



Universidade Estadual Paulista
"Júlio de Mesquita Filho"
Programa Interunidades



Mestrado

Engenharia Civil e Ambiental

FLÁVIA TOQUETI

**ESTUDO DE BIOCHAR DE CAPIM NAPIER E AVALIAÇÃO
DE SUA CAPACIDADE DE ADSORÇÃO DE METAIS**

Dissertação apresentada como requisito para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Área de Concentração Saneamento.

Orientadora: Prof. Dr^a. Marina Piacenti da Silva

FLÁVIA TOQUETI

**ESTUDO DE BIOCHAR DE CAPIM NAPIER E AVALIAÇÃO
DE SUA CAPACIDADE DE ADSORÇÃO DE METAIS**

Dissertação apresentada como requisito para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Área de Concentração Saneamento.

Orientadora: Prof. Dr^a. Marina Piacenti da Silva

Co-orientadoras: Prof. Dr^a. Maria Lúcia Pereira Antunes e Prof. Dr^a. Carolina Letícia Zilli Vieira

T675e

Toqueti, Flávia

Estudo de biochar de capim Napier e avaliação de sua capacidade de adsorção de metais / Flávia Toqueti. -- Bauru, 2023

59 p. : il., tabs., fotos

Dissertação (mestrado profissional) - Universidade Estadual Paulista (Unesp), Faculdade de Engenharia, Bauru

Orientadora: Marina Piacenti da Silva

1. Biochar. 2. Capim Napier (*Pennisetum purpureum*). 3. Fogão Anila. 4. Chumbo. 5. Adsorção. I. Título.

ATA DA DEFESA PÚBLICA DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO DE FLAVIA TOQUETI, DISCENTE DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL, DA FACULDADE DE ENGENHARIA - CÂMPUS DE BAURU.

Aos 25 dias do mês de maio do ano de 2023, às 10:00 horas, por meio de Videoconferência, realizou-se a defesa de DISSERTAÇÃO DE MESTRADO de FLAVIA TOQUETI, intitulada **ESTUDO DE BIOCHAR DE CAPIM-NAPIÊ E AVALIAÇÃO DE SUA CAPACIDADE DE ADSORÇÃO DE METAIS**.

A Comissão Examinadora foi constituída pelos seguintes membros: Profa. Dra. MARINA PIACENTI DA SILVA (Orientador(a) - Participação Virtual) do(a) Departamento de Física / Faculdade de Ciências de Bauru UNESP, Prof. Dr. AROLDO GERALDO MAGDALENA (Participação Virtual) do(a) Departamento de Química / Faculdade de Ciências de Bauru UNESP, Prof. Dr. FRANCISCO LUIZ ARAUJO CÂMARA (Participação Virtual) do(a) Departamento de Produção Vegetal / Faculdade de Ciências Agrônômicas de Botucatu. Após a exposição pela mestrande e arguição pelos membros da Comissão Examinadora que participaram do ato, de forma presencial e/ou virtual, a discente recebeu o conceito final APROVADA. Nada mais havendo, foi lavrada a presente ata, que após lida e aprovada, foi assinada pelo(a) Presidente(a) da Comissão Examinadora.

Marina Piacenti
da Silva

Assinado de forma digital
por Marina Piacenti da Silva
Dados: 2023.06.16 14:22:35
-04'00'

Profa. Dra. MARINA PIACENTI DA SILVA

“A mente que se abre a uma nova ideia jamais
voltará ao seu tamanho original”.

Albert Einstein

AGRADECIMENTOS

Primeiramente à D. Dirce, minha mãe, ao Walter, meu parceiro de jornada e Ahau, nosso filho, que sempre apoiaram em minhas escolhas de maneira incondicional.

Aos amigos Terezinha, Lourdinha, Ana Paula, Claudia e Luís que, como luzes guiaram meu caminho ao encontro da querida Profª e amiga Carolina, que me ajuda a recordar a tarefa nesta vida e me estimulou no caminho da pesquisa, nutrindo essa intenção até que se tornasse realidade.

Ao Professor Gustavo, que me acolheu neste programa e sabiamente me encaminhou à Professora Malu, com quem sonhamos este projeto, o qual é belamente orientado em sua execução pela Profª Marina, tornando algo tão distante em realidade.

Aos excelentes professores e colegas de estudos e pesquisas, Thalita, Luís, Hulder, Paola, Raquel, Caroline, Emerson, colegas presentes nos laboratórios da Unesp, sempre dispostos ajudar e colaborar com minha aprendizagem e desenvolvimento na pesquisa.

