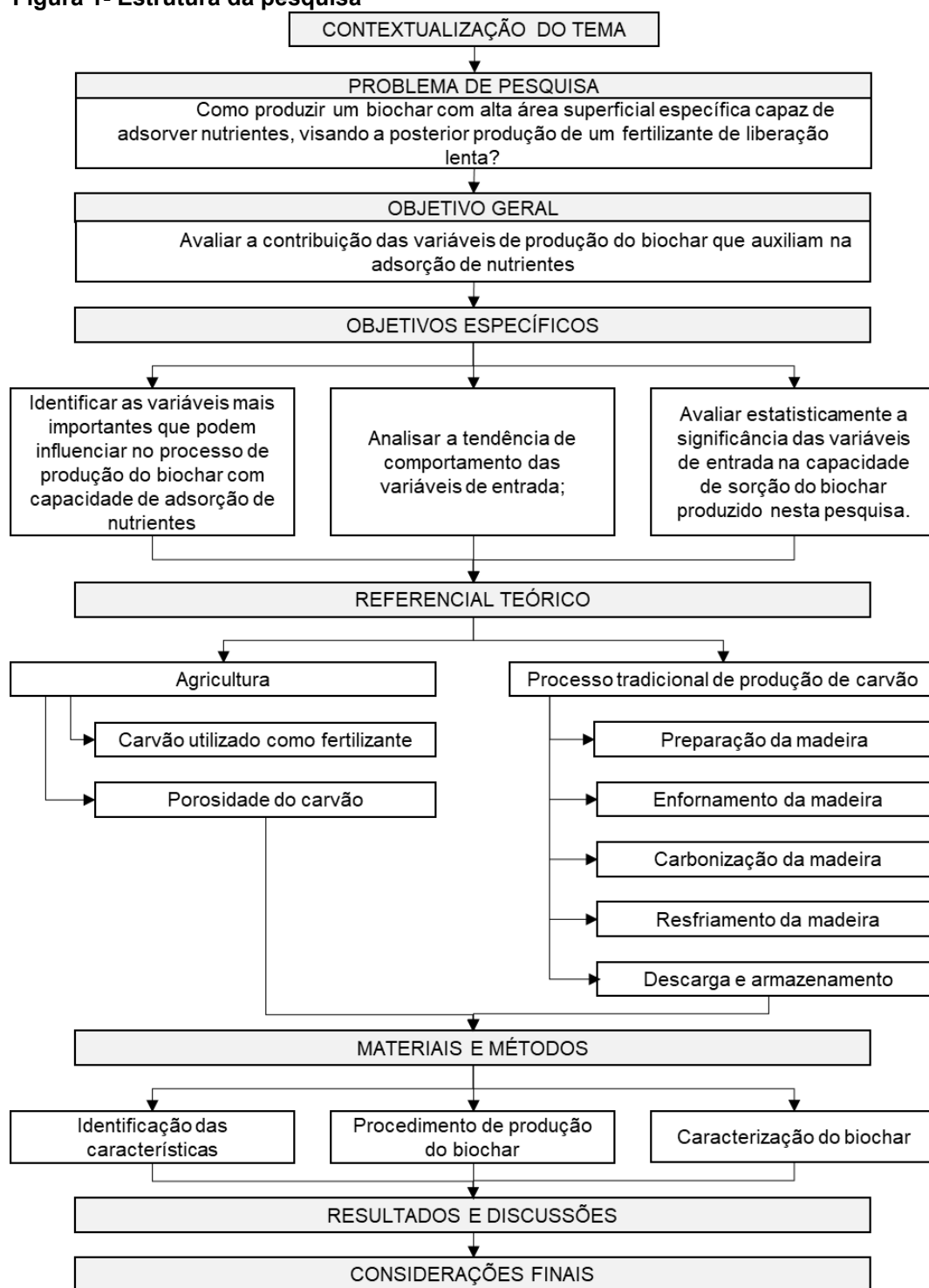
Portanto, este estudo contribui para identificar a influência de diversos

parâmetros na porosidade do biochar, característica importante para a adsorção de nutrientes.

1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

A pesquisa encontra-se estruturada em 5 capítulos. No primeiro capítulo, o tema da pesquisa foi contextualizado, o problema de pesquisa, o objetivo geral e os objetivos específicos foram apresentados e a justificativa foi explanada. O capítulo 2, apresenta a teoria de base utilizada no desenvolvimento desta pesquisa. A metodologia utilizada para realização da pesquisa encontra-se no terceiro capítulo. No quarto capítulo estão dispostos os resultados, e por fim, no quinto e último capítulo as considerações finais, seguida das referências. A Figura 1, ilustra em síntese a lógica estrutural das etapas para o desenvolvimento da pesquisa.

Figura 1- Estrutura da pesquisa



Fonte- Autor (2021)

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Nesta sessão é apresentado o referencial teórico. Para a realização da Revisão Bibliográfica Sistemática (RBS), baseou-se no trabalho apresentado por Conforto, Amaral e Silva (2011), intitulado RBS *Roadmap*. Os autores destacam que o método está organizado em 15 etapas distribuídas em 3 fases, sendo elas: i) entrada; ii) processamento, e; iii) saída, conforme detalhado no Apêndice A.

Na busca dos artigos foram utilizadas as palavras chaves (*charcoal OR biochar OR "bio chars" AND (soil*) AND (fertilizer*) AND (pyrolysis) AND (adsorption)*) nas bases de dados *Web of Science*, *Science Direct* e *Scopus*. A RBS retornou um total de 100 artigos, após excluídas as duplicatas, ou seja, quando um mesmo artigo está indexado em bases de dados diferentes, obteve-se um total de 70.

Ao realizar a leitura dos títulos e palavras-chave (Filtro 1), utilizou-se os critérios de inclusão dos artigos estabelecidos na Etapa 5 (critérios de inclusão), selecionando 39 artigos que atenderam aos critérios para o Filtro 2, em que foi realizada a leitura do resumo, totalizando 37 artigos para o Filtro 3. Assim, após a leitura completa (Filtro 3) foram excluídos 9 artigos, resultando em um portfólio final de 28 artigos para a pesquisa.

Os principais temas levantados por meio da RBS foram: Agricultura e Carvão, em que foram discutidos o seu processo de produção, buscando identificar qual o procedimento utilizado e como conseguir as características necessárias para sua posterior utilização na agricultura como fertilizante de liberação lenta.

2.1 AGRICULTURA

A agricultura é uma atividade que busca produzir vegetais em solos agricultáveis para consumo humano e/ou para a demanda de criação de animais. Tal atividade, vem se desenvolvendo com o passar dos anos, visando atender as necessidades do homem, além de aumentar a produtividade e praticidade no cultivo de alimentos.

Em 2017, um estudo apontado pela Agência Espacial Norte-Americana (NASA) apresentou que as lavouras ocupam 1,87 bilhões de hectares, sendo que as maiores extensões cultivadas estão na Índia (179,8 milhões de hectares), nos Estados

Unidos (167,8 milhões de hectares), na China (165,2 milhões de hectares), na Rússia (155,8 milhões de hectares), e ocupando o quinto lugar, o Brasil com uma área de lavoura de 63,9 milhões de hectares, que correspondem a 7,6% do espaço territorial do país (MIRANDA, 2018), estima-se que este território deve expandir para 71 milhões de hectares até a safra 2027/28 (JACTO, 2019).

Considerando a média mundial, o Brasil é um dos países que menos utiliza e cultiva suas terras, ficando atrás apenas do Canadá e da Austrália que cultivam menos de 5% de seus territórios. Além disso, segundo um estudo realizado pela Embrapa Territorial as áreas destinadas à proteção, à preservação e a conservação da vegetação do Brasil chegaram a um total de 563,7 milhões de hectares, que correspondem a 66,3% do território brasileiro (MIRANDA, 2018).

No que se refere a economia brasileira, o agronegócio tem sido reconhecido como um dos principais impulsionadores do crescimento econômico do país. No ano de 2019 a soma de bens e serviços gerados no agronegócio chegou a R\$ 1,55 trilhão ou seja 21,4% do Produto Interno Bruto (PIB) brasileiro. sendo o ramo agrícola o responsável por 68% desse valor (R\$ 1,06 trilhão).

Além disso, o valor bruto da produção (VBP) da agropecuária alcançou R\$ 651,5 bilhões, dos quais R\$ 400,7 bilhões pertencem a produção agrícola. Deste total, o soja (grãos) se destaca com o maior VBP (R\$ 155,36 bilhões), seguido do milho (R\$ 68,24 bilhões) e da cana-de-açúcar (R\$ 47,38 bilhões) (CNA, 2020).

O milho (*Zea mays*) é o cereal mais produzido no mundo. O cultivo do milho nos últimos anos passou por importantes mudanças tecnológicas, que resultam em aumentos significativos da produtividade e da produção dos grãos. Além disso, os produtores passaram a dar a real importância a necessidade da melhoria na qualidade dos solos, que esta relacionada ao manejo adequado, o qual inclui entre outras práticas, a rotação de culturas, plantio direto e manejo da fertilidade através da calagem, gessagem e adubação utilizando fertilizantes químicos e/ou orgânicos (COELHO, 2006).

Para que o crescimento das plantas ocorra gerando a melhor produtividade possível, é necessário que o solo seja rico em nutrientes. As quantidades requeridas de micronutrientes pelas plantas de milho são muito pequenas, segundo Coelho (2006, p. 1) "para uma produtividade de 9 t de grãos/ha, são extraídos: 2.100 g de ferro, 340 g de manganês, 400 g de zinco, 170 g de boro, 110 g de cobre e, 9 g de molibdênio".

Já no que se refere aos macronutrientes, a Tabela 1 apresenta uma idéia da extração de nutrientes pelo milho, cultivado para produção de grãos e silagem.

Tabela 1- Extração média de nutrientes pela cultura do milho destinada à produção de grãos e silagem em diferentes níveis de produtividades

Tipo de exploração	Produtividade t/ha	Nutrientes extraídos ¹				
		N	P	K	Ca	Mg
Grãos	3,65	77	9	83	10	10
	5,80	100	19	95	17	17
	7,87	167	33	113	27	25
	9,17	187	34	143	30	28
	10,15	217	42	157	32	33
Silagem (matéria seca)	11,60	115	15	69	35	26
	15,31	181	21	213	41	28
	17,13	230	23	271	52	31
	18,65	231	26	259	58	32

¹ Para converter P em P₂O₅; K em K₂O; Ca em CaO e Mg em MgO, multiplicar por 2,29; 1,20; 1,39 e 1,66; respectivamente

Fonte: COELHO, 2006

A partir da Tabela 1, pode-se observar que a maior exigência do milho refere-se ao nitrogênio (N) e ao potássio (K), seguido do cálcio (Ca), magnésio (Mg) e fósforo (P). Além disso, o aumento da produtividade é proporcional a quantidade disponibilizada para a planta.

No entanto, muitas terras agrícolas em todo o mundo sofrem de deficiência de nutrientes, principalmente de fósforo em regiões tropicais e subtropicais, como a África do Sul (ZHANG et al, 2016), país em que reside a maior quantidade da população que passa fome no mundo (FAO, 2013).

A fim de corrigir o solo, aproximadamente 15 milhões de toneladas de fertilizante P são aplicadas globalmente a cada ano (WANG et al., 2012). Porém, apenas 5 à 30% do P aplicado é absorvido pela cultura no ano seguinte à aplicação, sendo o restante perdido para o ambiente devido ao escoamento natural ocasionado pelas chuvas.

Os fertilizantes convencionais como fosfato diamônico (DAP), fosfato monoamônico (MAP), superfosfato triplo (TSP) e superfosfato simples (SSP) são fabricados a partir de reservas finitas de rochas fosfáticas (BORNØ, MÜLLER-STÖVER; LIU, 2018), que podem esgotar dentro de 50 à 400 anos, dependendo da dinâmica de oferta e demanda de fósforo (VAN DIJK et al., 2016). Atualmente, a

maioria dos fertilizantes comerciais P, são solúveis em água causando sua baixa eficiência e baixos valores residuais dessas fertilizações (EVERAERT et al., 2017), além de perdas econômicas.

Visando, diminuir a perda de nutrientes para o ambiente, o fertilizante de liberação lenta (SRF - *Slow Release Fertilizer*) é feito para liberar seus nutrientes respondendo gradualmente à necessidade de uma planta (HANAFI et al., 2000). O SRF é geralmente preparado por encapsulamento com materiais especiais que reduzem sua dissolubilidade (WU; LIU, 2008). No entanto, isso acarreta alta complexibilidade e custo, limitando o uso do SRF na agricultura. Além disso, após a liberação de nutrientes, o material encapsulante ainda permanece no solo e é de difícil degradação, e seu acúmulo ao longo do tempo pode gerar um novo tipo de poluição ambiental (GE et al., 2002).

Buscando uma alternativa para fornecer nutrientes aos solos agricultáveis, estudos sugeriram que o biochar carregado de nutrientes, como P é um potencial fertilizante de liberação lenta (CHEN et al., 2018).

2.2 CARVÃO UTILIZADO COMO FERTILIZANTE

O biochar é produzido durante a pirólise de um material orgânico sob condições de oxigênio limitado. O processo de pirólise estabiliza o carbono existente na matéria orgânica mais resistente a substâncias químicas ou biológicas, de modo que quando incorporado ao solo é mantido estável por mais tempo e não é emitido para a atmosfera (ALBUQUERQUE et al., 2013). O tempo e a temperatura da pirólise e o tipo de biomassa são os fatores mais importantes na determinação das características do biochar (TANG et al., 2013).

Liu et al. (2016), afirmam que a aplicação do biochar no solo agrícola apresenta inúmeros benefícios, como a melhoria da fertilidade do solo; adsorção de metais pesados e orgânicos contaminantes; transformação de cobre (Cu^{2+}) e zinco (Zn^{2+}) para absorção de plantas; e alteração das propriedades físico-químicas do solo, incluindo pH, carbono orgânico e capacidade de troca catiônica.

O biochar produzido sob altas temperaturas (>400 °C) de pirólise normalmente possui uma alta área superficial e aromaticidade, portanto, pode resistir à decomposição. Esse tipo de biochar é conhecido como um adsorvente verde. Por outro lado, a pirólise a baixa temperatura (<400 °C) favorece uma maior recuperação

de carbono e vários outros nutrientes (por exemplo, Nitrogênio (N), Potássio (K) e Enxofre (S)) que são cada vez mais perdidos em altas temperaturas (LIU et al., 2016). Alta capacidade de sorção, alta área superficial específica (SSA), vários conteúdos de nutrientes minerais (P, K, Ca, Mg), capacidade de troca catiônica (*cation exchange capacity* - CEC), capacidade de troca aniônica (*anion exchange capacity* - AEC) e pH são algumas das importantes propriedades que tornam o biochar uma alternativa adequada para diferentes tipos de solo já que auxilia na estabilização do solo (LEHMANN; JOSEPH, 2015).

Domingues et al. (2017) buscaram avaliar as propriedades físico-químicas dos biochars derivados de fontes ricas em nutrientes, para isso foram produzidos 15 biochars a partir de 5 diferentes biomassas (i) estrume de frango (CM); ii) serragem de eucalipto (ES); iii) casca de café (CH); iv) bagaço de cana (SB); e v) casca de pinheiro (PB)) e 3 diferentes temperaturas de pirólise (350, 450, e 750 °C). De posse das amostras prontas, estes autores avaliaram o rendimento do produto final, teor de cinzas, análise termogravimétrica (TGA), composição elementar (C, H, N, S), análise por espectroscopia no infravermelho por transformada de Fourier (FTIR), análise de difração de raios-X (DRX) e atributos físico-químicos. Os rendimentos gravimétricos de biochar foram reduzidos, o teor de cinzas aumentou e os valores de material volátil foram reduzidos com o aumento da temperatura de pirólise. Isto é explicado pelo aumento da aromatização e maiores perdas de produtos gasosos, óleo de alcatrão e hidrocarbonetos de baixo peso molecular como resultado do aumento da temperatura de pirólise. Por fim, estes autores concluíram que a temperatura da pirólise atua como fator crucial na modificação do produto final, alterando a natureza química e aumentando o caráter aromático dos compostos orgânicos da maioria do biochar. Biochars fabricados a partir de ES, PB e SB, independentemente da temperatura de pirólise empregado, têm potencial para aumentar o armazenamento de C nos solos.

Lustosa Filho et al. (2019), avaliaram o efeito da cama de aves impregnadas com fontes de P (TSP H₃PO₄ [ácido fosfórico]) e MgO (óxido de magnésio) nos fertilizantes a base de biochar (BBFs). A temperatura de pirólise foi determinada em 500 °C durante 120 minutos. O biochar foi moído e para promover a granulação do fertilizante foi utilizado amido de mandioca e cola líquida (acetato de polivinila à base de água). A solubilidade do fertilizante foi analisada em ácido cítrico extraído por agitação, e quantificada por espectrometria de emissão óptica de plasma acoplada indutivamente (ICP-OES). A difusão de fósforo no solo foi determinada usando uma

técnica de visualização ao longo do tempo e análises químicas, e a eficiência agrônômica dos BBFs foi comparada com o fertilizante solúvel (TSP) em granulado e em pó para milho cultivado em estufa. Quando aplicados como pó misturado no solo, os BBFs melhoraram o pH e o Mg do solo e foram capazes de fornecer P às plantas de maneira semelhante à TSP. A forma granular foi equivalente a TSP para liberação de P durante o crescimento inicial do milho e preservou maiores quantidades de P no grânulo, que podem ser usado para plantas em colheitas futuras

Novais et al. (2018), visaram a produção e caracterização de biochars de esterco de aves e palha de cana, dopado com $MgCl_2$ (cloreto de magnésio) na proporção 1:10 sólido/líquido para carbonização a 350 e 650 °C. Concentrações crescentes de P foram agitadas com biochars, a fim de obter a sua capacidade máxima de adsorção. O biochar de esterco de aves apresentou maior capacidade de adsorção (250,8 e 163,6 mg de P a 350 e 650 °C, respectivamente) do que o da palha de cana (17,7 e 17,6 mg de P a 350 e 650 °C, respectivamente). Observa-se que a temperatura de pirólise mudou significativamente a capacidade adsorptiva para o biochar de esterco de aves, com um aumento na energia de ligação de P adsorvida para ambos biochars. Esses materiais dopados com Mg e submetidos à pirólise têm características que permitem seu uso na adsorção de P de águas eutróficas e residuais e, portanto, pode ser utilizado como fertilizante fosfatado de liberação lenta, indicando ser competitivo em qualidade e quantidade com as disponíveis fontes químicas solúveis no mercado.

Oh et al. (2014), objetivaram produzir um fertilizante de liberação lenta (SRF) ecológico, feito de carvão impregnado por lama digerida anaerobicamente (ADS). Os biochar foram produzidos a partir de três tipos de matérias-primas (casca de laranja, madeira residual, lodo de tratamento de água) em diferentes temperaturas (300, 500 e 700 ° C) via pirólise. Os comportamentos de liberação do hidrossolúvel K^+ , Ca^{2+} e Mg^{2+} foram semelhantes para todos os biochars impregnados e para o SRF comercial utilizado. A capacidade de retenção de água foi bastante aprimorada pela mistura do biochar e SRF com o solo. A partir das análises realizadas, os autores concluíram que a imprecisão do biochar com nutrientes pode se tornar um fertilizante K^+ de liberação lenta eficaz.

Pandit et al. (2017) estudaram a aplicação de biochar nos solos como um meio de melhorar a fertilidade do solo, além da mitigação das mudanças climáticas através do sequestro de carbono no solo. A planta *Eupatorium adenophorum* foi utilizada

como biomassa sob diferentes condições de pirólise e diferentes tipos de fornos. Os biochars resultantes mostraram pH consistente ($9,1 \pm 0,3$), capacidade de troca catiônica ($133 \pm 37 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$), conteúdo de carbono orgânico ($73,9 \pm 6,4\%$) e área superficial (35 a $215 \text{ m}^2/\text{g}$) para todos os tipos de fornos. Os biochars foram pré-tratados com água quente ou fria enriquecidas de nutrientes minerais (mistura com uma solução nutritiva antes ou depois do resfriamento, respectivamente) ou adicionados separadamente das mesmas dosagens de nutrientes ao solo. O nutriente quente levou a aumentos significativos de 153% na produção de biomassa acima do solo comparado com o biochar enriquecido com nutrientes a frio e 209% em comparação com o biochar adicionado separadamente dos nutrientes. O aprimoramento do biochar por nutrientes líquidos melhorou a fertilidade em comparação à aplicação separada de biochar e fertilizante.

Santos et al. (2019), avaliaram o desempenho de fertilizante fosfatado associado ao biochar em grânulos em um solo de fixação de P. Os biochars foram produzidos a partir de duas fontes de biomassa: bagaço de cana-de-açúcar (SB) e serragem de madeira (WS), que foram pirolisadas a duas temperaturas (350 e 700 °C). Após caracterização química e física, as amostras de biochar foram granuladas com superfosfato triplo (TSP) na proporção de 3:1 (TSP:biochar). A avaliação agrônômica dos fertilizantes foi realizada por duas culturas sucessivas de milho (*Zea mays*) em estufa. Os tratamentos consistiram de cinco fertilizantes (TSP-WS₃₅₀, TSP-WS₇₀₀, TSP-SB₃₅₀, TSP-SB₇₀₀ e TSP) e três doses de P (100, 200 e 400 mg dm⁻³). Foram avaliadas a produção de matéria seca, a absorção de P no milho e o P disponível no solo após o cultivo. Os resultados indicam que a produção de matéria seca, considerando a captação de P pela planta e o P disponível no solo ao usar uma dose de 400 mg dm⁻³, apresentou maiores resultados nos dois ciclos de cultivo e a taxa de recuperação nos dois cultivos ocorreu inversamente às doses de P. A associação de biochar com fertilizante solúvel em fosfato não aumentou a eficiência do uso de P pelo milho, mas aumentou a disponibilidade de P no solo.

Taskin et al. (2019) objetivaram caracterizar empregando uma abordagem multi-analítica, duas amostras de biochar (BC) e duas amostras de hydrochar (HC) produzidas usando as mesmas condições de processo para cada tipo de material, mas com matérias-primas diferentes. Uma caracterização detalhada é necessária, para isso os autores utilizaram espectroscopia de reflexão total por fluorescência de raios X (TXRF), micro-elétrons de varredura espectroscopia de infravermelho por

transformação de Fourier (FTIR), análises termogravimétricas (TGA) e pirólise acoplada a cromatografia gasosa e espectrometria de massa (Py-GC/MS). Comparando os dados de BC e HC, o HC mostrou um maior conteúdo de elementos minerais, já as amostras de BC foram caracterizadas por uma maior porosidade e hidrofobicidade, sendo potencialmente mais adequado para a sorção de poluentes.

Chu et al. (2018) buscaram ilustrar o desenvolvimento da estrutura porosa dos biochars sob tratamento com ácido fosfórico (H_3PO_4). Os carvões com pré-tratamento, apresentaram maiores quantidade de microporos quando comparado a amostras sem o pré-tratamento. Os autores, observaram que no geral, o pré-tratamento com H_3PO_4 contribui na produção de biochars com grande área de superfície e alta abundância de estruturas porosas. Além disso os biochars podem ser aplicados como material de alta adsorção, bem como fertilizante rico em fósforo.

Sabe-se que a porosidade do carvão, afeta diretamente seu uso posterior na agricultura como fertilizante, no entanto, observa-se que os estudos, em sua maioria não avaliam o processo para atingir a estrutura porosa desejada do biochar, ou ainda, como conseguiu-la.

2.2.1 Porosidade do Carvão

O carvão vegetal é um material carbonoso, com estrutura amorfa e desordenada, e altamente poroso. A porosidade é um dos aspectos mais importantes para a avaliação do desempenho do biochar, ou seja, sua capacidade adsortiva está diretamente relacionada a estrutura porosa do material. A *International Union of Pure and Applied Chemistry* (IUPAC) baseada nas propriedades de adsorção estabelece uma classificação porosa, conforme Tabela 2.

Tabela 2- Tabela de dimensionamento dos poros segundo a International Union of Pure and Applied Chemistry

Tipo de poro	Diâmetro médio	Função principal
Microporos	< 2nm	Contribuem para a maioria da área superficial que proporciona alta capacidade de adsorção para moléculas de dimensões pequenas, tais como gases e solventes comuns
Mesoporos	2 nm < 50 nm	São importantes para a adsorção de moléculas grandes tais como corantes e proporcionam a maioria da área superficial para carvões impregnados com produtos químicos
Macroporos	> 50 nm	São normalmente considerados sem importância para a adsorção e sua função é servir como meio de transporte para as moléculas gasosas

Fonte - (GREGG; SING, 1982)

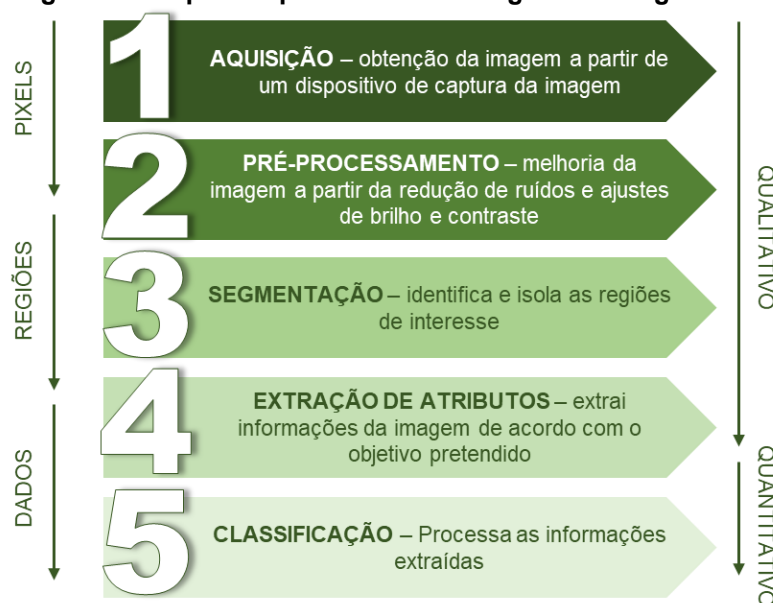
Quanto à forma do biochar, utiliza-se a expressão poro aberto (corresponde a orifícios que se comunicam com a superfície externa) ou poro fechado (corresponde a um orifício isolado) (GREGG; SING, 1982).

Os carvões em sua maioria são microporosos, mas também contém macro e meso poros que contribuem na acessibilidade das moléculas de adsorbato para o interior das suas partículas, especialmente quando estão em fase líquida. A maior parte das aplicações de adsorventes requer um grande volume de poros de pequeno diâmetro.

Diante da importância dos poros, faz-se necessário que sua estrutura porosa seja caracterizada. Para isso, a medição da área superficial do carvão pode ser determinada pelo processamento digital de imagens (PDI).

O PDI pode ser definido como um conjunto de técnicas computacionais para o melhoramento de uma imagem que pode ser adquirida por diferentes sistemas de formação e digitalização de imagens (GOMES, 2001; GONZALEZ; WOODS, 2010). Um sistema PDI é dividido em cinco principais etapas, conforme Figura 2.

Figura 2 - Etapas do processamento digital de imagem



Fonte – Adaptado de Gomes (2019)

➤ **AQUISIÇÃO DA IMAGEM**

A aquisição da imagem é o primeiro passo para o PDI, que obtém a imagem a partir de um dispositivo de captura que a digitaliza, como a microscopia eletrônica de varredura (MEV) (GONZALEZ; WOODS, 2010). Várias técnicas e métodos de aquisição de imagens são empregados de acordo com a aplicação e interesse desejado. Na área de análises de materiais, existem técnicas de microscopia que possuem o princípio de emitir feixes de radiação ou partículas para sondagem do material, que é captado por um sensor, formando assim a imagem (ARAÚJO, 2009).

➤ **PRÉ-PROCESSAMENTO**

Esta etapa busca melhorar a qualidade da imagem reduzindo ruídos e ajustando o brilho e contraste, de modo a reforçar o contorno dos objetos da imagem, retirando regiões não desejadas e conseqüentemente tornando o resultado mais satisfatório para as etapas posteriores (GOMES, 2001).

No entanto, esta etapa apresenta dificuldades ao quantificar o critério para o melhoramento da imagem, uma vez que a grande maioria das técnicas são empíricas e exigem procedimentos interativos para obter resultados satisfatórios (GONZALEZ;

WOODS, 2010).

➤ SEGMENTAÇÃO

A segmentação identifica e isola as regiões de interesse de uma imagem digital, dividindo a imagem em diferentes regiões que serão analisados por algoritmos e selecionando apenas os pixels dos objetos de interesse. Após o processo de segmentação os elementos de interesse da análise são evidenciados, e o fundo da imagem ou os elementos irrelevantes são excluídos. Para uma segmentação que objetiva uma análise quantitativa de estrutura de alguns elementos de interesse podem ser citados, como poros e grãos (AUGUSTO et al., 2013).

➤ EXTRAÇÃO DE ATRIBUTOS

Esta etapa consiste em analisar e extrair as informações úteis ou de interesse da imagem processada. Ou seja, é responsável pela mensuração dos atributos e parametrização dos objetos segmentados (DUDA et al., 2012)

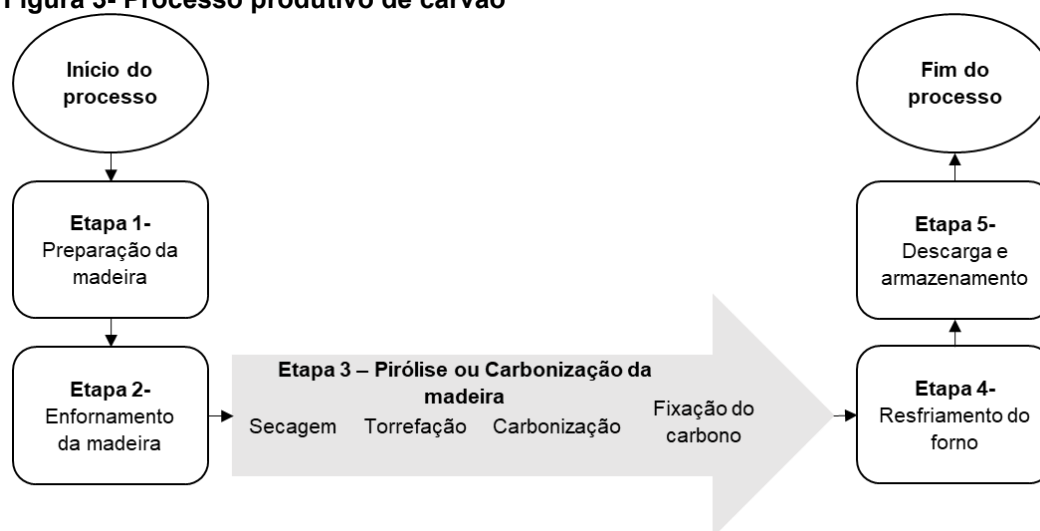
➤ CLASSIFICAÇÃO

Por fim, a classificação busca identificar objetos a partir de um conjunto de medições e informações encontradas na imagem, onde cada objeto é um padrão e os seus valores medidos são as características desse padrão (ALBUQUERQUE et al., 2005)

2.3 PROCESSO TRADICIONAL DE PRODUÇÃO DE CARVÃO

As etapas do processo produtivo do carvão vegetal estão relacionadas ao tipo de forno utilizado, no Brasil o processo tradicional utiliza fornos de barro e tijolos no formato circular. No entanto, o processo pode ser basicamente dividido em 5 etapas conforme apresentado na Figura 3.

Figura 3- Processo produtivo de carvão



Fonte – Adaptado de Santos (2017)

➤ **ETAPA 1 – PREPARAÇÃO DA MADEIRA**

O processo produtivo de carvão inicia-se com a obtenção da madeira oriunda de florestas plantadas, que em seguida é preparada, ou seja, seca e cortada em um tamanho ideal para o tipo de forno utilizado.

A qualidade da madeira é influenciada por características da espécie, do ambiente e do manejo. A secagem da madeira envolve vários fatores, dependendo principalmente da sua espécie, condições climáticas, local de armazenagem, disposição da madeira e do seu tamanho. A madeira de *Eucalyptus spp.*, após sua colheita costuma ficar armazenada cerca de 120 dias ou mais (a céu aberto), para reduzir a umidade da mesma, uma vez que tal característica afeta diretamente o rendimento e qualidade do carvão vegetal (SHAH et al., 1992). Depois de seca, a madeira é cortada em um tamanho ideal para o forno que será utilizado.

➤ **ETAPA 2 – ENFORNAMENTO DA MADEIRA**

Após preparada, a madeira é enfornada. O posicionamento da madeira depende principalmente do tipo de forno utilizado e do comprimento e diâmetro da madeira. O processo dá sequência com o acendimento do forno, que poderá variar de acordo com seu tipo, ou seja, se possui câmara interna ou externa; e se utiliza energia elétrica com fonte de calor ou a partir da queima de tijos (madeira torrada que não

atingiu a temperatura necessária para a carbonização), resíduos e gases (RODRIGUES, 2019).

O acendimento do forno preferencialmente deve ocorrer na parte superior da carga, uma vez que a condução da carbonização se dá de cima para baixo. No entanto, em fornos com câmara externa o acendimento ocorre devido a propagação do calor gerado na mesma. Para que o calor gerado seja o suficiente para o acendimento da madeira, é realizada a combustão de resíduos florestais ou tiços (BRITO, 1990).

Para que o acendimento seja eficiente, alguns fatores da madeira são levados em consideração, como o teor de umidade; posicionamento; estrutura anatômica e química. Em seguida, inicia-se o processo de carbonização com a secagem da madeira (OLIVEIRA et al., 2013).

➤ ETAPA 3 – CARBONIZAÇÃO DA MADEIRA

O objetivo da carbonização é concentrar carbono no resíduo sólido (carvão vegetal). Seu processo consiste em submeter a madeira a um aquecimento entre 450 e 550 °C em um ambiente fechado, com pequena quantidade ou exclusão total de oxigênio. O controle da entrada de oxigênio no forno é de suma importância, para que todo o processo de carbonização ocorra nas faixas de temperaturas ideais para maior rendimento e qualidade do carvão vegetal (BARCELLOS, 2016).

No processo de carbonização ocorrem reações químicas e físicas que dependem principalmente do tempo e da temperatura desta etapa (OLIVEIRA, 2012), sendo liberados gases, vapores de água e líquidos orgânicos, permanecendo como resíduos, alcatrão e principalmente, carvão vegetal (PINHEIRO et al., 2006).

Fatores cruciais nessa etapa são o controle de temperatura e a taxa de aquecimento, uma vez que afetam diretamente a qualidade e o rendimento do produto final. Para controlar a temperatura do forno e conseqüentemente a entrada de oxigênio, podem ser utilizados instrumentos como termopares e pirometros infravermelhos.

Rezende (2006), identificou as temperaturas e alguns fenômenos que ocorrem nas quatro fases da carbonização conforme exemplificado a seguir:

FASE 1 – Secagem: Durante a secagem ocorre a evaporação da água

presente nas fibras da madeira até que a mesma atinja 110 °C. Esta fase é denominada fase endotérmica, quando parte da madeira enfiada é queimada, se a fonte de calor usada for interna.

FASE 2 – Torrefação: Ocorre entre 110 e 250 °C. Nesta fase, quando a madeira atinge 180 °C a água de constituição, pela decomposição principalmente das hemiceluloses, começa a ser liberada, e pouca massa é perdida até 250 °C, formando a madeira torrada ou atijo.

FASE 3 – Carbonização: Ocorre entre 250 e 350°C e é caracterizada pela intensificação da oxidação da celulose, além disso acontece uma perda de massa considerável, formando gás, óleo e água. Quando a temperatura atinge 350 °C pode-se considerar que o processo de carbonização está praticamente finalizado, encontrando-se no material aproximadamente 75 % de carbono fixo.

FASE 4 – Fixação do carbono: a partir de 350 °C ocorre a redução gradual na liberação dos voláteis, principalmente gases combustíveis, continuando a fixação do carbono.

Para Oliveira et al. (2013) a temperatura final da carbonização e o tempo de permanência nesta temperatura são importantes para obtenção de qualidade e rendimento do carvão. Neste contexto, as condições operatórias do processo de carbonização influenciam o rendimento gravimétrico além da qualidade do carvão vegetal, junto com a matéria-prima utilizada.

Carneiro (2008) cita como fatores relacionados às condições operatórias: a temperatura, a pressão, os fluxos térmicos, a taxa de aquecimento, a granulometria, a natureza da madeira, a hidrodinâmica dos produtos fluidos e o pré-tratamento químico ou térmico efetuados sobre a madeira. Cabe ressaltar que o tipo de forno e de sistema produtivo influenciam diretamente as condições operatórias que conseqüentemente influencia o processo de carbonização.

➤ ETAPA 4– RESFRIAMENTO DA MADEIRA

Após a madeira carbonizada, inicia-se a etapa de resfriamento do forno com a vedação de todas as entradas de ar e com o barrelamento (mistura de argila com água) das paredes do forno, se este for construído em alvenaria. Esta etapa, depende

de fatores como: temperatura final; vedação; tipo do forno, e; condições climáticas (SANTOS, 2017). Na maioria das vezes, o resfriamento ocorre de modo natural (convecção natural), demorando vários dias até que o carvão atinja temperaturas abaixo de 40 °C.

➤ ETAPA 5 – DESCARGA E ARMAZENAMENTO DA MADEIRA

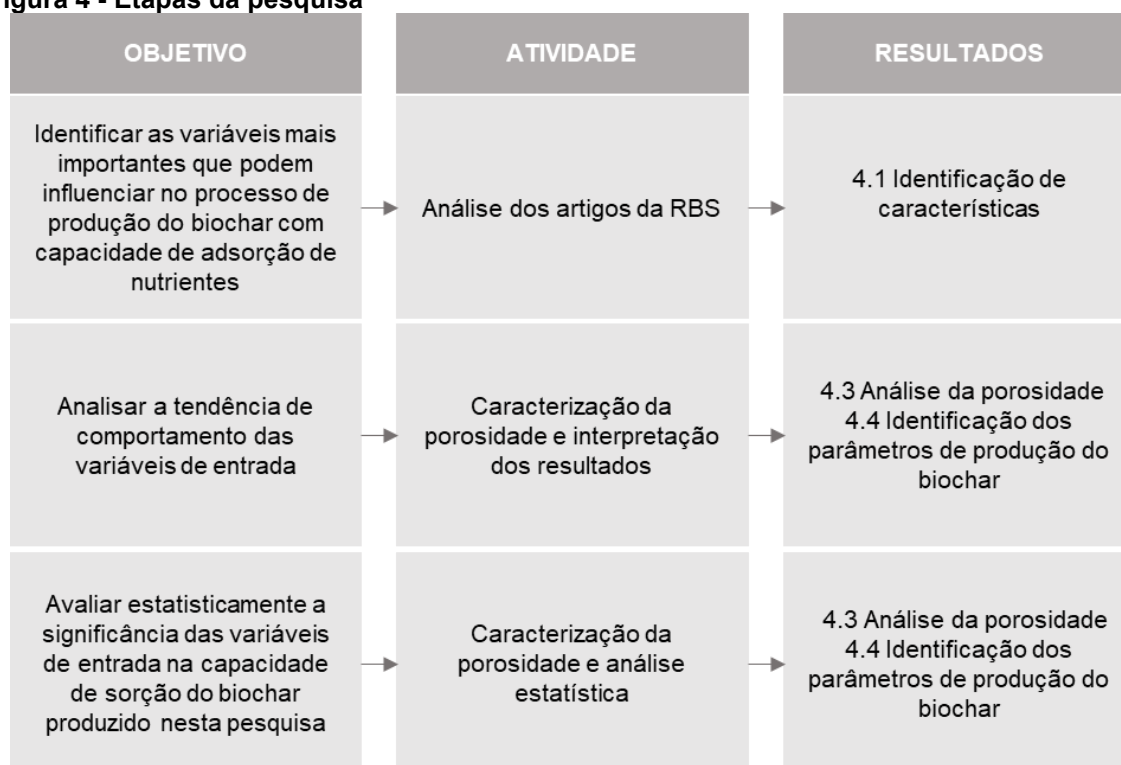
Após o carvão resfriar o mesmo é descarregado dos fornos selecionando e segregando a madeira não carbonizada (atiços), para então ser armazenado. O armazenamento pode ser dividido em duas fases: a primeira delas, ao ar livre em que o carvão é uniformemente distribuído e encoberto (PICANCIO, 2011).

A segunda fase diz respeito a expedição, dependendo das características do transporte, o produto é armazenado em sacos de ráfia, em *bigbags*, ou diretamente em gaiolas/*containers*, e em sacos de papel se a produção for dedicada ao consumo doméstico (REIS, 2014).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Esta seção tem por objetivo apresentar as etapas que compõem os procedimentos para a realização desta pesquisa, conforme apresentado na Figura 4.

Figura 4 - Etapas da pesquisa



Fonte – Autor (2021)

3.1 IDENTIFICAÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS DO BIOCHAR PARA USO NA AGRICULTURA

Buscando identificar as características mais importantes para a produção do biochar visando torná-lo um meio para liberação lenta de nutrientes, os artigos selecionados na Revisão Bibliográfica Sistemática (RBS) foram analisados a partir de uma leitura completa e metódica do artigo, em que buscava-se avaliar quais as variáveis de entrada e saída (ou seja, a entrada é o ponto de partida de produção e a saída os resultados esperados), foram consideradas como importantes para os pesquisadores, ou seja, aquelas que influenciavam o produto final quando utilizado como fertilizante. Os resultados encontram-se apresentados por frequência de

citações no Quadro 1 da seção 4.1 IDENTIFICAÇÃO DE CARACTERÍSTICAS.

3.2 PROCEDIMENTO DE PRODUÇÃO DO BIOCHAR

Após identificadas as variáveis de entrada consideradas como importantes na produção do biochar na etapa anterior, foram realizados experimentos em duplicata buscando identificar a influência das mesmas durante a produção do biochar.

3.2.1 Biomassa

Para a produção do biochar foram utilizadas amostras de cavaco de eucalipto Grandis e Citriodora coletados de empresas localizadas na região de Luiziana – PR e Tapira – PR, respectivamente.

A escolha dos tipos de eucalipto justifica-se uma vez que o tipo Citriodora possui densidade maior quando comparado ao tipo Grandis, podendo interferir na porosidade do produto final. Além disso, justifica-se o uso do eucalipto, uma vez que o setor de produção de carvão vegetal brasileiro utilizou eucalipto em 98,8% do total de carvão vegetal produzido com madeira originária de plantios florestais em 2016, segundo o IBGE (2017).

Por fim, justifica-se o uso de cavacos uma vez que devido ao seu tamanho auxiliará atingir uma carbonização homogênea do produto final. O cavaco é o termo utilizado na indústria madeireira para definir pequenos pedaços de madeira que podem ter tamanhos variáveis entre 5 a 50 mm oriundas de uma trituração.

3.2.2 Pré-tratamento

Os cavacos quando modificados por meio de compostos químicos, alteram suas propriedades físico-químicas, possibilitando por exemplo, que o carvão possua uma melhor capacidade de sorção (ZAMA et al., 2017).

Para isso, 16 das 24 amostras de eucalipto foram pesadas (400 g – capacidade das caixas metálicas) e secas durante 1 h à 100 ± 2 °C, visando a evaporação da água presente nas fibras da madeira em uma estufa, modelo 1.4, marca Odontobrás, localizada no Laboratório de Química Aplicada da Universidade

Estadual do Paraná – Campus de Campo Mourão. Em seguida, as amostras foram submersas durante 24h em soluções químicas preparadas com cloreto de ferro (FeCl_3) concentrado em 0,75% e 1,50% diluídos em água.

A secagem das amostras antes da imersão se justifica, uma vez que quanto menor a umidade presente nas fibras da madeira, maior será sua adsorção de solução química. Já o uso do FeCl_3 e os diferentes níveis de porcentagens é justificado uma vez que o produto é tratado na literatura como um ativante do carvão de menor custo comparado aos comumente utilizados (HUIDOBRO; PASTOR, 2001).

As 8 amostras que não passaram por processo de secagem e imersão, seguiram diretamente para a etapa de pirólise, sendo possível identificar se a modificação química altera ou não os resultados da porosidade final do produto.

3.2.3 Pirólise

O processo de pirólise foi realizado em escala laboratorial visando maior controle do processo. Os cavacos foram colocados em caixas metálicas alocadas em uma mufla (modelo 318.D.24 – marca Quimis) no Laboratório de Química Aplicada da Universidade Estadual do Paraná – Campus de Campo Mourão, metade das amostras (12) foram carbonizadas a 350 °C e o restante 500 °C durante 150 e 60 min respectivamente, até atingirem a carbonização completa. Finalizada a carbonização, os carvões permaneceram em temperatura ambiente até resfriarem e na sequência, foram embalados à vácuo, visando a preservação e minimização de possíveis alterações da umidade das amostras.

3.2.4 Codificação

Para facilitar a compreensão e leitura do estudo, foram criados códigos para cada uma das amostras, conforme Tabela 3.

Tabela 3- Nomenclaturas utilizadas para caracterização das amostras

Biomassa	Temperatura	Modificação química	Amostra	Códigos
Eucalipto Citriodora	350 °C	0,00 %	1	C350-0-1
			2	C350-0-2
		0,75 %	1	C350-0,75-1
			2	C350-0,75-2
		1,50 %	1	C350-1,5-1
			2	C350-1,5-2
	500 °C	0,00 %	1	C500-0-1
			2	C500-0-2
		0,75 %	1	C500-0,75-1
			2	C500-0,75-2
		1,50 %	1	C500-1,5-1
			2	C500-1,5-2
Eucalipto Grandis	350 °C	0,00 %	1	G350-0-1
			2	G350-0-2
		0,75 %	1	G350-0,75-1
			2	G350-0,75-2
		1,50 %	1	G350-1,5-1
			2	G350-1,5-2
	500 °C	0,00 %	1	G500-0-1
			2	G500-0-2
		0,75 %	1	G500-0,75-1
			2	G500-0,75-2
		1,50 %	1	G500-1,5-1
			2	G500-1,5-2

Fonte – Autor (2021)

Os códigos foram criados com base na letra inicial de cada uma das biomassas, seguida das temperaturas que foram utilizadas para a pirólise da madeira. O pré-tratamento também foi apresentado nas abreviações, com suas respectivas porcentagens utilizadas, e, por fim, o número da amostra, uma vez que estas foram realizadas em duplicatas.

3.3 CARACTERIZAÇÃO

3.3.1 Teor de Umidade

Para a determinação do teor de umidade das matérias-primas, foram separadas duas amostras de 15 g de cada eucalipto (Citriodora e Grandis), em seguida as mesmas foram submetidas a secagem em uma estufa de circulação (modelo 1.4, marca Odontobrás) a 100 ± 2 °C. Durante a secagem, a massa das

amostras foi verificada a cada 1 hora, até que atingissem massa constante ou até que ocorresse uma variação, entre duas medidas consecutivas, menor ou igual a 0,5% da última massa medida, aproximadamente 6 h. De posse da massa da amostra úmida e seca, é possível determinar o teor de umidade através da Equação 1.

$$\%U = \frac{m_1 - m_2}{m} \times 100 \quad (1)$$

Onde:

U- teor de umidade em %.

m_1 - massa do cadinho + massa da amostra antes da secagem (g).

m_2 - massa do cadinho + massa da amostra após a secagem (g).

m- massa da amostra antes da secagem (g).

Para a determinação do teor de umidade do carvão produzido, as amostras de carvão foram moídas e passadas em uma Peneira Tyler 20, com abertura 0,85 mm, visando padronização das amostras. Com o auxílio de uma balança analítica Shimadzu AW220, foi pesado um grama da amostra em um cadinho sem tampa previamente tratado, e colocado em uma estufa a 100 ± 2 °C durante 1 h. Na sequência, o cadinho foi retirado da estufa e colocado em um dessecador até que atingisse temperatura ambiente, aproximadamente 20 minutos. Em seguida, a amostra foi novamente pesada, e calculada a partir da Equação (1).

3.3.2 Caracterização da Porosidade

Para avaliar a estrutura porosa do material, foi utilizado o *software* IMAGEJ e a manipulação das imagens foi realizada seguindo a metodologia proposta por Gomes (2019), dividida em 5 etapas conforme descritas a seguir.

3.3.2.1 Aquisição da imagem

No campo científico, as imagens digitais são amostras de informações, e para serem adquiridas são utilizados equipamentos fornecedores de imagem. Nesse contexto, a morfologia das amostras foi identificada através da microscopia eletrônica

de varredura (MEV) no laboratório C²MMA (Centro de Caracterização Multiusuário em Pesquisa e Desenvolvimento de Materiais) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – Campus de Ponta Grossa, utilizando o equipamento da marca Tescan, modelo Vega 3. As amostras de carvão foram dispostas em *stubs* de alumínio, com fita adesiva de carbono e foram metalizadas por deposição de íons metálicos de ouro (Au) para aumentar a condutividade elétrica, com metalizador Quorum, modelo SC7620. As imagens foram geradas por elétrons secundários com voltagens de 20 kV. A metalização foi realizada visando tornar as amostras condutoras, e conseqüentemente, originar imagens com boa resolução no MEV.