Aos Professores Aroldo, Adriano e Francisco por suas valiosas contribuições para a conclusão deste trabalho, assim como à Professora e colega Waverli que prontamente atendeu meu convite.

À UNESP e seus departamentos por oferecerem a oportunidade de me desenvolver pessoalmente e profissionalmente.

Resumo

Na atualidade, existem fortes evidências que as atividades humanas vêm causando intensos impactos nos sistemas terrestres e sua resiliência, diante do aumento populacional e suas pressões sobre o meio, fazendo-se urgente ações que integrem o desenvolvimento contínuo das sociedades à manutenção dos sistemas terrestres, garantindo sua resiliência. De acordo ao conceito das fronteiras planetárias, a Terra contém limites ambientais, os quais sofrem perturbações a partir das ações humanas sendo que a violação de qualquer dessas fronteiras coloca o planeta em risco, podendo derivar em alterações irreversíveis. Muitas dessas fronteiras já tiveram seus valores-limite extrapolados, como o da água e o da poluição ambiental. Diante deste quadro, a busca por soluções mitigadoras torna-se imprescindível para a garantia da resiliência planetária e seus recursos a médio e longo prazo, o que é de fundamental importância para a qualidade e existência dos sistemas vivos. Como potencial mitigador, o *biochar*, obtido pela queima de biomassa de diferentes resíduos agrícolas com pouco ou nenhum oxigênio, vem sendo estudado para diversas aplicações, como a melhoria da qualidade das águas, por ser um adsorvente de baixo custo e rico em carbono, além de gerar energia em sua produção através do processo de pirólise tornando-se ainda um potencial substituto para combustíveis fósseis. Em função de suas qualidades, este trabalho se propôs a estudar e produzir *biochar* a partir de capim Napier (*Pennisetum purpureum*) em propriedade agrícola, utilizando um fogão Anila, capaz de gerar energia com baixa emissão de gases. O *biochar* produzido neste fogão foi comparado ao *biochar* produzido em laboratório e posteriormente testado na adsorção de chumbo em solução aquosa. O capim escolhido primeiramente foi submetido à análise termogravimétrica - análise térmica diferencial simultânea (TG-DTA) e à Termogravimetria derivada (DTG) para determinar sua resistência térmica e seu comportamento pirolítico. A caracterização do *biochar* foi feita por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), Espectrometria por Energia Dispersiva de Raios X (EDS-MEV) e Espectroscopia na região do Infravermelho com método de refletância total atenuada (FTIR ATR) e a capacidade adsorptiva do *biochar* para o chumbo teve sua quantificação feita por Espectrometria de Emissão Óptica com Plasma Acoplado Indutivamente (ICP-OES). Os resultados obtidos demonstraram que o *biochar* produzido no fogão Anila a uma temperatura média de 257 °C apresenta os mesmos grupos funcionais que o produzido em laboratório na mesma temperatura. Além disso, o *biochar* produzido a partir de capim colhido fresco e seco ao sol por 4 dias apresentou um melhor resultado para a adsorção de chumbo (67,68% de remoção). Os resultados deste trabalho mostram que o *biochar* produzido a partir de capim nabiê pode ser obtido em fogão convencional, mostrando-se uma excelente tecnologia social para a mitigação de contaminação local por metais, contribuindo para a melhoria global avanço sobre as fronteiras planetárias.

Palavras-chave: Biochar. Capim Napier (*Pennisetum purpureum*). Fogão Anila. Chumbo. Adsorção.

Abstract

Currently, there is strong evidence that human activities have been causing intense impacts on Earth systems and their resilience, in the face of population growth and its pressures on the environment, making urgent actions that integrate the continuous development of societies to the maintenance of Earth systems, ensuring its resilience. According to the concept of planetary borders, the Earth contains environmental limits, which are disturbed by human actions, and the violation of any of these borders puts the planet at risk, which may lead to irreversible changes. Many of these borders have already had their limit values extrapolated, such as water and environmental pollution. Given this situation, the search for mitigating solutions becomes essential to guarantee planetary resilience and its resources in the medium and long term, which is of fundamental importance for the quality and existence of living systems. As a mitigating potential, biochar, obtained by burning biomass from different agricultural residues with little or no oxygen, has been studied for several applications, such as improving water quality, as it is a low-cost adsorbent and rich in carbon, in addition to generate energy in its production through the pyrolysis process, making it a potential substitute for fossil fuels. Due to its qualities, this work proposed to study and produce biochar from Napier grass (*Pennisetum purpureum*) in agricultural property, using an Anila stove, capable of generating energy with low gas emissions. The biochar produced in this stove was compared to the biochar produced in the laboratory and later tested in the adsorption of lead in aqueous solution. The chosen grass was first submitted to thermogravimetric analysis - simultaneous differential thermal analysis (TG-DTA) and derived thermogravimetry (DTG) to determine its thermal resistance and its pyrolytic behavior. The characterization of the biochar was performed by Scanning Electron Microscopy (SEM), Energy Dispersive X-Ray Spectrometry (EDS-SEM) and Infrared Spectroscopy with attenuated total reflectance method (FTIR ATR) and the adsorptive capacity of biochar to lead was quantified by Inductively Coupled Plasma Optical Emission Spectrometry (ICP-OES). The results obtained showed that the biochar produced in the Anila stove at an average temperature of 257°C has the same functional groups as the one produced in the laboratory at the same temperature. In addition, the biochar produced from freshly harvested grass and dried in the sun for 4 days showed a better result for lead adsorption (67.68% removal). The results of this work show that the biochar produced from napier grass can be obtained in a conventional stove, proving to be an excellent social technology for the mitigation of local contamination by metals, contributing to the global progress on planetary boundaries.