Após metalizadas, as amostras foram dispostas no equipamento Vega 3 para a captura das imagens. Nessa etapa, focou-se em encontrar regiões em que o carvão apresentasse a porosidade aparente e definida. Na Figura 5, pode-se visualizar uma das amostras em ampliação de 200x, 500x e 1000x. Para uma melhor visualização das imagens, foi necessário ampliar o brilho e o contraste das imagens.

Figura 5 - Aquisição da imagem a partir do MEV

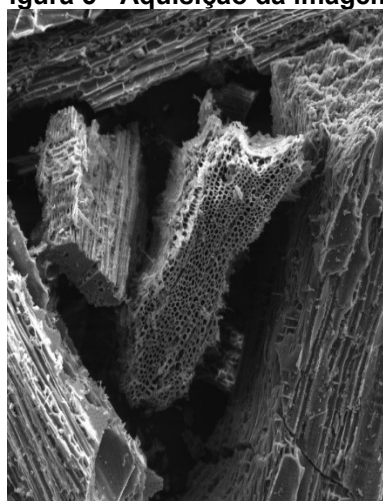


Figura 5a. Amostra com ampliação de 200x

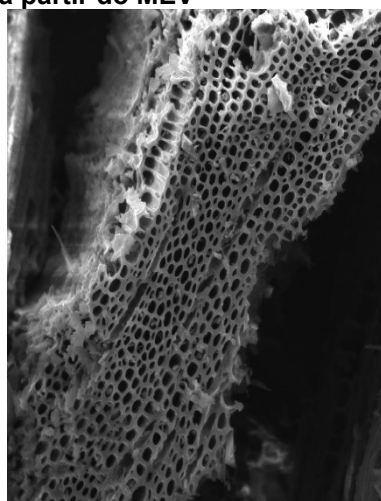


Figura 5b. Amostra com ampliação de 500x

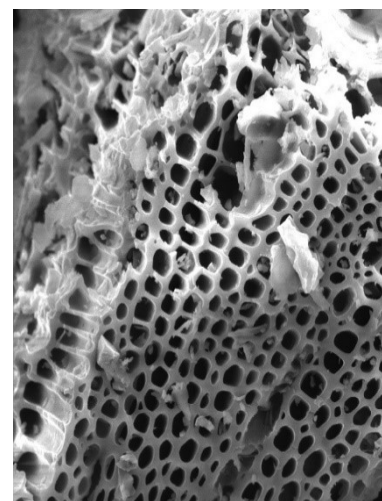


Figura 5c. Amostra com ampliação de 1000x

Fonte - Autor (2021)

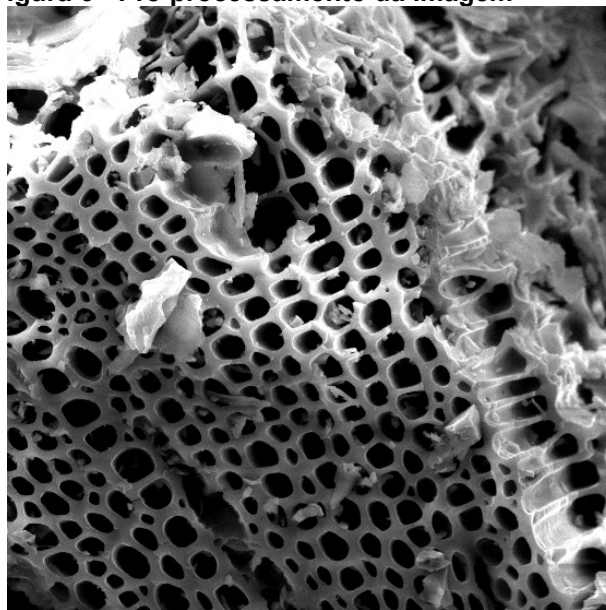
3.3.2.2 Pré-processamento

Antes de iniciar o processamento da imagem, inicialmente o *software* verifica se a imagem de entrada possui uma extensão válida (ex: PNJ, JPEG e TIFF), em seguida é necessário definir a escala da imagem, permitindo configurar e dimensionar

a mesma.

Inicialmente, a imagem foi convertida em tons de cinza de 8 bits e limiarizada aplicando o filtro de mediana, que permite substituir o valor de cinza do pixel pela mediana de si mesmo, apresentado na Figura 6.

Figura 6 - Pré-processamento da imagem

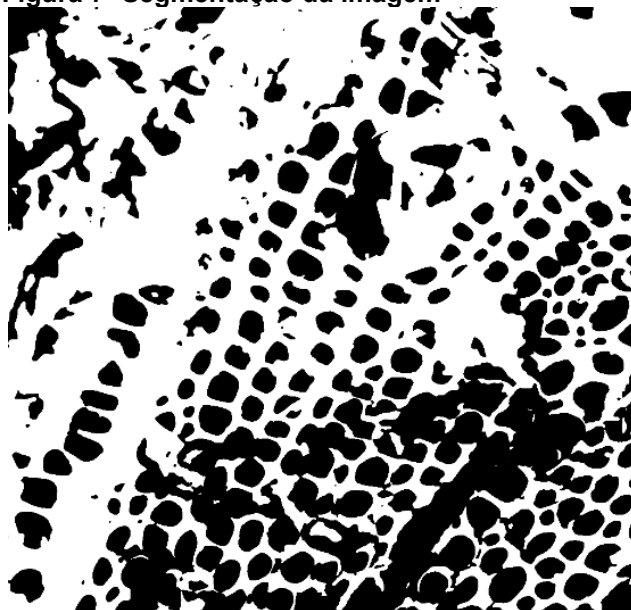


Fonte – Autor (2021)

3.3.2.3 Segmentação

A segmentação busca definir a região dos poros, ou seja, definir a região escura e excluir o fundo da imagem, para isso, utilizou-se a limiarização e *watershed*, resultando em uma imagem binarizada de modo isolar a região de interesse para análise (Figura 7). Para isso, foi aplicado o algoritmo de entropia cruzada de Li (1993), que comportou-se de maneira mais eficiente ao definir o limiar a ser utilizado para segmentar a porosidade.

Figura 7- Segmentação da imagem



Fonte- Autor (2021)

A segmentação Li é um método que utiliza entropia mínima cruzada, ou seja, a medida do conteúdo de informações das regiões de primeiro e segundo plano, a entropia cruzada procura o limiar comparando a imagem original com sua versão segmentada, binarizada (LI, 1993).

3.3.2.4 Extração de atributos

Essa etapa consiste na rotulação, em que o *software* enumera cada poro, ou seja, cada ponto escuro, objetivando determinar suas características: área, perímetro e forma. A Figura 8 ilustra o processo de rotulagem.

Figura 8 - Extração de atributos

Fonte – Autor (2021)

A partir da Figura 8, é possível verificar que os poros (pontos escuros) possuem rótulos, ou seja, números, que permitem que na próxima etapa seja classificado um a um a partir de área, perímetro e forma.

3.3.2.5 Classificação

Após rotulados, o *software* calcula a quantidade e a densidade dos tamanhos dos poros presentes na imagem, para posteriormente, classifica-lo em macro, meso e microporos.

3.3.3 Análise Estatística da Porosidade

Para identificação da influência da biomassa, temperatura de pirólise e modificação química na porosidade final das amostras produzidas, os resultados da análise da porosidade foram processados a partir do *software* livre R, versão 4.0,

criado por Ross e Robert, este é muito utilizado para manipulação, análise e visualização de dados.

Inicialmente, foi realizado o teste de normalidade Shapiro-Wilk, que testa a hipótese nula que a quantidade e a área de microporos e mesoporos possui distribuição normal ($p > 0,05$). Para testar as médias dos grupos, são realizados testes paramétricos, neste caso a Análise de Variância (ANOVA).

A ANOVA, busca comparar a média dos tratamentos de temperatura, biomassa e modificação química visando identificar a influência destes na porosidade do carvão, identificando assim, se as mesmas diferem significativamente entre elas. Para testar estatisticamente quais tratamentos são diferentes foi realizado o teste de Tukey.

O teste Tukey é um dos testes de comparação de média mais utilizados, por ser bastante rigoroso e fácil aplicação, tendo como base a DMS (diferença mínima significativa)

Quando os dados não apresentam normalidade ($p < 0,05$), são realizados testes não paramétricos para avaliar as medianas. O teste Kruskal-Wallis, avalia as diferenças entre os tratamentos independentemente em uma única variável contínua não distribuída normalmente.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Esta seção tem por objetivo apresentar e discutir os resultados encontrados ao longo da realização desta pesquisa.

4.1 IDENTIFICAÇÃO DE CARACTERÍSTICAS

Realizada a leitura dos artigos que compõem a Revisão Bibliográfica Sistemática (RBS), foram elencadas as características que os autores julgavam importantes para a utilização do uso do biochar na agricultura conforme apresentado no Quadro 1.

Quadro 1- Características citadas pelos autores

		(continua)
Característica	Autor (es)	Frequência de citações (F)
Temperatura de pirólise	Albuquerque et al. (2013); Boostani et al. (2019); Carey; McNamara; Zitomer, (2015); Chen et al. (2017); Chu et al. (2018); Domingues et al. (2017); Hamzah et al. (2013); Kah et al. (2016); Nelissen et al. (2014); Novais et al. (2018); Pandit et al. (2017); Santos et al. (2019); Schreiter; Schmidt; Schüth (2018); Shang et al. (2018); Taskin et al. (2019); Uttran et al. (2018); Xu et al. (2016); Zhang et al. (2016); Zhang; Voroney; Price (2017), e; Lévesque et al. (2018)	20
Biomassa	Boostani et al. (2019); Carey; McNamara; Zitomer, (2015); Chen et al. (2017); Chu et al. (2018); Domingues et al. (2017); Hamzah et al. (2013); Kah et al. (2016); Lévesque et al. (2018); Liu et al. (2016); Nelissen et al. (2014); Novais et al. (2018); Santos et al. (2019); Schreiter; Schmidt; Schüth (2018); Shang et al. (2018); Taskin et al. (2019); Uttran et al. (2018); Yang et al. (2017), e; Zhang et al. (2016)	18
Capacidade adsortiva	Bornø, Müller-Stöver; Liu (2018); Carey; McNamara; Zitomer (2015); Chen et al. (2018); Chu et al. (2018); Liu et al. (2016); Liu; Shen; Qi (2019); Novais et al. (2018); Oh et al. (2014); Pandit et al. (2017); Schreiter; Schmidt; Schüth (2018); Shang et al. (2018); Taskin et al. (2019); Uttran et al. (2018); Zhang et al. (2016), e; Zhang; Voroney; Price (2017)	15
Porosidade	Albuquerque et al. (2013); Boostani et al. (2019); Bornø, Müller-Stöver; Liu (2018); Cai et al. (2016); Chen et al. (2017); Chu et al. (2018); Kah et al. (2016); Novais et al. (2018); Oh et al. (2014); Pandit et al. (2017); Schreiter; Schmidt; Schüth (2018); Taskin et al. (2019), e; Uttran et al. (2018)	13

Quadro 1- Características citadas pelos autores

Característica	Autor (es)	(conclusão)
		Frequência de citações (F)
Fornecimento direto de nutrientes	Albuquerque et al. (2013); Bornø, Müller-Stöver; Liu (2018); Dari et al. (2016); Domingues et al. (2017); Santos et al. (2019); Lustosa Filho et al. (2019); Oh et al. (2014); Taskin et al. (2019), e; Uttran et al. (2018)	9
pH	Bornø, Müller-Stöver; Liu (2018); Lustosa Filho et al. (2019); Shang et al. (2018); Xu et al. (2016), e; Zhang; Voroney; Price (2017);	5
Capacidade de troca catiônica	Albuquerque et al. (2013); Bornø, Müller-Stöver; Liu (2018); Xu et al. (2016), e; Zhang; Voroney; Price (2017)	4
Tempo de pirólise	Albuquerque et al. (2013); Boostani et al. (2019), e; Hamzah et al. (2013)	3
Condutividade elétrica	Cai et al. (2016), e; Zhang et al. (2016)	2
Habitat de microrganismos	Albuquerque et al. (2013)	1
Composição química	Boostani et al. (2019)	1
Capacidade de troca aniônica	Bornø, Müller-Stöver; Liu (2018)	1
Cargas superficiais	Cai et al. (2016)	1

Fonte- Autor (2021).

Observando o Quadro 1, pode-se constatar que a biomassa (F=18) utilizada e a temperatura de pirólise (F=20) adotada durante o processo de produção, são geralmente considerados os fatores mais importantes para determinar as características finais do biochar. Essas características, por sua vez, irão determinar suas aplicações.

Os estudos apresentam que a capacidade adsortiva (F=15) do biochar está diretamente relacionada a biomassa e a temperatura de pirólise, além da porosidade (F=13) do produto final. Vale ressaltar que durante a análise dos artigos a área superficial e a porosidade foram consideradas a mesma característica, uma vez que estão diretamente relacionadas.

Outras características como fornecimento direto de nutrientes; pH; capacidade de troca catiônica; tempo de pirólise; condutividade elétrica; habitat de microrganismos; composição química; capacidade de troca aniônica, e; cargas superficiais são analisadas e caracterizadas pelos autores, no entanto os mesmos não apresentam sua importância para o produto final. Além disso, essas características estão diretamente relacionadas não apenas ao biochar, mas sim, as alterações que eles oferecem ao solo.

Sendo assim, pode-se concluir que para a utilização do biochar como fertilizante é necessário que anteriormente o mesmo esteja carregado de nutrientes. Quanto maior a capacidade adsortiva do biochar, mais nutrientes ele poderá adsorver para posterior liberação no solo e plantas.

No entanto, sua capacidade adsortiva está relacionada a sua porosidade. Diante disso, as variáveis de entrada consideradas neste estudo como mais importantes (temperatura e biomassa) foram determinadas com base na sua influência na porosidade do biochar.

Além disso, foi considerada como variável de entrada a modificação química, visando avaliar se esta contribui para uma maior capacidade de sorção.

4.2 TEOR DE UMIDADE

O teor de umidade da matéria (%U) corresponde à relação entre a massa da água nela contida e a massa da madeira seca, os resultados da umidade das matérias-primas encontram-se na Tabela 4.

Tabela 4 - Teor de umidade da matéria-prima

EUCALIPTO	TEOR DE UMIDADE (%)	Média %U
Grandis	26,67	23,33
	20,00	
Citriodora	26,67	30
	33,33	

Fonte- Autor (2021)

O eucalipto Grandis e Citriodora utilizados apresentaram teor médio de umidade de 23,33 e 30 % respectivamente, segundo Valente (1986) o ideal, é que a madeira tenha em 20-30% de umidade para ser utilizada na produção de carvão. Para Oliveira (2012) o uso de madeiras com teor de umidade acima de 30% aumenta a exigência de energia (fase endotérmica) necessária à evaporação da água e que, para isto, uma parte maior da madeira enfiada será consumida, além disso, uma madeira com muita umidade afeta diretamente o rendimento e qualidade do carvão vegetal.

Já, a umidade das amostras de carvão foi calculada a partir da Equação (1), os resultados estão apresentados na Tabela 5.

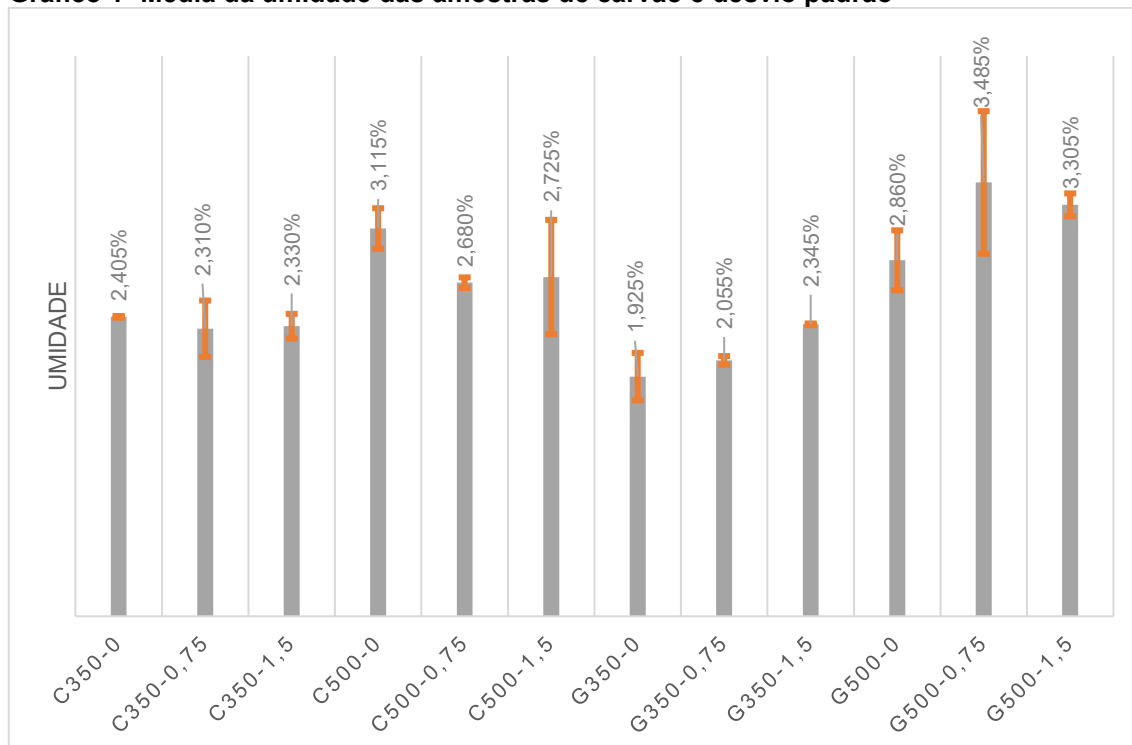
Tabela 5- Teor de umidade das amostras de carvão

AMOSTRA	TEOR DE UMIDADE
C350-0-1	2,40%
C350-0-2	2,41%
C350-0,75-1	2,15%
C350-0,75-2	2,47%
C350-1,5-1	2,26%
C350-1,5-2	2,40%
C500-0-1	3,23%
C500-0-2	3,00%
C500-0,75-1	2,71%
C500-0,75-2	2,65%
C500-1,5-1	3,05%
C500-1,5-2	2,40%
G350-0-1	2,06%
G350-0-2	1,79%
G350-0,75-1	2,03%
G350-0,75-2	2,08%
G350-1,5-1	2,34%
G350-1,5-2	2,35%
G500-0-1	3,03%
G500-0-2	2,69%
G500-0,75-1	3,08%
G500-0,75-2	3,89%
G500-1,5-1	3,24%
G500-1,5-2	3,37%

Fonte – Autor (2021)

A partir dos dados da Tabela 5, foi possível construir o Gráfico 1 com a média da umidade das amostras e o desvio padrão das mesmas.

Gráfico 1- Média da umidade das amostras de carvão e desvio padrão



Fonte – Autor (2021)

A partir do Gráfico 1, pode-se observar que a média das umidades variam entre 1,925 e 3,485%. Para Picancio (2011) a umidade do carvão deve ser de no máximo 8%.

Observa-se que a umidade das amostras produzidas a partir do eucalipto Grandis e Citriodora apresentaram tendência de crescimento para a condição de pirólise a 500 °C.

Porém ao comparar as amostras par a par, ou seja, C350-0 com G350-0, C350-0,75 com G350-0,75 e C350-1,5 com G350-1,5, as amostras de eucalipto Grandis possui menor umidade. Porém, ao fazer a mesma análise com as amostras pirolisadas a 500 °C a umidade se manteve estável.

No que se refere as modificações químicas, avaliando as amostras produzidas a partir da mesma biomassa e temperatura, a umidade não apresentou alterações significativas.

Pode-se observar que ao avaliar as variáveis de entrada separadamente, algumas amostras tendem a apresentar menor ou maior umidade, no entanto as mesmas estão dentro do limite máximo de 8%. Um baixo teor de umidade, é de suma importância para a futura adsorção de nutrientes,

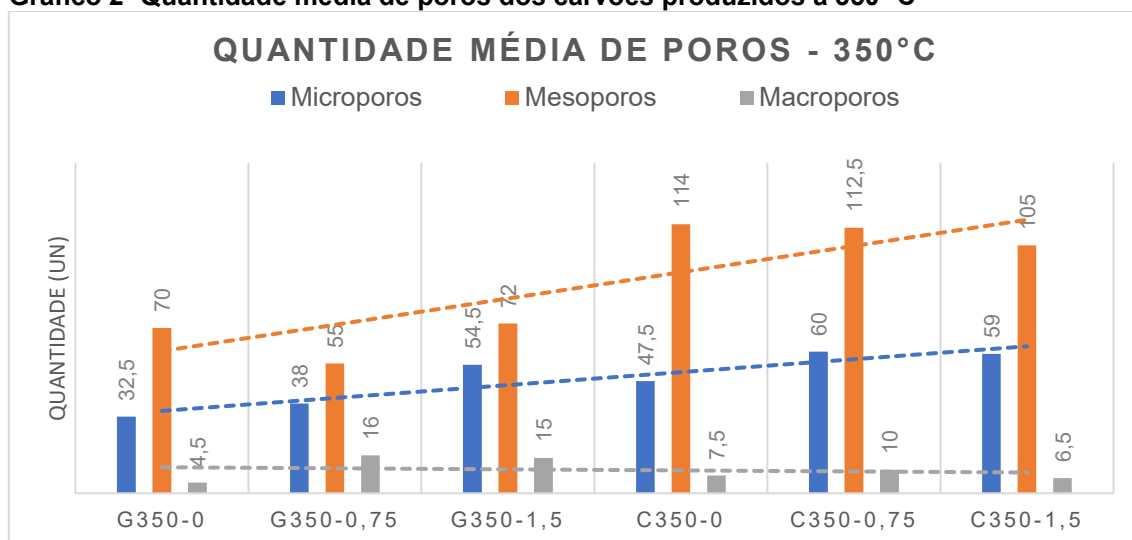
necessário para o uso do biochar na agricultura.

4.3 ANÁLISE DA POROSIDADE

O processamento das imagens das amostras dos carvões foi realizado, o Quadro 6 no Apêndice B apresenta as figuras com o processamento digital da imagem de cada amostra. As Tabelas 11 e 12 no Apêndice C apresentam os resultados das análises de porosidade obtidos a partir do processamento digital das imagens com o auxílio do *software ImageJ*, para as amostras de carvão Grandis e Citriodora, suas classificações (macro, meso e microporo), quantidade e área total de poros.

A partir do cálculo da quantidade média dos poros dos eucaliptos Grandis e Citriodora pirolisados a 350 °C realizado com o auxílio das Tabelas 11 e 12 foi possível construir o Gráfico 2 de barras, além de avaliar a tendência linear de comportamento das amostras. A tendência linear busca identificar uma linha que melhor se ajuste ao conjunto de dados apresentados, geralmente mostrando crescimento ou decrescimento a uma taxa constante, ou seja, o comportamento das variáveis.

Gráfico 2- Quantidade média de poros dos carvões produzidos a 350 °C



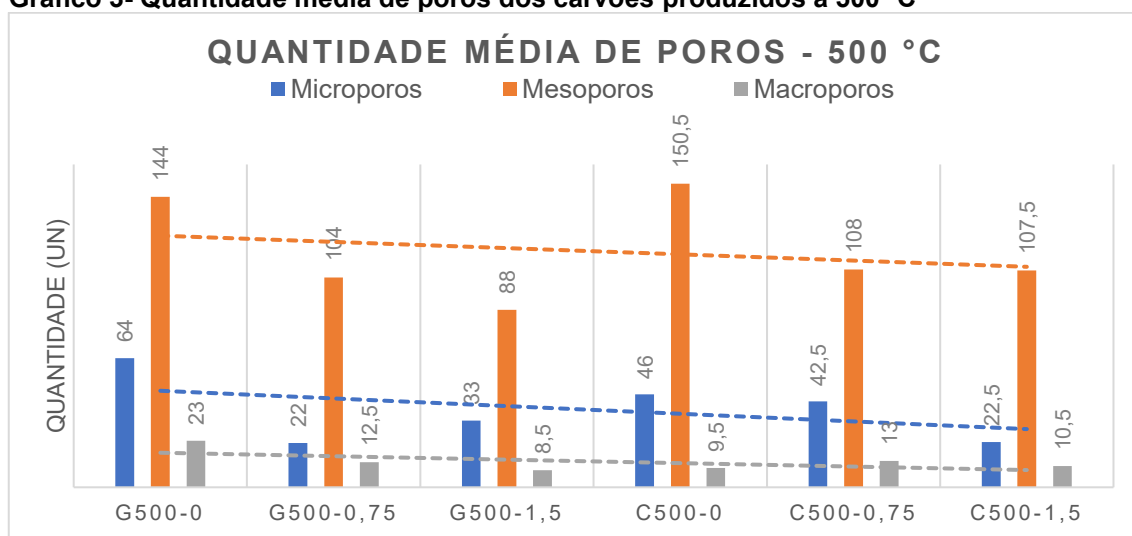
Fonte – Autor (2021)

Avaliando o Gráfico 2, pode-se observar que em geral os carvões produzidos a partir do eucalipto Citriodora apresentaram maior quantidade de

mesoporos, tanto sem modificação química, quanto com modificação química a 0,75 e 1,50 % de FeCl_3 . Em relação aos microporos, as amostras com modificação química de Citriodora apresentaram quantidade média superior quando compara as amostras de Grandis com as mesmas condições químicas. Porém, em relação aos macroporos os carvões produzidos a partir do eucalipto Grandis, com modificação química, apresentaram quantidade superior as amostras de Citriodora, com exceção da condição G350-0.

Para os carvões pirolisados a 500 °C foi possível elaborar o Gráfico 3.

Gráfico 3- Quantidade média de poros dos carvões produzidos a 500 °C

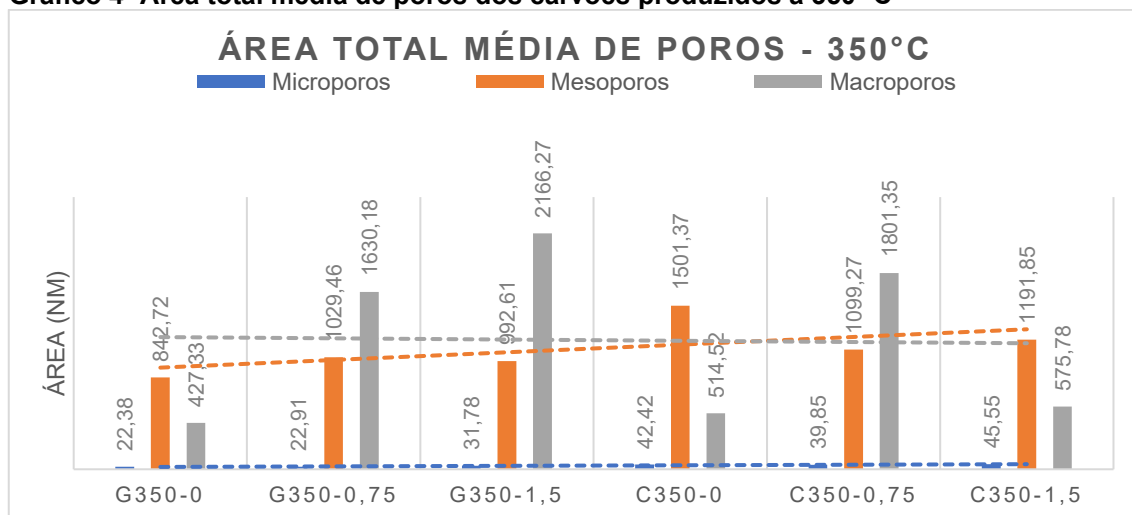


Fonte – Autor (2021)

No Gráfico 3, pode-se observar que os microporos presentes nos carvões produzidos a partir do eucalipto Grandis foi superior para as amostras sem modificação química e com modificação a 1,50 %. Já os mesoporos se apresentou em quantidade superior no eucalipto Citriodora. Analisando a quantidade de macroporos, o eucalipto Grandis se destaca com quantidade superior apenas quando produzido sem modificação química.

A partir das Tabelas 11 e 12, também foi possível calcular a média da área total de poros dos eucaliptos Grandis e Citriodora pirolisados a 350 °C, conforme apresentado no Gráfico 4.

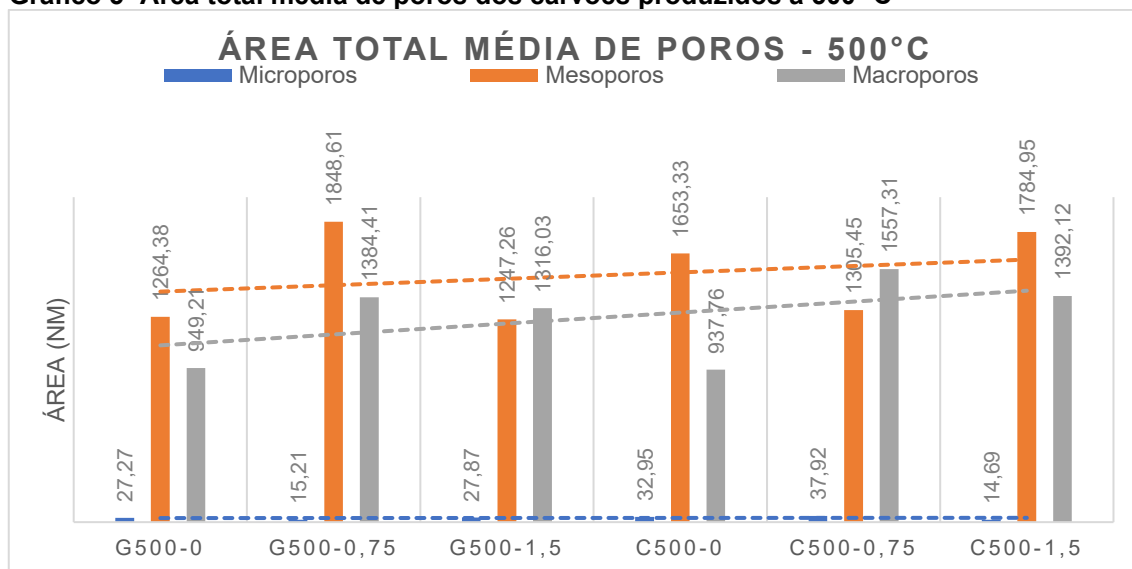
Gráfico 4- Área total média de poros dos carvões produzidos a 350 °C



Fonte – Autor (2021)

Observa-se no Gráfico 4 que, os micro e mesoporos dos eucaliptos Citriodora apresentaram maior área total média. Já para os macroporos, o eucalipto Citriodora só não apresenta maior área total média para a amostra com modificação química a 1,5%. Já a análise da área total média dos poros pirolisados a 500 °C pode ser observada a partir do Gráfico 5.

Gráfico 5- Área total média de poros dos carvões produzidos a 500 °C



Fonte – Autor (2021)

Pode-se verificar no Gráfico 5 que os microporos apresentam área total superior nos carvões produzidos a partir do eucalipto Citriodora para as amostras sem modificação química e com modificação a 0,75 %. Ao analisar as informações dos Gráficos 3 e 5 pode-se verificar que a amostra G500-0,75

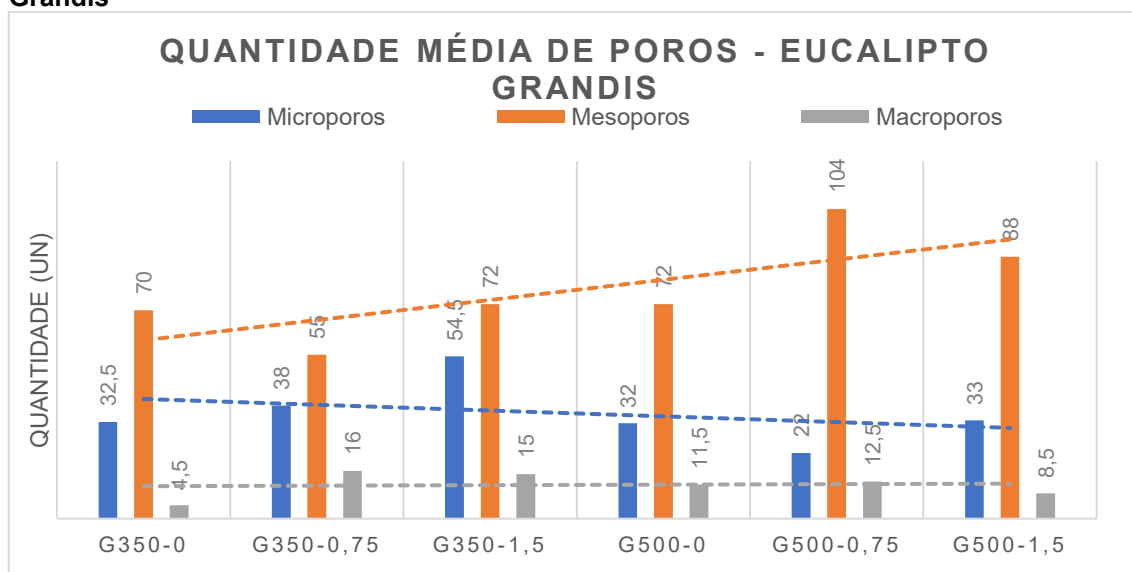
apresenta uma quantidade maior de microporos (64) quando comparado a amostra C500-0,75 que apresenta 46 microporos, porém ao verificar a área ocupada pelos mesmos pode-se perceber que apesar da amostra C500-0,75 possuir uma menor quantidade de poros, possui uma área de 5,68 nm maior que a amostra G500-0,75, ou seja, uma maior quantidade de poros não significa que a área total ocupada pelos mesmos seja proporcional, uma vez que os microporos podem variar de 0 à 2 nm.

Em relação aos mesoporos, as amostras de carvão Citriodora sem modificação e com modificação a 1,50% apresentaram maior área total. A amostra C500-0,75 (108 mesoporos) apesar de apresentar maior quantidade de poros quando comparada a G500-0,75 (104 mesoporos), apresentou área total menor. Por fim, em relação aos macroporos as amostras de Citriodora com modificação química apresentaram maior área total.

Avaliando de modo geral os Gráficos 2, 3, 4 e 5, pode-se observar que a maior quantidade e maior área total de poros tendem a apresentar resultados melhores com o eucalipto Citriodora. No Gráfico 3, a maior quantidade de poros tendem para o eucalipto Grandis, no entanto, sua área total avaliada no Gráfico 5 é menor quando comparada ao eucalipto Citriodora.

No que diz respeito exclusivamente ao tipo de eucalipto, foi possível construir o Gráfico 6 com a quantidade média de poros do eucalipto Grandis.

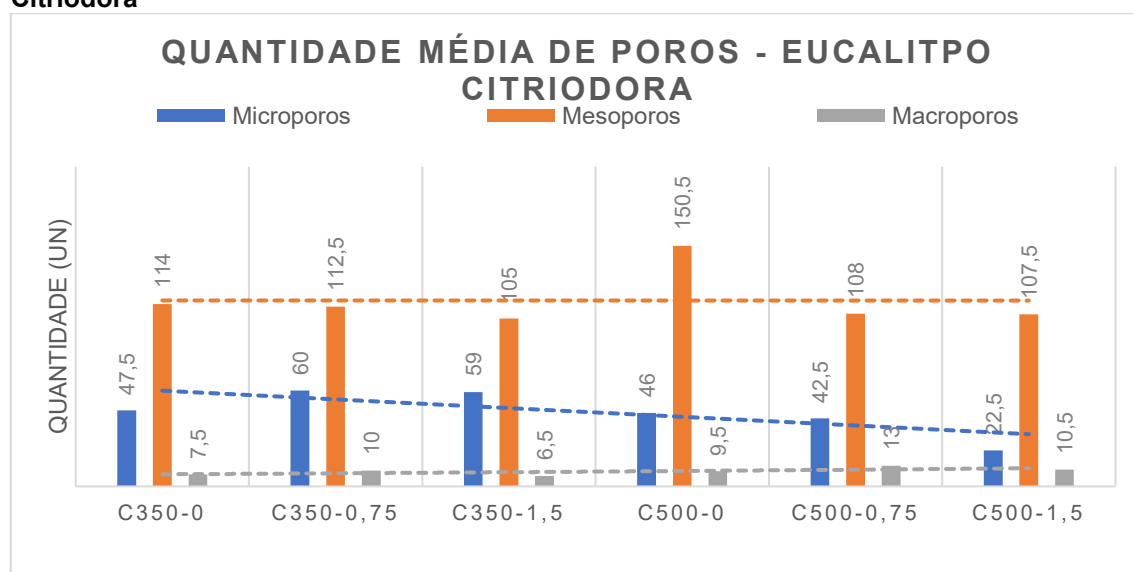
Gráfico 6- Quantidade média de poros dos carvões produzidos a partir do eucalipto Grandis



Fonte – Autor (2021)

A amostra G350-1,5 apresenta a maior quantidade de microporos, G500-0,75 de mesoporos e G350-0,75 de macroporos. No entanto, ao procurar identificar a amostra que apresentasse maior quantidade de micro e mesoporos que contribuem para adsorção de nutrientes, a amostra mais indicada seria a G350-1,5 com total de 126,5 poros. Já no que se refere ao eucalipto Citriodora, foi possível elaborar o Gráfico 7.

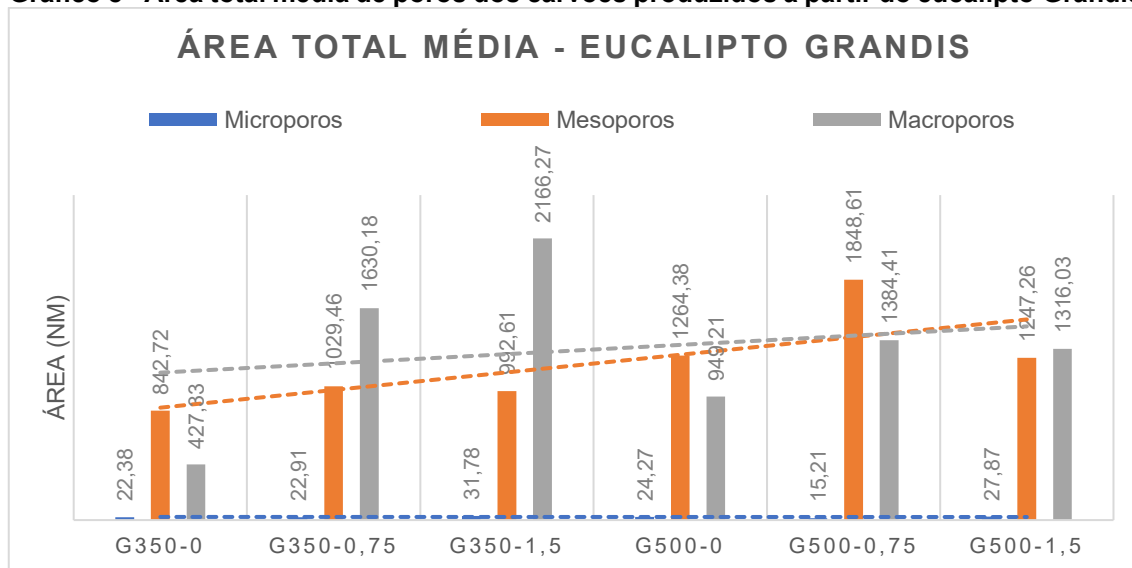
Gráfico 7- Quantidade média de poros dos carvões produzidos a partir do eucalipto Citriodora



Fonte – Autor (2021)

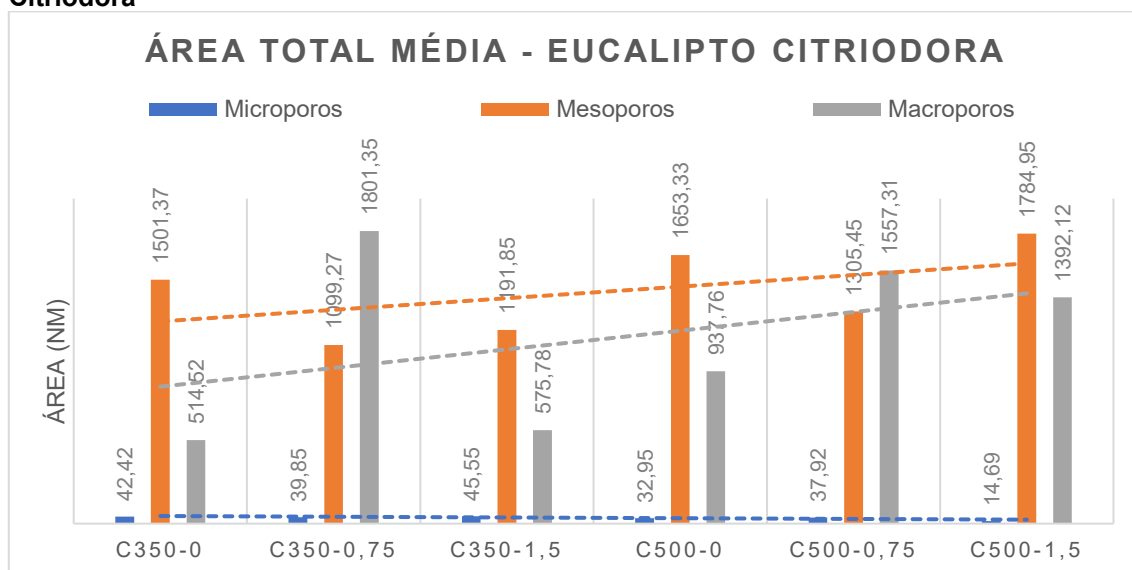
No Gráfico 7, observa-se que a amostra C350-0,75 apresenta a maior quantidade de microporos, C500-0 de mesoporos e C500-0,75 de macroporos. No entanto, avaliando uma perspectiva geral dos poros, é a amostra C500-0 que apresenta a maior quantidade de micro e mesoporos, com 196,5 poros.

No que se refere a área total média das amostras de eucalipto Grandis, foi elaborado o Gráfico 8.

Gráfico 8 - Área total média de poros dos carvões produzidos a partir do eucalipto Grandis

Fonte – Autor (2021)

Com base no Gráfico 8, pode-se constatar que a amostra G350-1,5 apresenta a maior área total de microporos, a amostra G500-0,75 de mesoporos e G350-1,5 de macroporos. Mas, ao avaliar a amostra que apresenta a maior área total média em relação a micro e mesoporos, se destaca a amostra G500-0,75, com total de 1.863,82 nm. Já no que se refere a área total média dos poros do eucalipto Citriodora, foi elaborado o Gráfico 9.

Gráfico 9- Área total média de poros dos carvões produzidos a partir do eucalipto Citriodora

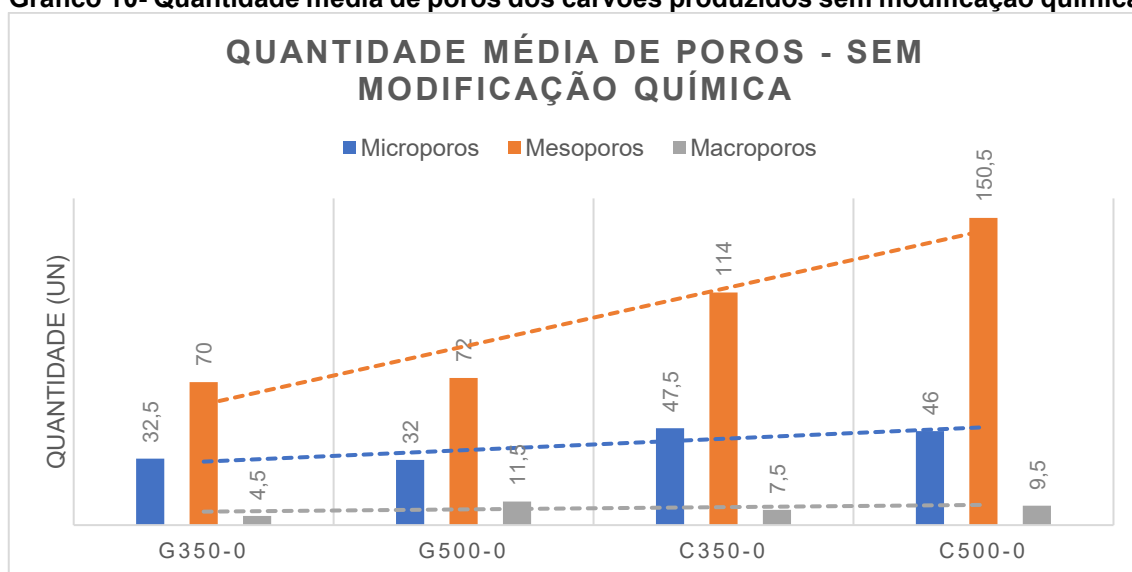
Fonte – Autor (2021)

No Gráfico 9, a amostra C350-1,5 se destaca com a maior área total de microporos, C500-1,5 de mesoporos e C350-0,75 de macroporos. Se destacando numa área geral de micro e mesoporos, a amostra C500-1,5.

Avaliando de modo geral os gráficos 6, 7, 8 e 9, pode-se observar que a maior quantidade e a maior área total de poros tendem a apresentar melhores resultados quando os carvões são pirolisados a 500 °C. O Gráfico 6 tende a apresentar melhores resultados para quantidade de microporos, já o Gráfico 7 apresenta melhores resultados para quantidade de micro e mesoporos, ambos para carbonização a 350 °C. No entanto, ao avaliar a área total para as mesmas condições observa-se que as amostras carbonizadas a 500 °C apresentam área total superior.

Avaliando a modificação química, foi possível construir o Gráfico 10 com a quantidade média de poros dos carvões produzidos sem modificação química.

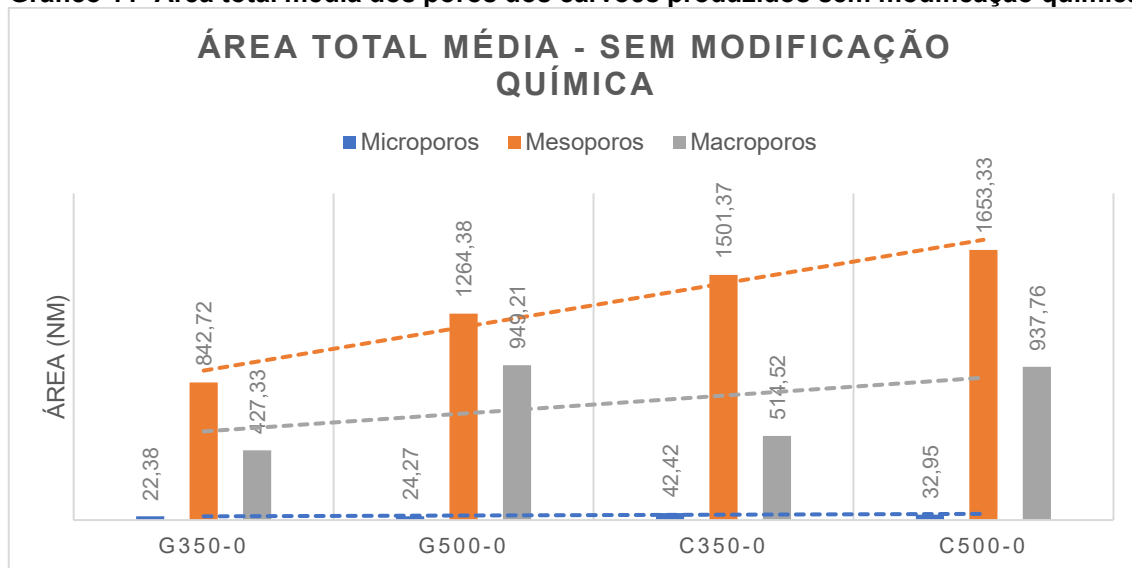
Gráfico 10- Quantidade média de poros dos carvões produzidos sem modificação química



Fonte – Autor (2021)

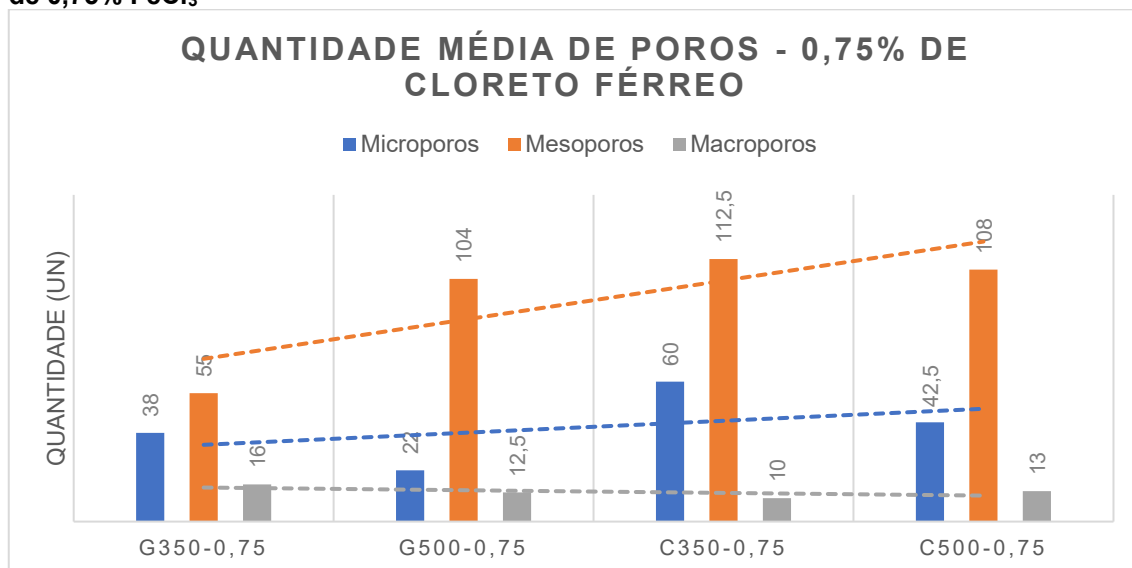
A partir do Gráfico 10, pode-se observar que a amostra C350-0 apresenta maior quantidade de microporos, C500-0 de mesoporos e G500-0 de macroporos. Já no que se refere a área total média dos carvões produzidos sem modificação, foi elaborado o Gráfico 11.

Gráfico 11- Área total média dos poros dos carvões produzidos sem modificação química



Fonte – Autor (2021)

Observando o Gráfico 11, nota-se que para este caso a área total média dos poros segue o mesmo padrão da quantidade de poros, em que C350-0 apresenta maior área total de microporos, C500-0 de mesoporos e G500-0 de macroporos. No que se refere a quantidade das amostras produzidas com modificação a 0,75% de FeCl_3 , foi construído o Gráfico 12.

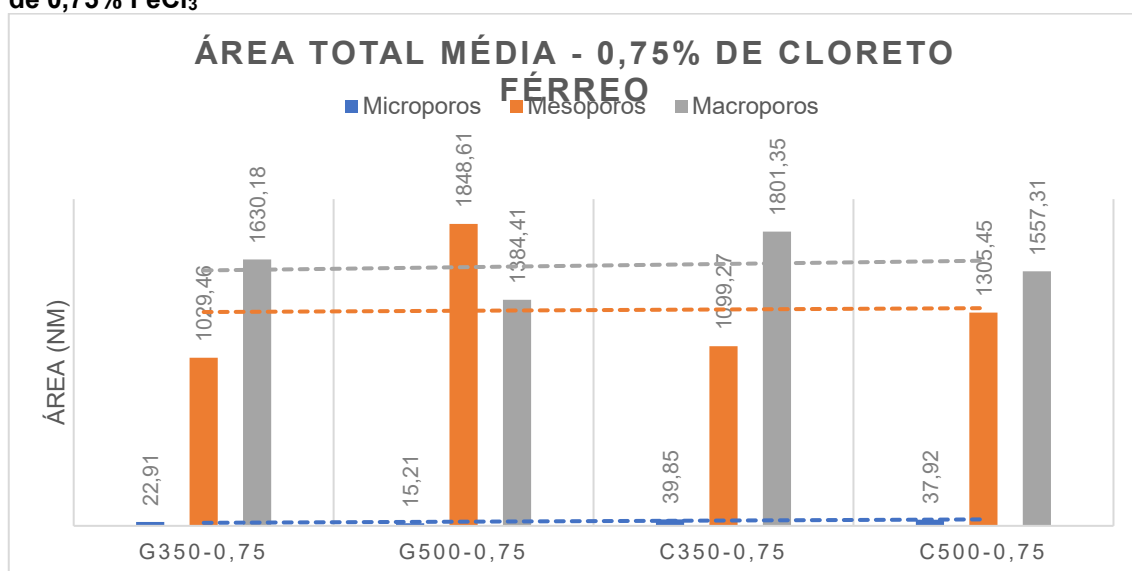
Gráfico 12- Quantidade média de poros dos carvões produzidos com modificação química de 0,75% FeCl_3 

Fonte – Autor(2021)

Observa-se no Gráfico 12 que a amostra C350-0,75 apresentou maior

quantidade de micro e mesoporos, porém ao comparar tais quantidades com a mesma amostra sem modificação química (Gráfico 10), nota-se que a amostra C350-0 apresenta maior número de mesoporos. No que se refere a área total média dos carvões com modificação a 0,75% foi construído o Gráfico 13.

Gráfico 13- Área total média de poros dos carvões produzidos com modificação química de 0,75% FeCl₃

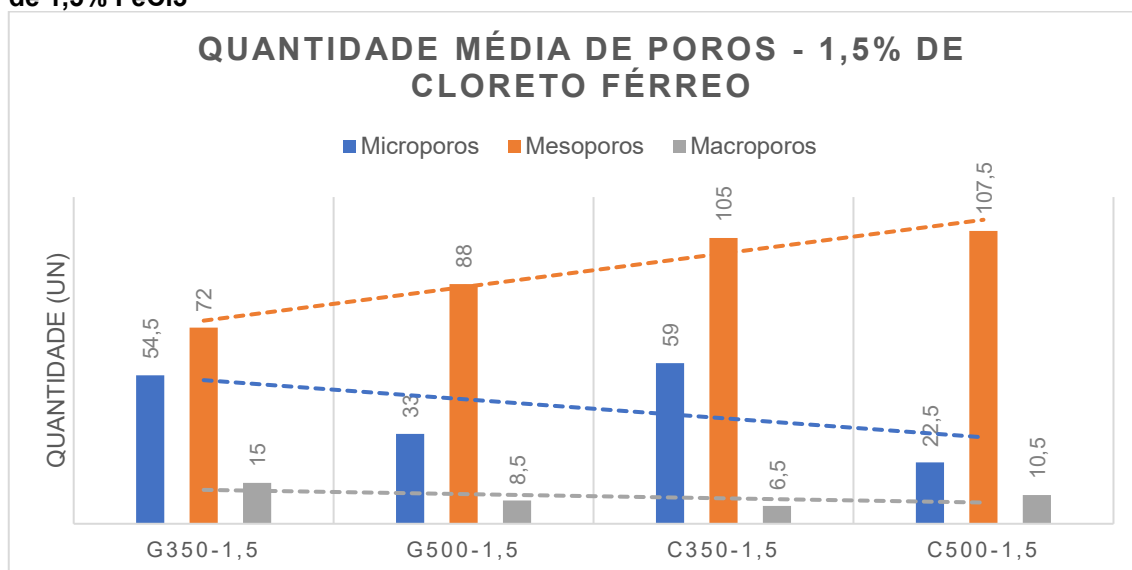


Fonte- Autor (2021)

Observa-se que a amostra C350-0,75 apresenta a maior área total média para os microporos. No que se refere aos mesoporos se destaca a amostra G500-0,75 que possui a maior área total média, diferente da maior quantidade de poros apresentada no Gráfico 12 para as mesmas condições de produção, em que a amostra C350-0,75 apresentou maior número de mesoporos.

Ao avaliar a quantidade média dos poros dos carvões produzidos com modificação de 1,5% de FeCl₃, foi construído o Gráfico 14.

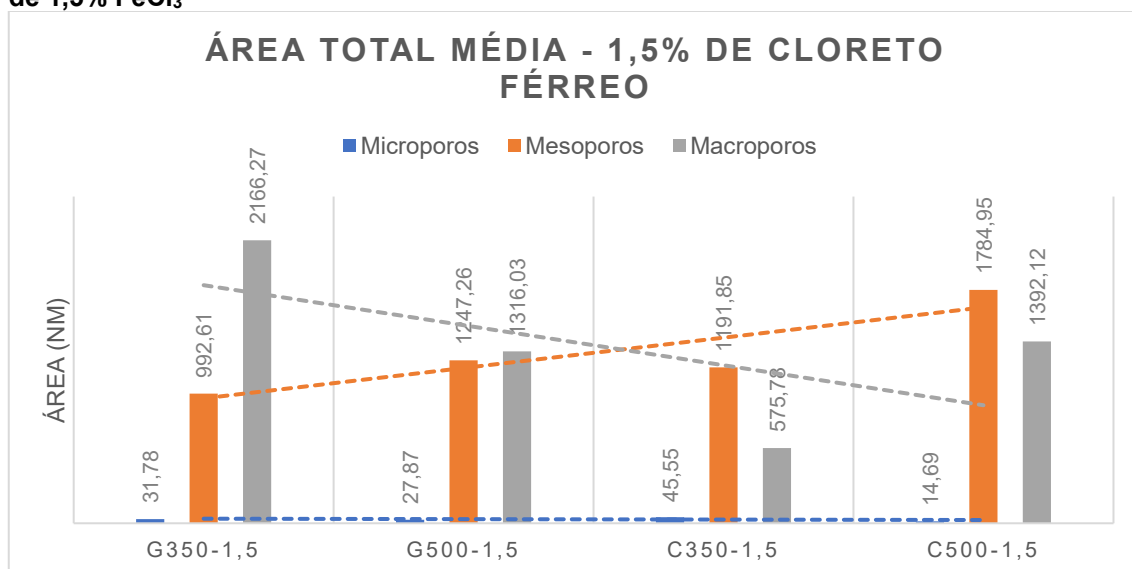
Gráfico 14- Quantidade média de poros dos carvões produzidos com modificação química de 1,5% FeCl₃



Fonte- Autor (2021)

A partir do Gráfico 14, pode-se observar que a amostra C350-1,5 apresenta maior quantidade de microporos e C500-1,5 de mesoporos, porém inferior as mesmas amostras do Gráfico 12, ou seja, o aumento do cloreto férrico de 0,75% para 1,5% não fez com que aumentasse a quantidade de poros. Já no que se refere a área total média, foi elaborado o Gráfico 15.

Gráfico 15- Área total média de poros dos carvões produzidos com modificação química de 1,5% FeCl₃



Fonte- Autor (2021)

Observa-se que a amostra C350-1,5 apresenta a maior área total média

de microporos, e C500-1,5 de mesoporos, seguindo o mesmo padrão para as quantidade das mesmas amostras.

Analisando os Gráficos 10, 11, 12, 13, 14 e 15, pode-se observar que independentemente da modificação química as amostras de Citriodora pirolisadas a 350 °C apresentam maior quantidade e maior área total de microporos, já no que se refere aos mesoporos, as amostras de Citriodora pirolisadas a 500 °C apresentaram resultados superiores. Ao avaliar a modificação química, observa-se que as amostras com 1,5% de FeCl₃ tendem a apresentar melhores resultados para a área total de micro e mesoporos, já no que tange a quantidade de poros, as amostras sem modificação química apresentam maior quantidade de mesoporos, e com 0,75% de FeCl₃, maior quantidade de microporos. No entanto, ao comparar a quantidade de microporos das amostras com 0,75% e 1,5%, estes não apresentam tendência.

Por fim, no que se refere a área de poros observa-se as amostras produzidas a partir do eucalipto Citriodora carbonizado a 500 °C apresentaram melhores resultados, no entanto ao avaliar a quantidade de poros, a carbonização realizada a 350 °C apresentou melhores resultados. Já no que se refere as modificações química, as amostras com 1,5% de FeCl₃ apresentaram maior área total de micro e mesoporos, as amostras sem modificação a maior quantidade de mesoporos e com 0,75% de microporos. Como as variáveis de entrada não são as mesmas ao comparar quantidade de poros e área total, foi realizada uma análise estatística buscando identificar a melhor condição de produção que retorne a maior quantidade e área total de poros.

➤ ANÁLISE ESTATÍSTICA DA POROSIDADE

Visando identificar se a biomassa, temperatura e modificação química possuem significancia estatística na porosidade do carvão, os dados das Tabelas 11 e 12, Apêndice C, foram processados no *software* R. Os macroporos não foram analisados, uma vez que estes servem apenas como meio de transporte não influenciando na adsorção de materiais.

Primeiramente, para análise da quantidade e área de microporos, foi realizado o teste de normalidade Shapiro-wilk, os resultados estão apresentados na Tabela 6.

Tabela 6 - Teste de normalidade Shapiro-Wilk para microporos

	Quantidade de microporos	Área de microporos
w	0.89983	0,84866
p-value	0.02134	0,002065

Fonte – Autor (2021)

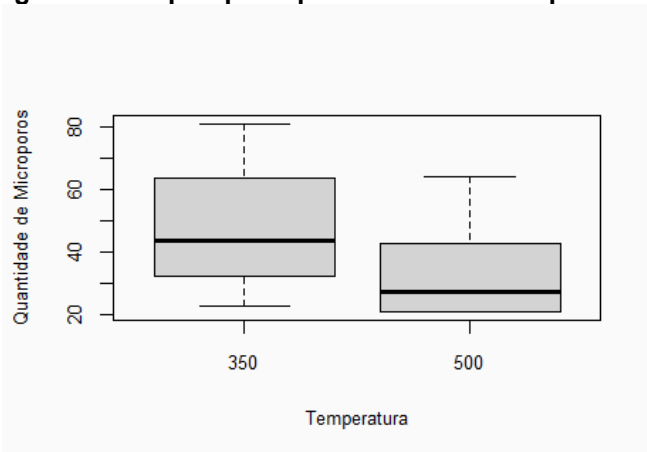
O teste Shapiro indica distribuição não normal tanto para quantidade quanto para área de microporos, pois $p\text{-value} < 0,05$, logo foi necessário a realização de um teste não paramétrico, Kruskal-Wallis (Tabela 7).

Tabela 7 - Teste de Kruskal-Wallis

	Quantidade de microporos			Área de microporos		
	chi-squared	df	p-value	chi-squared	df	p-value
Biomassa	1,479	1	0,2239	1,3333	1	0,2482
Modificação química	0,19619	2	0,9066	0,54	2	0,7634
Temperatura	4,3465	1	0,03709	2,2533	1	0,1333

Fonte – Autor (2021)

Pode-se observar na Tabela 7, no que se refere a área de microporos que nenhuma variável de entrada influencia nas médias, pois $p\text{-value} > 0,05$ para biomassa, modificação química e temperatura. No entanto o teste Kruskal-Wallis apresenta resultado significativo para a temperatura quando se trata da quantidade de microporos, de modo que as médias de quantidade microporos diferiram-se para as temperaturas. Para visualizar os valores discrepantes (outliers), foi gerado o bloxplot da Figura 9 .

Figura 9 - Boxplot para quantidade de microporos

Fonte – Autor (2021)

O *boxplot* demonstra a mediana com a amplitude e quantidade das médias dos tratamento de temperatura. Pode-se observar que a menor temperatura (350 °C), afeta significativamente a quantidade de microporos.

Para análise da área e quantidade de mesoporos, inicialmente foi aplicado o teste de normalidade Shapiro-wilk (Tabela 8).

Tabela 8 - Teste de normalidade Shapiro-wilk para mesoporos

	<u>Quantidade de mesoporos</u>	<u>Área de mesoporos</u>
w	0,95105	0,92604
p-value	0,2855	0,07955

Fonte – Autor (2021)

O Teste Shapiro indica distribuição normal tanto para quantidade quanto para a área de mesoporos, uma vez que $p\text{-value} > 0,05$. Logo, foram realizados testes paramétricos, como Anova e Tukey. A análise de variância foi realizada com objetivo de identificar quais fatores afetam as variáveis resposta tanto para área de mesoporos (Tabela 9) quanto para a quantidade dos mesoporos (Tabela 10).

Tabela 9 - Análise de variância para área de mesoporos

	Df	Sum sq	Mean sq	F value	P value
Biomassa	1	286537	286537	1.1662	0.29620
Temperatura	1	997723	997723	4.0607	0.06101
Mod. química	1	510	510	0.0021	0.96424
Biomassa: Temperatura	1	49363	49363	0.2009	0.66000
Biomassa: Mod química	1	24130	24130	0.0982	0.75804
Temperatura: Mod. química	1	18789	18789	0.0765	0.78568
Biomassa: Temperatura: Mod. química	1	92463	92463	0.3763	0.54820
Residuais	16	3931252	245703		

Fonte- Autor (2021)

A análise de variância da Tabela 9 indica que nenhuma variável avaliada individualmente ou em conjunto apresentou efeito significativo para área de mesoporos, pois p-value > 0.05, de modo a não necessitar-se realizar o teste de médias.

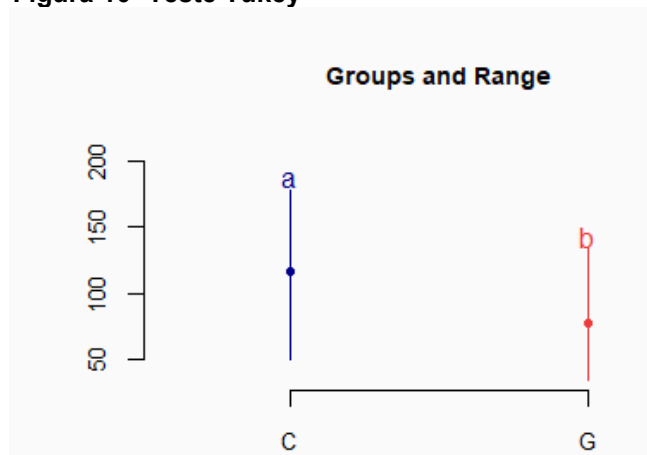
Tabela 10 - Análise de variância para quantidade de mesoporos

	Df	Sum sq	Mean sq	F value	P value
Biomassa	1	9322	9322.0	5.6346	0.03047
Temperatura	1	1717	1717.0	1.0378	0.32348
Mod. química	1	289	289.0	0.1747	0.68154
Biomassa: Temperatura	1	176	176.0	0.1064	0.74850
Biomassa: Mod química	1	1225	1225.0	0.7404	0.40223
Temperatura: Mod. química	1	100	100.0	0.0604	0.80892
Biomassa: Temperatura: Mod. química	1	576	576.0	0.3482	0.56340
Residuais	16	26741	1654.4		

Fonte- Autor (2021)

Observa-se na Tabela 10, que para a quantidade de Mesoporos o efeito significativo foi a espécie de eucalipto, como a distribuição é normal foi utilizado o teste Tukey (Figura 10) para demonstrar qual tratamento apresenta a maior quantidade de mesoporos como resposta.

Figura 10- Teste Tukey



Fonte – Autor (2021)

Pelo Teste Tukey constatou-se que o eucalipto Citriodora apresentou maior quantidade de Mesoporos como variável resposta. Pode-se constatar que o eucalipto Citriodora carbonizado a 350 °C sem modificações químicas são estatisticamente significativos para alcançar a maior quantidade de micro e mesoporos possível que contribuem para alta capacidade de adsorção de moléculas pequenas e grandes respectivamente. No entanto, os dados das variáveis de entrada utilizados para as análises estatísticas eram em duplicatas, para obter-se um resultado com maior veracidade das informações apresentadas, sugere-se repetí-lo utilizando um maior grupo de dados.

4.4 IDENTIFICAÇÃO DOS PARÂMETROS DE PRODUÇÃO DO BIOCHAR

A partir da análise de tendência apresentada nos Gráficos 2 à 15, pode-se constatar que o eucalipto Citriodora carbonizado a 500 °C tendem a apresentar a maior quantidade de poros e maior área total. No que diz respeito as modificações químicas, observa-se que as amostras com 1,5% de FeCl₃ tendem a apresentar melhores resultados para a área total de micro e mesoporos, já no que tange a quantidade de poros, as amostras sem modificação química apresentam maior quantidade de mesoporos

No que diz respeito as análises estatísticas, foi possível identificar com a ANOVA e com o teste Kruskal-Wallis que a área tanto dos microporos quanto dos mesoporos não sofrem influência de nenhum dos fatores avaliados

(biomassa, temperatura de pirólise e modificação química).

Já no que se refere a quantidade de microporos, a partir do boxplot (Figura 9), pode-se identificar que a temperatura de 350 °C afeta significativamente os resultados, tendo como resposta uma maior quantidade de microporos.

Para os mesoporos, pode-se identificar a partir do teste Tukey (Figura 10) que a biomassa afeta significativamente os resultados finais, sendo o Eucalipto Citriodora o que possui a maior quantidade de mesoporos como resposta.

Quanto a modificação química, nenhum teste estatístico apontou que a mesma influencia nos resultados finais, seja de micro ou mesoporos ou no que diz respeito a quantidade e área.

Sendo assim, pode-se constatar que para alcançar a maior quantidade de micro e mesoporos possível que contribuem para alta capacidade de adsorção de moléculas pequenas e grandes respectivamente, o biochar deve ser produzido a partir da biomassa do tipo eucalipto Citriodora, a uma temperatura de 350° C sem modificações químicas.

Pode-se observar que para ambas análises, o eucalipto Citriodora apresentou maior quantidade de poros e maior área total, no entanto no que tange a temperatura a análise estatística apresentou resultados diferentes da análise gráfica, 350 e 500 °C respectivamente. Já no que se refere a modificação química, vale avaliar futuramente em que condição o nutriente é melhor adsorvido pelo carvão, ou seja, se a adsorção ocorre melhor em situação em que a maior quantidade de poros ou maior área total. Vale ressaltar ainda, que uma maior quantidade não corresponde a uma maior área total, uma vez que, a classificação dos poros (micro, meso e macroporos) variam dentro de uma faixa de valores específicos.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este estudo objetivou avaliar a contribuição das variáveis de produção do biochar que auxiliam na adsorção de nutrientes. Para isso, foi realizada a leitura dos artigos que compõem a RBS, em foram identificados que a temperatura de pirólise e biomassa utilizada interferem diretamente na porosidade do produto final, sendo assim foi proposta a produção de carvões a partir de duas diferentes biomassas, em duas diferentes temperaturas, com e sem modificação química.

Foi possível identificar que a umidade das amostras tende a variar, porém não atingem valor superior a 3,89 %. As amostras carbonizadas a 350 °C apresentaram teor de umidade entre 1,79 % e 2,47 % e as amostras a 500 °C, a umidade variou entre 2,40 % e 3,89 %. De modo que a umidade de todas amostras estão dentro do limite máximo de 8 %, característica importantíssima, uma vez que o objetivo das amostras é a adsorção de nutrientes. Quanto menor a umidade presente nas amostras, maior será sua capacidade de adsorção.

Ao analisar os resultados da análise da porosidade, pode-se observar que o eucalipto *Citriodora* carbonizado a 500 °C tende a apresentar a maior quantidade de poros e maior área total. No que diz respeito as modificações químicas, observa-se que as amostras com 1,5 % de FeCl_3 tendem a apresentar melhores resultados para a área total de micro e mesoporos, já no que tange a quantidade de poros, as amostras sem modificação química apresentam maior quantidade de mesoporos.

No entanto, ao analisar estatisticamente e comparar os resultados obtidos dos diferentes carvões, pode-se observar que a microporosidade é influenciada diretamente pela temperatura de pirólise, enquanto que a mesoporosidade pelo tipo de biomassa utilizado. Sendo assim, para produção do biochar, sugere-se a utilização do eucalipto *Citriodora* pirolisado a 350 °C sem modificações químicas.

Além disso, foi identificado que na etapa aquisição da imagem a partir do MEV, muitas amostras não apresentavam-se de forma uniforme, de modo que precisaram ser realizadas várias buscas de regiões que apresentassem a estrutura porosa de forma clara, podendo interferir no resultado final da

quantidade, área e tamanho dos poros.

Diante disso, para trabalhos futuros sugere-se avaliar a estrutura porosa das amostras a partir da Análise de Brunauer, Emmett e Teller (BET), que objetiva descrever a adsorção física de moléculas de gás sobre uma superfície sólida e serve como base para uma técnica de análise importante para medição de área superficial específica de um material, visando comparar tais resultados com os obtidos a partir do processamento digital da imagem.

Além disso, sugere-se realizar testes de adsorção de fertilizantes no biochar, e posterior teste em campo, visando avaliar sua capacidade como fertilizante.

REFERÊNCIAS

- ALBUQUERQUE, J. A. et al. **Enhanced wheat yield by biochar addition under different mineral fertilization levels.** *Agronomy for Sustainable Development*, v. 33, n. 3, p. 475-484, 2013.
- ALBUQUERQUE, M. P. et al. **Análise de imagens e visão computacional.** *Anais da V Escola do CBPF*, Rio de Janeiro, v. 1, p. 145-76, 2005. AUGUSTO, KAREN SOARES. et al **AUTOMATIC IDENTIFICATION OF THE MATURATION DEGREE IN IRON ORE PELLETS.** Tese de Doutorado, Puc-Rio - Pontifícia Universidade Católica Do Rio De Janeiro, 2013. ARAÚJO, Franciéric Alves de. **Processamento e análise de imagens na caracterização da superfície do titânio submetido a um ensaio de cultura de células.** Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Norte. 2009.
- ARTUZO, F. D. et al. **Gestão de custos na produção de milho e soja.** *Revista Brasileira de Gestão de Negócios*, v. 20, n. 2, p. 273-294, 2018.
- BARCELLOS, D. C. **Como Fazer Carvão Vegetal: Carbonização da madeira (parte2).** Belo Horizonte: Fórmula da Carvoaria Perfeita, 2016.
- BOOSTANI, H. R. et al. **Comparison of Pb stabilization in a contaminated calcareous soil by application of vermicompost and sheep manure and their biochars produced at two temperatures.** *Applied geochemistry*, v. 102, p. 121-128, 2019.
- BORNØ, M. L.; MÜLLER-STÖVER, D. S.; LIU, F. **Contrasting effects of biochar on phosphorus dynamics and bioavailability in different soil types.** *Science of the Total Environment*, v. 627, p. 963-974, 2018.
- BRITO, J. O. **Princípios de produção e utilização de carvão vegetal de madeira.** *Documentos Florestais. ESALQ. USP/– Documentos Florestais: Piracicaba (9): 1-19, maio 1990. USP/ESALQ - Documentos Florestais: Piracicaba (9): 1-19, maio 1990.*
- CAI, Y. et al. **Sorption/desorption behavior and mechanism of NH₄⁺ by biochar as a nitrogen fertilizer sustained-release material.** *Journal of agricultural and food chemistry*, v. 64, n. 24, p. 4958-4964, 2016.

CAREY, D. E.; MCNAMARA, P. J.; ZITOMER, D. H. **Biochar from pyrolysis of biosolids for nutrient adsorption and turfgrass cultivation.** *Water Environment Research*, v. 87, n. 12, p. 2098-2106, 2015.

CARNEIRO, A. C. O. **Qualidade da Madeira para Produção de Carvão Vegetal.** II FÓRUM NACIONAL DE CARVÃO VEGETAL, 2008, Viçosa. Anais...Viçosa - MG: Biblioteca Florestal Digital, 2008. Disponível em: <http://www.bibliotecaflorestal.ufv.br/bitstream/handle/123456789/12864/Palestra_Qualidade_da_madeira_para_produção_de_carvão_vegetal.pdf?sequence=1&isAllowed=y>.

CHEN, L. et al. **Environmental-friendly montmorillonite-biochar composites:** Facile production and tunable adsorption-release of ammonium and phosphate. *Journal of Cleaner Production*, v. 156, p. 648-659, 2017.

CHEN, Q. et al. **Cow dung-derived engineered biochar for reclaiming phosphate from aqueous solution and its validation as slow-release fertilizer in soil-crop system.** *Journal of Cleaner Production*, v. 172, p. 2009-2018, 2018.

CHU, G. et al. **Phosphoric acid pretreatment enhances the specific surface areas of biochars by generation of micropores.** *Environmental Pollution*, v. 240, p. 1-9, 2018.

COELHO, A. M. **Nutrição e Adubação do Milho.** Sete Lagoas: EMBRAPA, 2006. Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/490410/1/Circ78.pdf>. Acesso: 17. Mar. 2020.

Confederação da Agricultura e Pecuária do Brasil (CNA). **Panorama do Agro.** 2020. Disponível em: <https://www.cnabrazil.org.br/cna/panorama-do-agro>. Acesso: 14. dez. 2020.

CONFORTO, E. C.; AMARAL, D. C.; SILVA, S. L. **Roteiro para revisão bibliográfica sistemática: aplicação no desenvolvimento de produtos e gerenciamento de projetos.** 8º Congresso Brasileiro de Gestão do Desenvolvimento de Produtos (CBGDP), Porto Alegre, 2011.

DARI, B. et al. **Relative influence of soil-vs. biochar properties on soil phosphorus retention.** *Geoderma*, v. 280, p. 82-87, 2016.

DOMAGALSKI, J. et al. **Eutrophication study at the Panjiakou-Daheiting Reservoir system, northern Hebei Province**, People's Republic of China: Chlorophyll-a model and sources of phosphorus and nitrogen. *Agricultural water management*, v. 94, n. 1-3, p. 43-53, 2007.

DOMINGUES, R. R. et al. **Properties of biochar derived from wood and high-nutrient biomasses with the aim of agronomic and environmental benefits**. *PloS one*, v. 12, n. 5, 2017.

DUDA, Richard O.; HART, Peter E.; STORK, David G. **Pattern classification 2 ed.** John Wiley & Sons, 2012.

EVERAERT, M. et al. **Agronomic effectiveness of granulated and powdered P-exchanged Mg–Al LDH relative to struvite and MAP**. *Journal of agricultural and food chemistry*, v. 65, n. 32, p. 6736-6744, 2017.

Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). **Food and Agriculture**. 2018. Disponível: <http://www.fao.org/faostat/en/#data>. Acesso: 17. Mar. 2020.

Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). **World Food and Agriculture**. 2013. Disponível: <http://www.fao.org/3/i3107e/i3107e.pdf>. Acesso: 17. Mar. 2020.

GE, J. et al. **Biodegradable polyurethane materials from bark and starch. II. Coating material for controlled-release fertilizer**. *Journal of applied polymer science*, v. 86, n. 12, p. 2948-2952, 2002

GOMES, Henrique Miller Andrade et al. **Aplicação das técnicas de processamento digital de imagens na caracterização de carvão ativado da biomassa do coco babaçu**. 2019.

GOMES, Otavio da Fonseca Martins. **Processamento e Análise de Imagens Aplicados à Caracterização Automática de Materiais**. Dissertação (Mestrado em Ciência da Engenharia Metalúrgica)- Departamento de Ciências de Materiais e Metalúrgica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2001.

GONZALEZ, Rafael C.; WOODS, R. C. **Processamento Digital de Imagens. Tradução de Cristina Yamagami e Leonardo Piamonte**. 3. ed. São Paulo. 2010

HAMZAH, Z. et al. **Characterization of physicochemical properties of biochar from different agricultural residues**. *Advances in Environmental Biology*, v. 7, n. 12 S2, p. 3752-3758, 2013

HANAFI, M. M.; ELTAIB, S. M.; AHMAD, M. B. **Physical and chemical characteristics of controlled release compound fertiliser**. *European polymer journal*, v. 36, n. 10, p. 2081-2088, 2000.

HUIDOBRO, A.; PASTOR, A. C.; Rodríguez-Reinoso, F.; **Carbon** 2001, 39, 389.

IBGE. **Produção da extração vegetal e da silvicultura: ano-base 2016**. Rio de Janeiro: IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 2017.
Disponível em:
<https://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/periodicos/74/pevs_2016_v31.pdf>.

JACTO. **Agricultura mundial**. 2019. Disponível em:
<https://blog.jacto.com.br/agricultura-mundial/>. Acesso: 17. Mar. 2020.

KAH, M. et al. **Pyrolysis of waste materials: characterization and prediction of sorption potential across a wide range of mineral contents and pyrolysis temperatures**. *Bioresource technology*, v. 214, p. 225-233, 2016.

LAHORI, A. H. et al. **Use of biochar as an amendment for remediation of heavy metal-contaminated soils: prospects and challenges**. *Pedosphere*, v. 27, n. 6, p. 991-1014, 2017.

LEHMANN, J. **A handful of carbon**. *Nature*, v. 447, n. 7141, p. 143-144, 2007.

LEHMANN, J.; JOSEPH, S. **Biochar for environmental management: an introduction**. In: *Biochar for environmental management*. Routledge, 2015. p. 33-46.

LÉVESQUE, V. et al. **Mitigation of CO₂, CH₄ and N₂O from a fertigated horticultural growing medium amended with biochars and a compost**. *Applied Soil Ecology*, v. 126, p. 129-139, 2018.

LI, Chun Hung; LEE, C. K. **Minimum cross entropy thresholding**. *Pattern recognition*, v. 26, n. 4, p. 617-625, 1993.

LIU, P. et al. **Effects of biochar amendment on chloropicrin adsorption and degradation in soil.** *Energies*, v. 9, n. 11, p. 869, 2016.

LIU, X.; SHEN, F.; QI, X. **Adsorption recovery of phosphate from aqueous solution by CaO-biochar composites prepared from eggshell and rice straw.** *Science of The Total Environment*, v. 666, p. 694-702, 2019.

LUSTOSA FILHO, J. F. et al. **Diffusion and phosphorus solubility of biochar-based fertilizer: Visualization, chemical assessment and availability to plants.** *Soil and Tillage Research*, v. 194, p. 104298, 2019.

MIRANDA, E. de. **Áreas Cultivadas no Brasil e no Mundo.** EMBRAPA, 2018.
Disponível em:
<https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/174066/1/4942.pdf>.
Acesso: 17. Mar. 2020.

NELISSEN, V. et al. **Effect of different biochar and fertilizer types on N₂O and NO emissions.** *Soil Biology and Biochemistry*, v. 70, p. 244-255, 2014.

NOVAIS, S. V. et al. **Poultry manure and sugarcane straw biochars modified with MgCl₂ for phosphorus adsorption.** *Journal of Environmental Management*, v. 214, p. 36-44, 2018.

NOVAK, J. M.; CANTRELL, K. B.; WATTS, D. W. **Compositional and thermal evaluation of lignocellulosic and poultry litter chars via high and low temperature pyrolysis.** *Bioenergy Research*, v. 6, n. 1, p. 114-130, 2013.

OH, T. et al. **Utilization of biochar impregnated with anaerobically digested slurry as slow-release fertilizer.** *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, v. 177, n. 1, p. 97-103, 2014.

OLIVEIRA, A. C. et al. **Otimização Da Produção Do Carvão Vegetal Por Meio Do Controle De Temperaturas De Carbonização.** *Revista Árvore*, v. 37, n. 3, p. 557–566, jun. 2013.

OLIVEIRA, A. C. **Sistema forno-fornalha para produção de carvão vegetal.** 2012. 64f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-graduação em Ciência Florestal, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2012.

PANDIT, N. R. et al. **Biochar from "Kon Tiki" flame curtain and other kilns: Effects of nutrient enrichment and kiln type on crop yield and soil chemistry.** PloS one, v. 12, n. 4, 2017.

PICANCIO, A. C. S. **Gestão da qualidade aplicada à melhoria do processo de produção de carvão vegetal.** 2011. Dissertação (Mestrado) - Ciência Florestal, Universidade Federal de Viçosa. Viçosa, 2011.

PINHEIRO, P. C. da C. et al. **A produção de carvão vegetal: teoria e prática.** 1a ed. Belo Horizonte: Autores, 2006.

REIS, G. M. C. **Logística e transporte de carvão vegetal.** Sociedade de Investigações Florestais-SIF/Universidade Federal de Lavras-UFLA. **Anais...** In: III FORUM NACIONAL SOBRE CARVÃO VEGETAL. Belo Horizonte-MG: SIF - Sociedade de Investigações Florestais, 22 out. 2014

REZENDE, M. E. **Produção de carvão vegetal – importância do conhecimento fundamental.** Curso: Fundamentos e práticas da carbonização da biomassa. . In: SEMINÁRIO: PRÁTICA, LOGÍSTICA, GERENCIAMENTO E ESTRATÉGIAS PARA O SUCESSO DA CONVERSÃO DA MATÉRIA LENHOSA EM CARVÃO VEGETAL PARA USO NA METALURGIA E INDÚSTRIA. Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil: 27 nov. 2006.

RODRIGUES, T. **Modelo de Desenvolvimento de Soluções conceituais de forno de Carbonização.** 2019. 340f. Tese (Doutorado em Engenharia de Produção) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Ponta Grossa, 2019.

SANTOS, S. de F. de O. M. **Modelo ambiental e econômico de produção de carvão vegetal.** 2017. 144 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Produção) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa, 2017.

SANTOS, S. R. dos et al. **Biochar association with phosphate fertilizer and its influence on phosphorus use efficiency by maize.** Ciência e Agrotecnologia, v. 43, 2019.

SCHREITER, I. J.; SCHMIDT, W.; SCHÜTH, C. **Sorption mechanisms of chlorinated hydrocarbons on biochar produced from different feedstocks: conclusions from single-and bi-solute experiments.** Chemosphere, v. 203, p. 34-43, 2018.

SHAH, N. et al. **Wood-to-charcoal conversion in a partial-combustion kiln: an experimental study to understand and upgrade the process.** Fuel, v. 71, n. 8, p. 955–962, 1992.

SHANG, L. et al. **Adsorption of ammonium in aqueous solutions by the modified biochar and its application as an effective N-fertilizer.** Water, air, & soil pollution, v. 229, n. 10, p. 320, 2018.

TANG, J. et al. **Characteristics of biochar and its application in remediation of contaminated soil.** Journal of bioscience and bioengineering, v. 116, n. 6, p. 653-659, 2013.

TASKIN, E. et al. **Multianalytical characterization of biochar and hydrochar produced from waste biomasses for environmental and agricultural applications.** Chemosphere, v. 233, p. 422-430, 2019.

UTTRAN, A. et al. **ADSORPTION OF NPK FERTILISER AND HUMIC ACID ON PALM KERNEL SHELL BIOCHAR.** Journal of Oil Palm Research, v. 30, n. 3, p. 472-484, 2018.

VAN DIJK, K. C.; LESSCHEN, Jan Peter; OENEMA, Oene. **Phosphorus flows and balances of the European Union Member States.** Science of the Total Environment, v. 542, p. 1078-1093, 2016.

WANG, T. et al. **Predicting phosphorus bioavailability from high-ash biochars.** Plant and Soil, v. 357, n. 1-2, p. 173-187, 2012.

WEN, P. et al. **Microwave-assisted synthesis of a novel biochar-based slow-release nitrogen fertilizer with enhanced water-retention capacity.** ACS Sustainable Chemistry & Engineering, v. 5, n. 8, p. 7374-7382, 2017.

WU, L.; LIU, M. **Preparation and properties of chitosan-coated NPK compound fertilizer with controlled-release and water-retention.** Carbohydrate Polymers, v. 72, n. 2, p. 240-247, 2008.

WU, M. et al. **The sorption of organic contaminants on biochars derived from sediments with high organic carbon content.** Chemosphere, v. 90, n. 2, p. 782-788, 2013.

XIAO, X.; CHEN, B.; ZHU, L. **Transformation, morphology, and dissolution of silicon and carbon in rice straw-derived biochars under different pyrolytic temperatures.** Environmental science & technology, v. 48, n. 6, p. 3411-3419, 2014.

XU, G. et al. **Negative interactive effects between biochar and phosphorus fertilization on phosphorus availability and plant yield in saline sodic soil.** Science of the Total Environment, v. 568, p. 910-915, 2016.

YANG, J. et al. **Limited role of biochars in nitrogen fixation through nitrate adsorption.** Science of The Total Environment, v. 592, p. 758-765, 2017.

ZAMA, E. F. et al. **The role of biochar properties in influencing the sorption and desorption of Pb (II), Cd (II) and As (III) in aqueous solution.** Journal of cleaner production, v. 148, p. 127-136, 2017.

ZHANG, H.; VORONEY, R. P.; PRICE, G. W. **Effects of temperature and activation on biochar chemical properties and their impact on ammonium, nitrate, and phosphate sorption.** Journal of environmental quality, v. 46, n. 4, p. 889-896, 2017.

ZHANG, Hanzhi et al. **Roles of biochar in improving phosphorus availability in soils: a phosphate adsorbent and a source of available phosphorus.** Geoderma, v. 276, p. 1-6, 2016.

APÊNDICE A – Revisão Bibliográfica Sistemática (RBS)

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA SISTEMÁTICA (RBS)

Para a realização da Revisão Bibliográfica Sistemática (RBS), baseou-se no trabalho apresentado por Conforto, Amaral e Silva (2011), intitulado *RBS Roadmap*. Os autores destacam que o método está organizada em 15 etapas distribuídas em 3 fases, sendo elas: i) entrada; ii) processamento, e; iii) saída. A Fase 1 (entrada) contempla oito etapas, conforme descritas a seguir.

FASE 1 - ENTRADA

ETAPA 1 – Problema: a definição do problema é o ponto de partida da RBS, em que busca-se responder uma ou mais perguntas. Sendo assim, o problema definido para a pesquisa foi qual o processo para atingir a estrutura porosa desejada do biochar para seu posterior uso como fertilizante de liberação lenta na agricultura. Diante disso, foram estabelecidas as questões: Como realizar o planejamento do desenvolvimento do fertilizante? Qual o procedimento químico para impregnação no carvão visando atingir a porosidade necessária para a futura adsorção de aminoácidos? Qual a temperatura de carbonização? Como avaliar se as modificações foram eficazes?

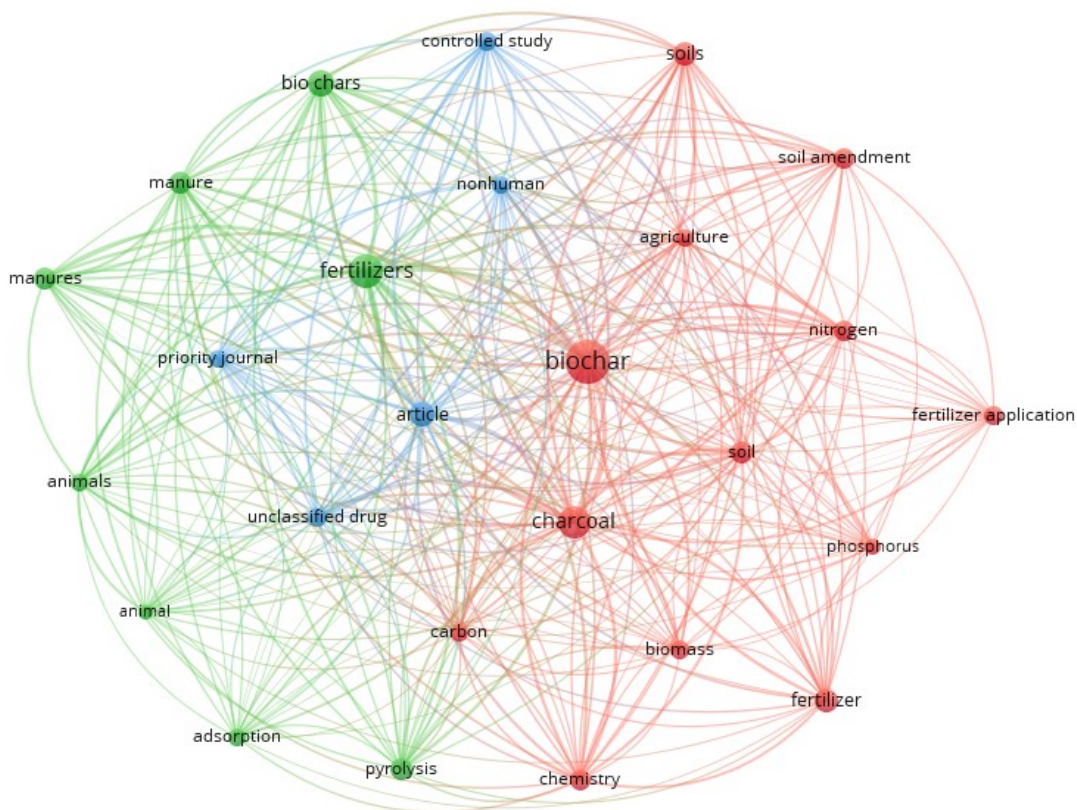
ETAPA 2 – Objetivos: os objetivos da RBS devem estar alinhados com os objetivos do projeto, sendo eles: identificar uma metodologia para produção do fertilizante estabelecendo parâmetros, e; identificar análises para caracterização físico-química do produto final.

ETAPA 3 – Fontes primárias: as fontes primárias constituem-se de artigos, periódicos ou bases de dados que serão úteis para a definição de palavras-chave, e identificação dos principais autores e artigos relevantes. As fontes primárias foram identificadas para esse estudo a partir de uma revisão bibliográfica preliminar, em que, foram realizadas buscas nas bases de dados *Scopus*, *Science Direct* e *Web of Science* utilizando as palavras-chave (charcoal OR biochar) AND (fertilizer OR "slow release fertilizer"). As buscas retornaram

3386 trabalhos relacionados ao tema, e após a exclusão das duplicatas resultaram em 2201 trabalhos.

De posse dos resultados, utilizou-se o *software* VOSviewer, visando identificar as palavras que obtiveram o maior retorno. Colocou-se as palavras com correspondência com mais de 100 vezes, conforme apresentado na Figura 11 abaixo.

Figura 11 - Palavras com maior retorno no software VOSviewer.



Fonte – Autor (2021).

ETAPA 4 – Strings de busca: Para definir as *strings* de busca é preciso identificar anteriormente as palavras-chave referente ao tema de pesquisa, a partir do estudo preliminar das fontes primárias realizada na Etapa 3. As palavras-chave que orientaram a busca das pesquisas estão apresentadas no Quadro 2.

Quadro 2 - Palavras-chave (keywords) utilizadas na RBS

PALAVRAS-CHAVE
(charcoal OR biochar OR “bio chars”) AND (soil*) AND (fertilizer*) AND (pyrolysis) AND (adsorption)

Fonte: Autor (2021)

Na pesquisa dos artigos, a busca foi realizada com a combinação das palavras-chave, utilizando os operadores booleanos *and* (deve conter um termo e o outro) e *or* (deve conter um termo ou outro). Em algumas palavras-chave utilizou-se o símbolo de truncamento (*), que é utilizado para fazer plurais e variações de grafias de zero a infinitos caracteres.

ETAPA 5 – Critérios de inclusão: para definir os critérios de inclusão dos artigos é preciso considerar os objetivos da pesquisa. Como critério de inclusão dos artigos estabeleceu-se: artigos que discorrem das características do carvão para uso na agricultura, artigos que tratassem da produção de fertilizante de lenta liberação, e; artigos que apresentem caracterização físico-química do carvão vegetal para uso na agricultura. Os critérios definidos nesta etapa foram utilizados na Etapa 10 (análise dos resultados), nos filtros 1 e 2.

ETAPA 6 – Critério de qualificação: esta etapa auxilia na avaliação da importância do artigo para o estudo. Para esta pesquisa estabeleceu-se os seguintes critérios: a quantidade de citações do artigo e o fator de impacto da revista que o mesmo foi publicado. Os critérios de qualificação dos artigos foram utilizados na Etapa 10 (análise dos resultados), após o filtro 3.

ETAPA 7 – Métodos e ferramentas: esta etapa objetiva definir os filtros de busca, como serão realizadas as buscas nas bases de dados e como os resultados serão armazenados. Para este estudo, estabeleceu-se os filtros de busca apresentados na Figura 12.

Figura 12 - Procedimento iterativo da fase de processamento.



Fonte: Adaptado de Conforto, Amaral e Silva (2011).

ETAPA 8 – Cronograma: definir o cronograma para realização da RBS é de extrema importância, para a pesquisa em questão foi estabelecido o cronograma apresentado no Quadro 3.

Quadro 3 - Cronograma utilizado na RBS

ETAPAS DA RBS	DATA DE ENTREGA
Identificar o problema da RBS	05/11/2019
Definição dos objetivos da RBS	12/11/2019
Definição das fontes primárias	19/11/2019 à 26/11/2019
Crítérios de inclusão	28/11/2019
Crítérios de qualificação	29/11/2019
Método de ferramentas	03/12/2019
Busca/Coleta dos dados (periódicos e base de dados)	10/12/2019
Análise dos dados (filtros)	10/12/2019 à 18/01/2019
Organizar documentos (arquivar os arquivos)	10/12/2019 à 18/01/2020
Síntese e apresentação dos resultados (referencial teórico)	21/01/2020 à 18/02/2020

Fonte: Autor (2021)

A RBS foi realizada no período de novembro de 2019 a março de 2020, aproximadamente, 5 meses de duração. Esse período foi necessário e importante devido a pesquisa em cada periódico, bem como a leitura dos textos segundo os critérios e filtros estabelecidos.

FASE 2 – PROCESSAMENTO

A Fase 2 (Processamento) contempla três etapas, são elas: condução das buscas; análise dos resultados; e documentação, apresentados a seguir.

ETAPA 9 – Condução das buscas: para realização das buscas foram utilizadas as bases de dados: *Web of Science*; *Scopus*; e *Science Direct*. Em cada uma das bases de dados realizou-se uma busca com as palavras-chave apresentadas na Etapa 4 (*strings* de busca) no campo Abstract-Title-AND-Keywords.

ETAPA 10 – Análise dos resultados: é realizada a leitura e análise dos resultados, ou seja, os filtros de leitura, que compreende os seguintes passos:

- ❖ Filtro 1 - seleção dos artigos por meio da leitura do título e palavras-chave;
- ❖ Filtro 2 - seleção dos artigos por meio da leitura do resumo, e;
- ❖ Filtro 3 - seleção dos artigos por meio da leitura completa.

No Quadro 4 apresenta-se um resumo geral da quantidade de artigos em cada fase e o número de artigos excluídos em cada critério.

Quadro 4 - Resumo geral da quantidade de artigos da RBS

DESCRIÇÃO	NÚMERO DE ARTIGOS
Total bruto	100
Exclusão – Duplicados	30
Exclusão – Filtro 1	31
Exclusão – Filtro 2	2
Exclusão – Filtro 3	9

Fonte – Autor (2021)

A RBS retornou um total de 100 artigos, após excluídas as duplicatas, ou seja, quando um mesmo artigo está indexado em bases de dados diferentes, obteve-se um total de 70.

Ao realizar a leitura dos títulos e palavras-chave (Filtro 1), utilizou-se os critérios de inclusão dos artigos estabelecidos na Etapa 5 (critérios de inclusão), selecionando 39 artigos que atenderam aos critérios para o Filtro 2, em que foi

realizada a leitura do resumo, totalizando 37 artigos para o Filtro 3.

Assim, após a leitura completa (Filtro 3) foram excluídos 9 artigos, resultando em um portfólio final de 28 artigos para a pesquisa.

ETAPA 11 – Documentação: esta etapa consiste em catalogar os artigos encontrados. No Quadro 5 apresenta-se a catalogação dos artigos selecionados na RBS.

Quadro 5 - Periódicos na área de avaliação de Engenharias III e quantidade de artigos catalogados na Revisão Bibliográfica Sistemática (RBS)

PERIÓDICOS	CLASSIFICAÇÃO		ÁREA DE AVALIAÇÃO	QUANTIDADE DE ARTIGOS
	FATOR DE IMPACTO	QUALIS (ANO) (2013-2016)		
Science of The Total Environment	6,551	A1	Engenharias III	4
Chemosphere	5,778	A1	Engenharias III	2
Journal of Cleaner Production	7,246	A1	Engenharias III	2
PLoS ONE	2,740	A1	Engenharias III	2
Geoderma	2,667	Não existem dados cadastrados para a pesquisa realizada		2
Bioresource Technology	7,539	A1	Engenharias III	1
Energies	2,702	B1	Engenharias III	1
Environmental Pollution	6,792	A1	Engenharias III	1
Journal of Agricultural and Food Chemistry	4,192	A1	Engenharias III	1
Journal of Environmental Management	5,647	A2	Engenharias III	1
Journal of Environmental Quality	2,142	Não existem dados cadastrados para a pesquisa realizada		1
Soil Biology and Biochemistry	0,000	Não existem dados cadastrados para a pesquisa realizada		1
Advances in Environmental Biology	0,000	Não existem dados cadastrados para a pesquisa realizada		1
Agronomy for Sustainable Development	4,531	Não existem dados cadastrados para a pesquisa realizada		1
Applied Geochemistry	2,903	Não existem dados cadastrados para a pesquisa realizada		1
Applied Soil Ecology	3,187	Não existem dados cadastrados para a pesquisa realizada		1
Ciência e Agrotecnologia	1,144	Não existem dados cadastrados para a pesquisa realizada		1
Journal of Oil Palm Research	1,564	Não existem dados cadastrados para a pesquisa realizada		1
Journal of Plant Nutrition and Soil Science	2,083	Não existem dados cadastrados para a pesquisa realizada		1
Soil and Tillage Research	0,000	Não existem dados cadastrados para a pesquisa realizada		1
Water Environment Research	1,151	Não existem dados cadastrados para a pesquisa realizada		1
TOTAL DE ARTIGOS				28

Fonte: Autor (2021)

FASE 3 – SAÍDA

A Fase 3 (Saída) contempla quatro etapas, são elas: alertas; cadastro e arquivo; síntese resultados; e modelos teóricos. Essas etapas serão detalhadas a seguir.

ETAPA 12 – Alertas: os alertas visam avisar por e-mail artigos publicados em futuras edições, para isso foram escolhidos quatro periódicos: Science of The Total Environment, Chemosphere, Journal of Cleaner Production e, PLoS ONE. Assim, durante a coleta, tabulação, análise e validação dos dados da pesquisa, pretende-se rastrear novos artigos que poderão ser publicados em futuras edições desses periódicos para atualizar o repositório de artigos desta pesquisa.

ETAPA 13 – Cadastro e arquivo: os 28 artigos selecionados foram organizados e armazenados no software EndNote X7, possibilitando a organização dos organizar em grupos de acordo com as bases de dados pesquisadas, excluindo os duplicados, separando os alinhados com o tema, os mais citados e os disponíveis.

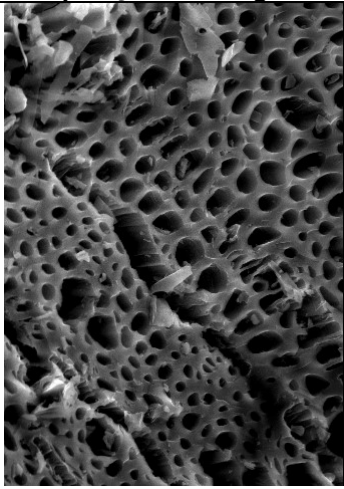
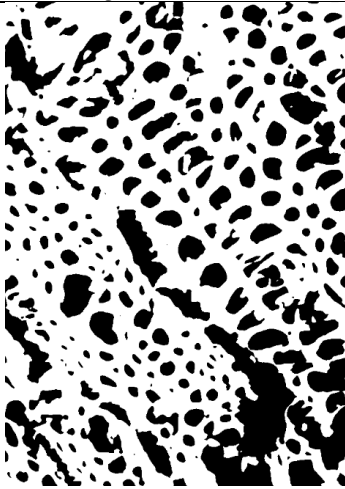
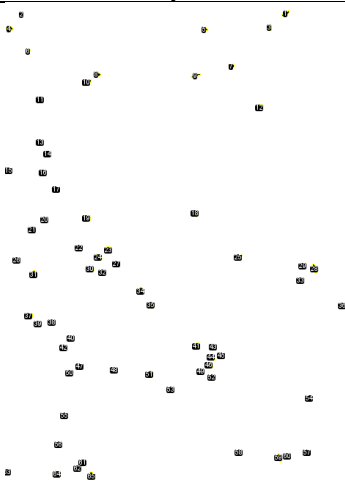


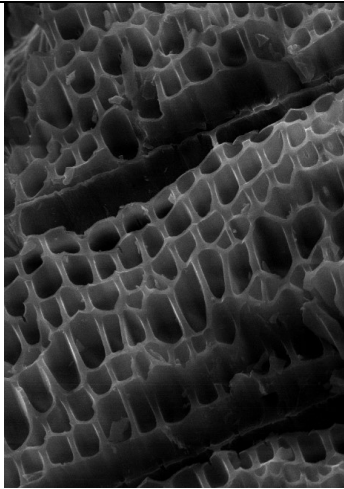

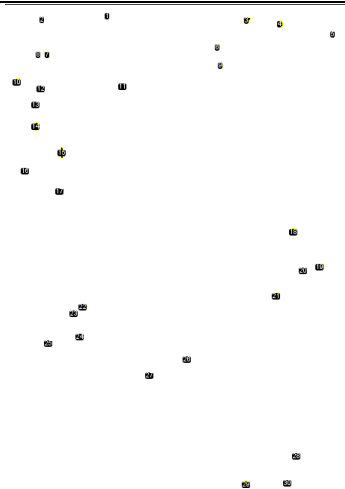


ETAPA 14 – Síntese resultados: nessa etapa, utilizou-se o Microsoft Excel 2019 para elaborar planilhas com sínteses dos artigos catalogados na Etapa 11 (documentação). Nessas planilhas, buscou-se elaborar anotações, textos, tabelas, esquemas, fluxogramas e representações de cada assunto estudado o que se assumiu, num segundo momento, o formato de um capítulo, o capítulo de referencial teórico presente nesta pesquisa. Vale destacar que as sínteses dos resultados foram construídas durante todo o processo de execução da Revisão Bibliográfica Sistemática (RBS).

ETAPA 15 – Modelos teóricos: essa etapa é o resultado final da RBS e útil para a continuação da pesquisa.

APÊNDICE B – Processamento de Imagens no *software* ImageJ

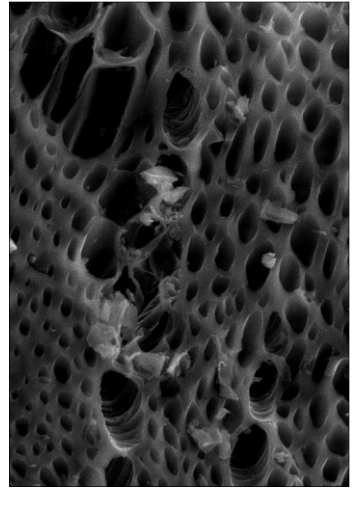
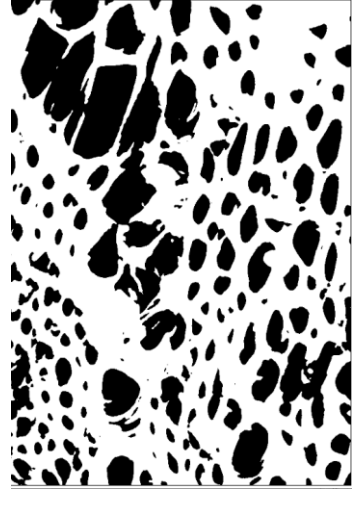



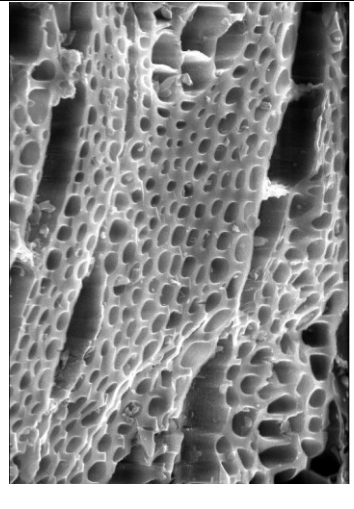
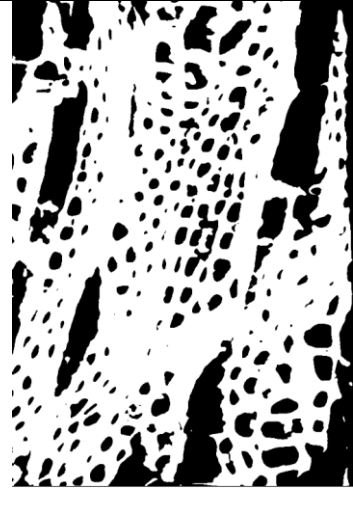
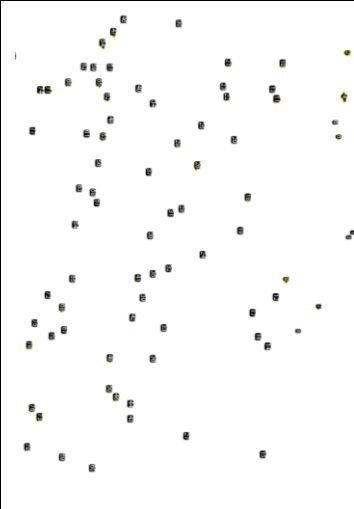


Quadro 6 - Processamento digital das amostras de carvão com o auxílio do software ImageJ.

(continua)

	Aquisição da imagem	Extração de atributos	Microporos	Mesoporos	Macroporos
C350-0-1					
C350-0-2					

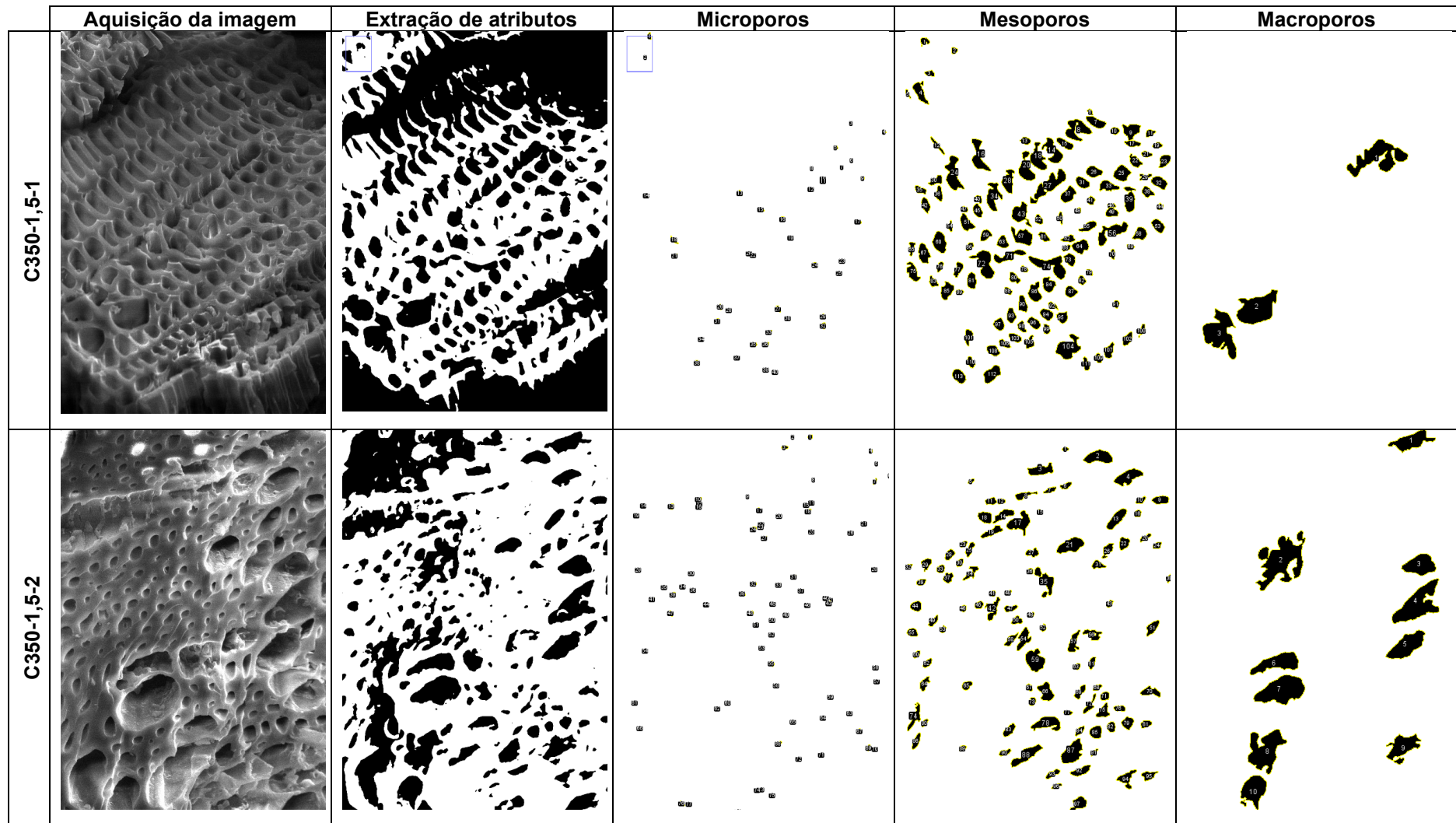
Quadro 6- Processamento digital das amostras de carvão com o auxílio do software ImageJ.

(continua)

V	Aquisição da imagem	Extração de atributos	Microporos	Mesoporos	Macroporos
C350-0,75-1					
C350-0,75-2					

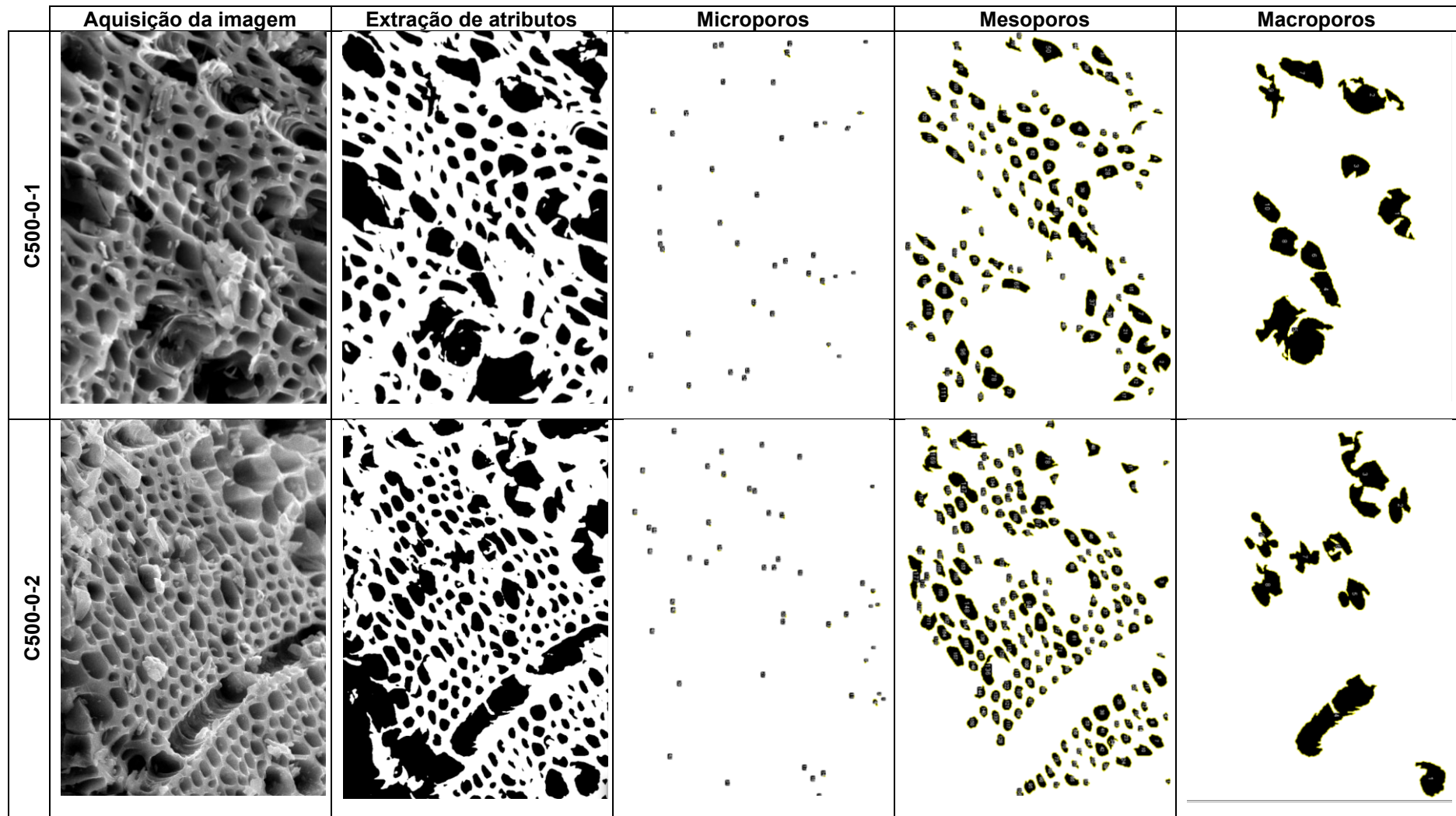
Quadro 6- Processamento digital das amostras de carvão com o auxílio do software ImageJ.

(continua)



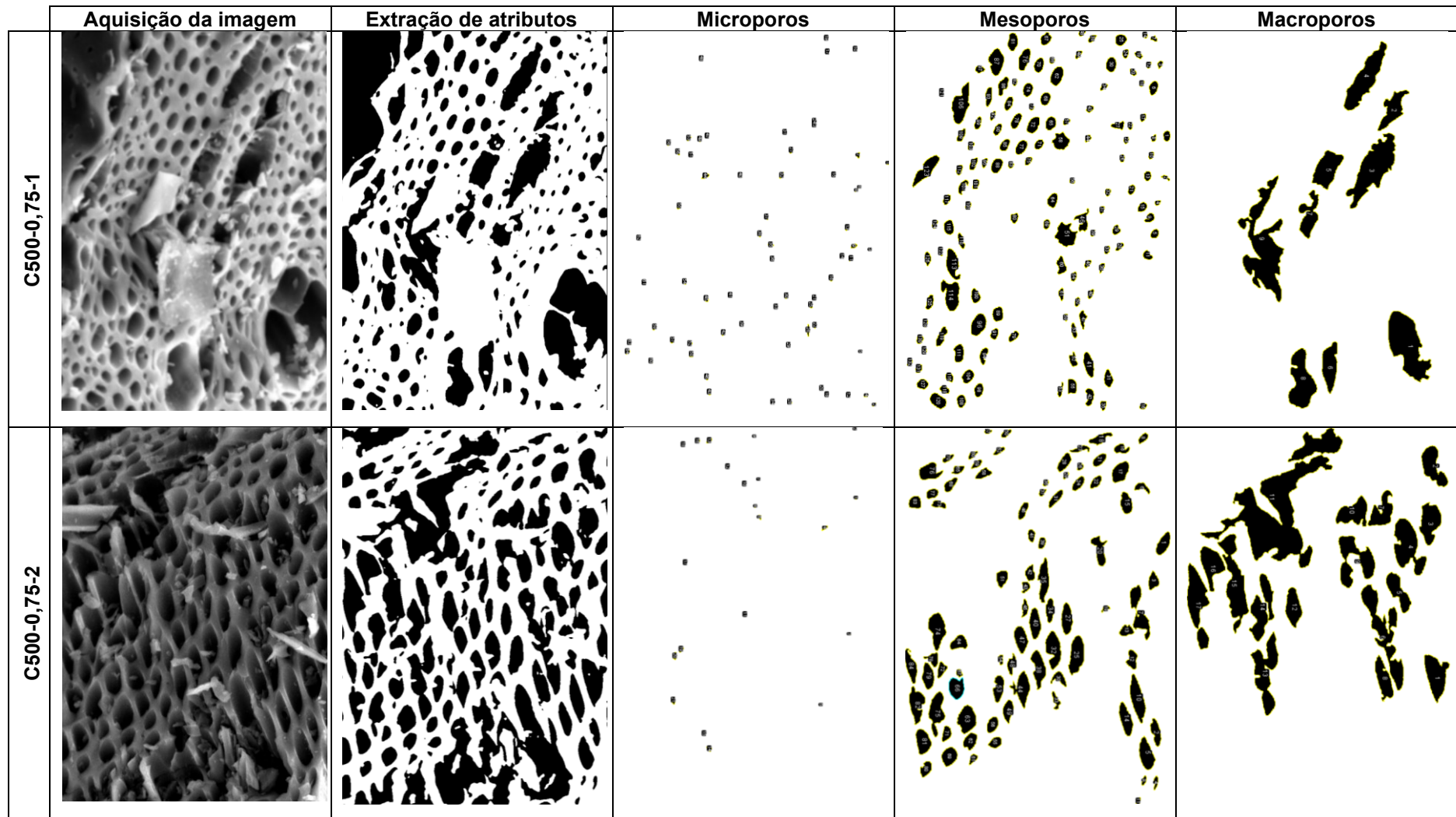
Quadro 6- Processamento digital das amostras de carvão com o auxílio do software ImageJ.

(continua)



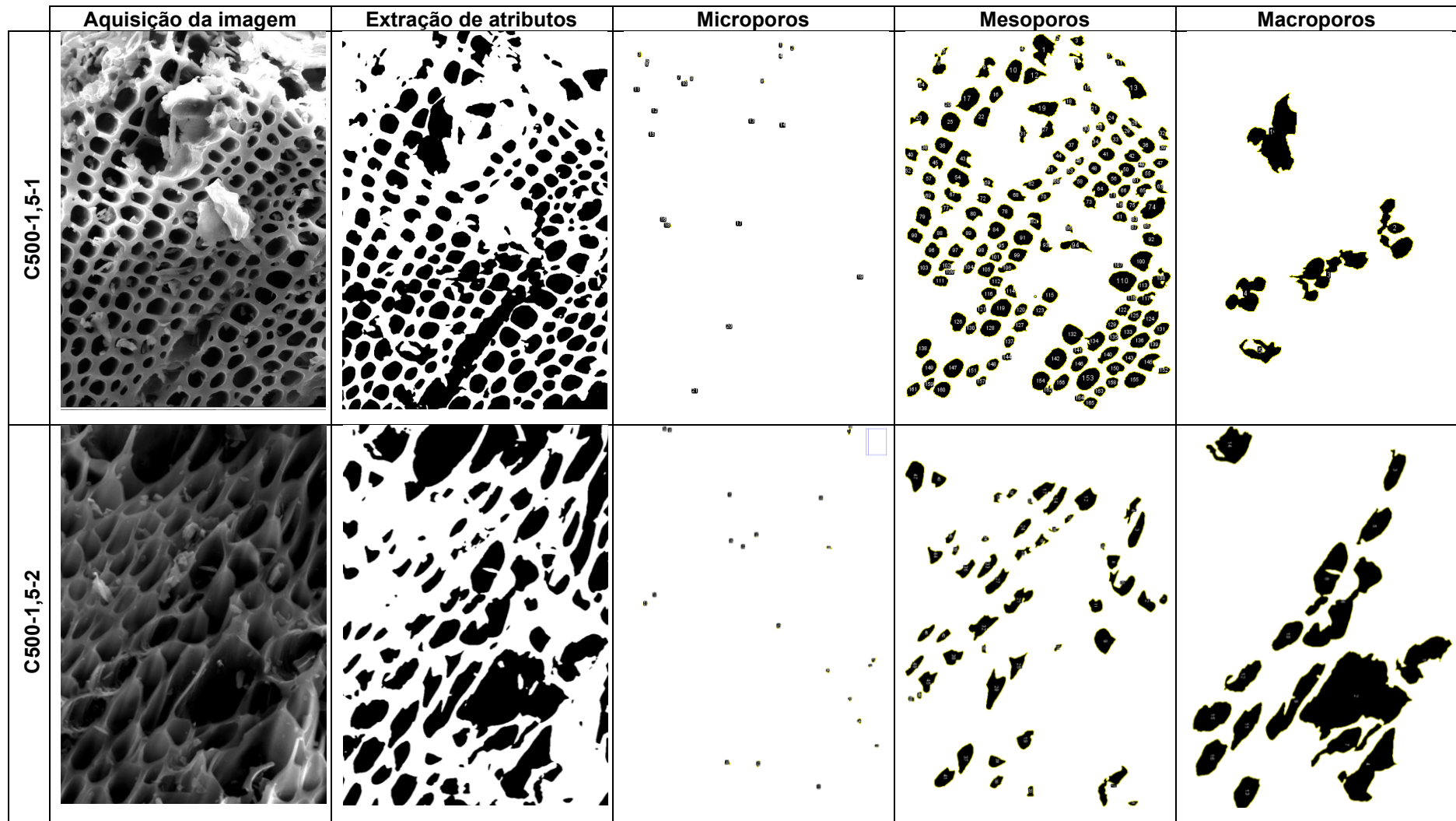
Quadro 6- Processamento digital das amostras de carvão com o auxílio do software ImageJ.

(continua)



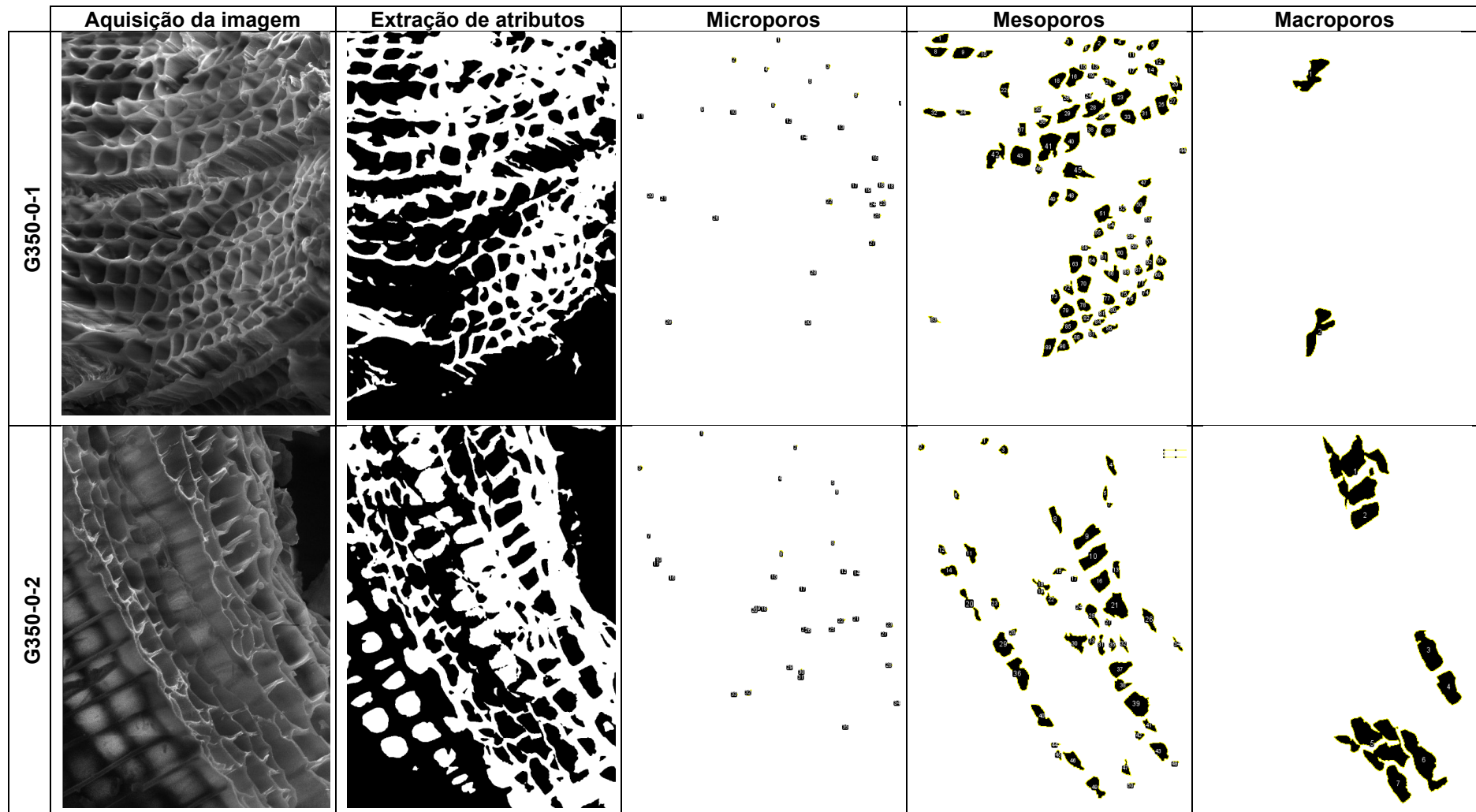
Quadro 6- Processamento digital das amostras de carvão com o auxílio do software ImageJ.

(continua)



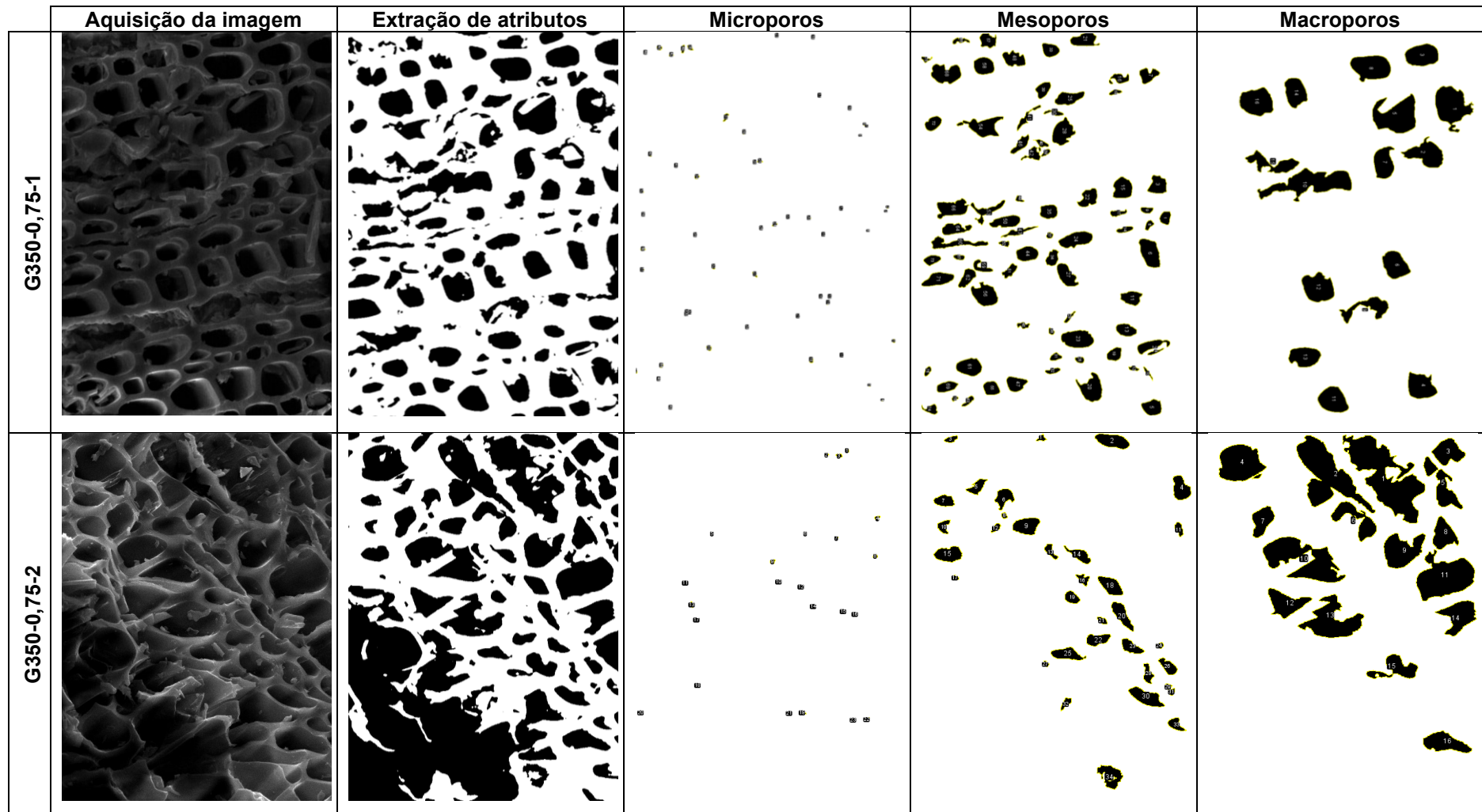
Quadro 6- Processamento digital das amostras de carvão com o auxílio do software ImageJ.

(continua)



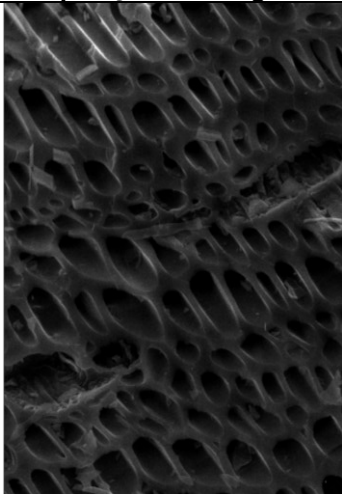




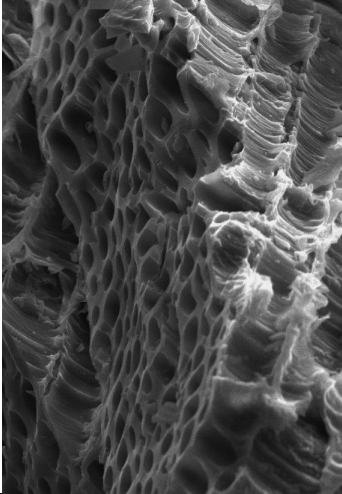

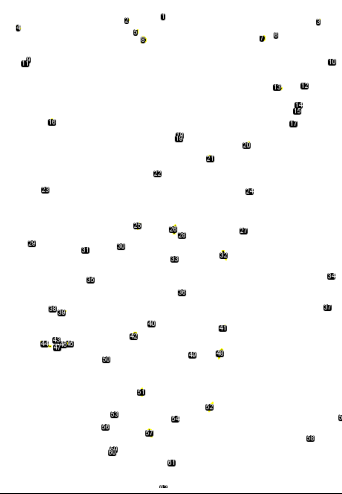


Quadro 6- Processamento digital das amostras de carvão com o auxílio do software ImageJ.

(continua)



Quadro 6- Processamento digital das amostras de carvão com o auxílio do software ImageJ.

(continua)

	Aquisição da imagem	Extração de atributos	Microporos	Mesoporos	Macroporos
G350-1,5-1					
G350-1,5-2					

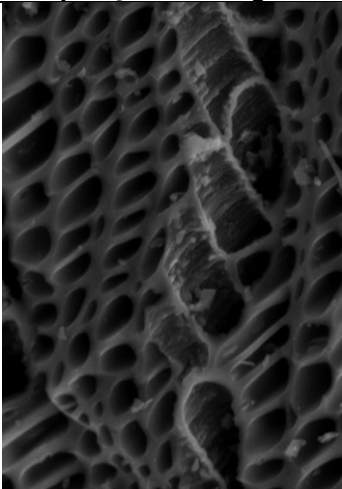




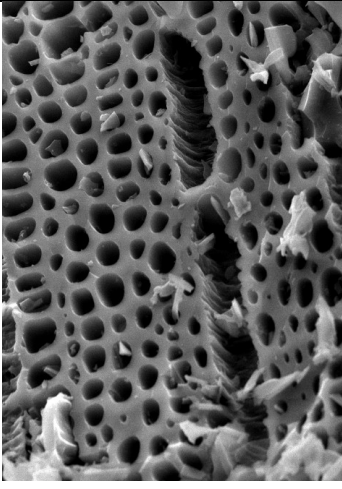
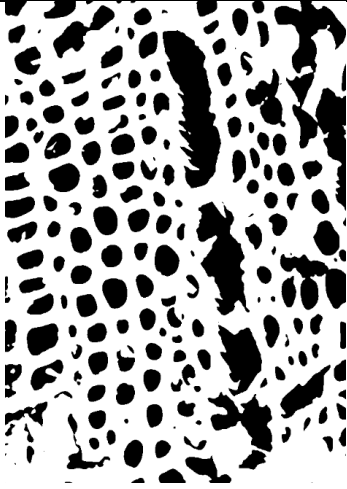
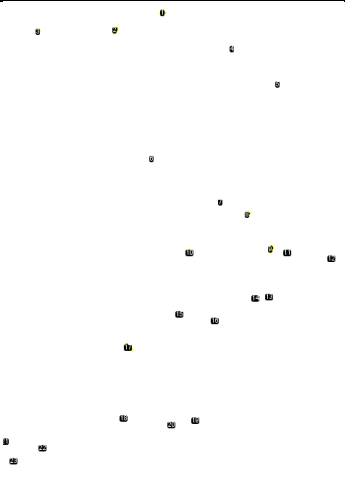


Quadro 6- Processamento digital das amostras de carvão com o auxílio do software ImageJ.

(continua)

	Aquisição da imagem	Extração de atributos	Microporos	Mesoporos	Macroporos
G500-0-1					
G500-0-2					

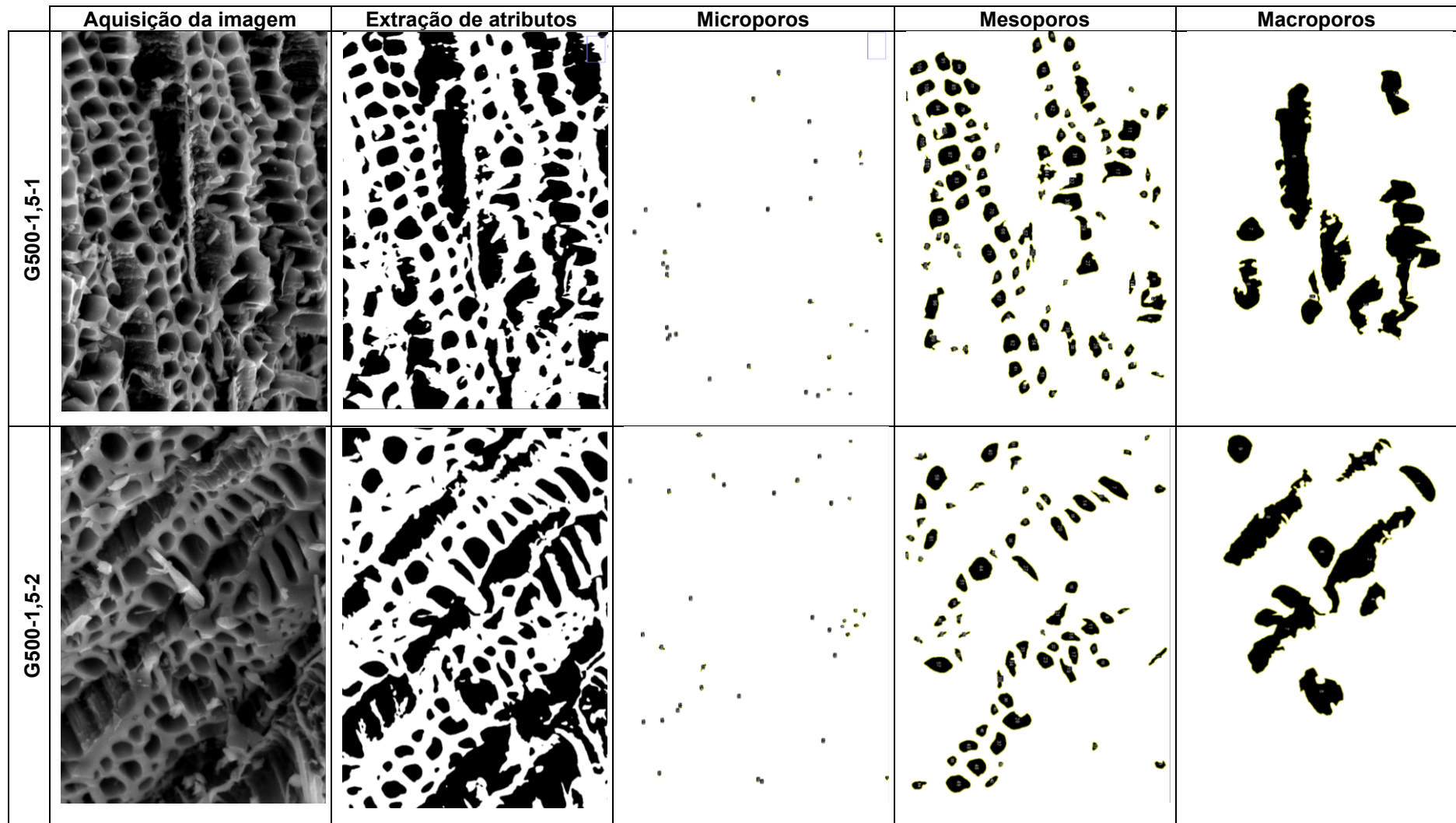
Quadro 6- Processamento digital das amostras de carvão com o auxílio do software ImageJ.

(continua)

	Aquisição da imagem	Extração de atributos	Microporos	Mesoporos	Macroporos
G500-0,75-1					
G500-0,75-2					

Quadro 6- Processamento digital das amostras de carvão com o auxílio do software ImageJ.

(conclusão)



APÊNDICE C – Análise da Porosidade realizada com o auxílio do *software*
ImageJ

Tabela 11 - Resultado da análise da porosidade do carvão produzido a partir de eucalipto Grandis em uma ampliação de 1000x

(continua)

G350-0-1	Quantidade (unidade)	Área Total (nm²)	Tamanho médio (nm)
Microporo	30	23,265	0,775
Mesoporo	90	999,400	11,104
Macroporo	2	112,763	56,382
Total	122	1.135,428	22,754
G350-0-2	Quantidade (unidade)	Área Total (nm²)	Tamanho médio (nm)
Microporo	35	21,502	0,614
Mesoporo	50	686,048	13,721
Macroporo	7	741,887	105,984
Total	92	1.449,437	40,106
G350-0,75-1	Quantidade (unidade)	Área Total (nm²)	Tamanho médio (nm)
Microporo	53	29,093	0,549
Mesoporo	76	1.442,552	18,981
Macroporo	16	1.214,461	75,904
Total	145	2686,106	31,811
G350-0,75-2	Quantidade (unidade)	Área Total (nm²)	Tamanho médio (nm)
Microporo	23	16,732	0,727
Mesoporo	34	616,360	18,128
Macroporo	16	2.045,902	127,869
Total	73	2.678,994	48,908
G350-1,5-1	Quantidade (unidade)	Área Total (nm²)	Tamanho médio (nm)
Microporo	47	24,774	0,527
Mesoporo	47	912,452	19,414
Macroporo	22	2.409,292	109,513
Total	116	3.346,518	43,151
G350-1,5-2	Quantidade (unidade)	Área Total (nm²)	Tamanho médio (nm)
Microporo	62	38,786	0,626
Mesoporo	97	1.072,772	11,060
Macroporo	8	1.923,257	240,407
Total	167	3.034,815	84,031
G500-0-1	Quantidade (unidade)	Área Total (nm²)	Tamanho médio (nm)
Microporo	43	34,624	0,805
Mesoporo	99	1.644,886	16,615
Macroporo	4	364,760	91,190
Total	146	2.044,27	36,203
G500-0-2	Quantidade (unidade)	Área Total (nm²)	Tamanho médio (nm)
Microporo	21	13,923	0,663
Mesoporo	45	883,868	19,642
Macroporo	19	1.533,658	80,719
Total	85	2.431,449	33,675
G500-0,75-1	Quantidade (unidade)	Área Total (nm²)	Tamanho médio (nm)
Microporo	21	15,187	0,723
Mesoporo	74	1.731,919	23,404
Macroporo	17	1.698,559	99,915
Total	112	3445,665	41,347
G500-0,75-2	Quantidade (unidade)	Área Total (nm²)	Tamanho médio (nm)
Microporo	23	15,240	0,663
Mesoporo	134	1.965,295	14,666
Macroporo	8	1.070,260	133,782
Total	165	3.050,795	49,704

Tabela 11 - Resultado da análise da porosidade do carvão produzido a partir de eucalipto Grandis em uma ampliação de 1000x

(conclusão)

G500-1,5-1	Quantidade (unidade)	Área Total (nm²)	Tamanho médio (nm)
Microporo	31	28,773	0,767
Mesoporo	107	1.530,305	14,302
Macroporo	8	1.374,814	171,852
Total	146	2.933,892	62,307
G500-1,5-2	Quantidade (unidade)	Área Total (nm²)	Tamanho médio (nm)
Microporo	35	26,969	0,771
Mesoporo	69	964,212	13,974
Macroporo	9	1.257,249	139,694
Total	113	2.248,43	51,480

Fonte – Autor (2021)

Tabela 12 - Resultado da análise da porosidade do carvão produzido a partir de eucalipto Citriodora em uma ampliação de 1000x

(continua)

C350-0-1	Quantidade (unidade)	Área Total (nm²)	Tamanho médio (nm)
Microporo	65	61,083	0,940
Mesoporo	164	1992,685	12,151
Macroporo	8	580,841	72,605
TOTAL	237	2.634,61	28,565
C350-0-2	Quantidade (unidade)	Área Total (nm²)	Tamanho médio (nm)
Microporo	30	23,763	0,792
Mesoporo	64	1.010,062	15,782
Macroporo	7	448,205	64,029
TOTAL	101	1.482,03	26,86766667
C350-0,75-1	Quantidade (unidade)	Área Total (nm²)	Tamanho médio (nm)
Microporo	39	23	0,6
Mesoporo	71	1041,553	15
Macroporo	15	3010,43	201
TOTAL	125	4.075,37	71,988
C350-0,75-2	Quantidade (unidade)	Área Total (nm²)	Tamanho médio (nm)
Microporo	81	56,694	0,700
Mesoporo	154	1.156,995	7,513
Macroporo	5	592,271	118,454
TOTAL	240	1.805,96	42,222
C350-1,5-1	Quantidade (unidade)	Área Total (nm²)	Tamanho médio (nm)
Microporo	40	32,289	0,807
Mesoporo	113	1.408,658	12,466
Macroporo	3	305,288	101,763
TOTAL	156	1.746,24	38,345
C350-1,5-2	Quantidade (unidade)	Área Total (nm²)	Tamanho médio (nm)
Microporo	78	58,811	0,754
Mesoporo	97	975,032	10,052
Macroporo	10	846,266	84,627
TOTAL	185	1.880,11	31,811
C500-0-1	Quantidade (unidade)	Área Total (nm²)	Tamanho médio (nm)
Microporo	43	26,126	0,608
Mesoporo	123	1.478,194	12,018
Macroporo	10	992,409	99,241
TOTAL	176	2.496,73	37,289

Tabela 12 - Resultado da análise da porosidade do carvão produzido a partir de eucalipto Citriodora em uma ampliação de 1000x (conclusão)

C500-0-2	Quantidade (unidade)	Área Total (nm²)	Tamanho médio (nm)
Microporo	49	39,768	0,812
Mesoporo	178	1.828,468	10,272
Macroporo	9	883,113	98,124
TOTAL	236	2.751,35	36,403
C500-0,75-1	Quantidade (unidade)	Área Total (nm²)	Tamanho médio (nm)
Microporo	64	60,749	0,949
Mesoporo	132	1.137,751	8,619
Macroporo	9	1.106,323	122,925
TOTAL	205	2.304,82	44,164
C500-0,75-2	Quantidade (unidade)	Área Total (nm²)	Tamanho médio (nm)
Microporo	21	15,082	0,718
Mesoporo	84	1.473,155	17,538
Macroporo	17	2.008,293	118,135
TOTAL	122	3.496,53	45,464
C500-1,5-1	Quantidade (unidade)	Área Total (nm²)	Tamanho médio (nm)
Microporo	21	13,080	0,623
Mesoporo	165	2.666,704	16,162
Macroporo	5	615,131	123,026
TOTAL	191	3.294,92	46,604
C500-1,5-2	Quantidade (unidade)	Área Total (nm²)	Tamanho médio (nm)
Microporo	24	16,293	0,679
Mesoporo	50	903,199	18,064
Macroporo	16	2.169,104	135,569
TOTAL	90	3.088,60	51,437

Fonte – Autor (2021)