Keywords: Biochar. Napier grass (*Pennisetum purpureum*). Anila stove. Lead. Adsorption.

Índice de Figuras

Figura 1 – Fronteiras Planetárias	15
Figura 2 – Crescimento da população mundial.....	18
Figura 3 – Fogão Anila, mostrando seu funcionamento.....	29
Figura 4 – Benefícios ambientais, financeiros e sociais da aplicação do biochar.....	30
Figura 5 – Capim Napier ou capim elefante.....	34
Figura 6 – Projeto de fabricação do fogão tipo Anila.....	35
Figura 7 – Dimensões do fogão Anila em seu projeto original.....	36
Figura 8 – Amostras coletadas de capim Napier para a produção de biochar A) capim seco-seco; B) capim verde-seco; C) capim verde.....	36
Figura 9 – Produção do biochar em laboratório – picando as amostras.....	38
Figura 10 – Processo de secagem.....	38
Figura 11 – Resultado das queimas em mufla a 250°C, 450°C e 800°C respectivamente..	39
Figura 12 – Fotos do fogão Anila e detalhes do funcionamento.....	39
Figura 13 – Biochar produzido no fogão Anila.....	40
Figura 14 – Biochars produzidos pelo fogão Anila - experimentos 1 ao 12.....	40
Figura 15 – Biochar obtido e peneirado em 8 mesh e 18 mesh respectivamente.....	41
Figura 16 – Preparação de amostras para Termogravimetria: A) capim seco-seco; B) capim verde-seco e; C) capim verde.....	41
Figura 17 – Fluxograma da metodologia.....	43
Figura 18 – Curvas de TG-DTA e % de massa das amostras A) CSS; B) CVS; C) CV....	45
Figura 19 – Espectros de Infravermelho de Transformada de Fourier (FTIR) para as amostras CSS, CVS e CV. Queimas a A), B) e C) 250°C e 257°C e D, E e F) 450°C e 800°C.....	47
Figura 20 – Imagens de microscopia eletrônica de varredura para as amostras CSS, CVS e CV. A) 257°C-Anila ; B) 250°C-Lab; C) 450°C-LAb e D) 800°C-Lab.	50
Figura 21 – Porcentagem de remoção de Pb em solução simuladora para as amostras CSS Anila, CVS Anila e CV Anila.....	52

Índice de Tabelas

Tabela 1 – Matérias primas para a produção de <i>biochars</i> e suas diferentes aplicações.....	23
Tabela 2 – Outros tipos de fogão para a preparação de biochar.....	28
Tabela 3 – Tabela de análise fatorial.....	37
Tabela 4 – Grupos funcionais presentes para as amostras	48

Lista de Abreviações

BII	Medida de integridade biótica (<i>biotic integrity</i>)
CSS	Capim seco-seco
CVS	Capim verde-seco
CV	Capim verde
E/MSY	extinções por milhão de espécies ao ano (<i>extinctions per million species per year</i>),
EDS	<i>Energy-Disperse X-Ray Spectroscopy</i> (Espectrômetro de Raios X por Dispersão de Energia)
FT-IR	Espetroscopia na região do Infravermelho com Transformada de Fourier
HTC	Hidro-carbonização térmica
IBI	<i>International Biochar Initiative</i>
ICP OES	<i>Inductively Coupled Plasma Optical Emission Spectrometry</i> (Espectrometria de Emissão Óptica por Plasma Acoplado Indutivamente)
MEV	Microscópio Eletrônico de Varredura
Milli-Q®	Sistema de Água Ultrapura
SS	Solução Simuladora (Chumbo)
TG-DTA	Termogravimetria e Análise Térmica diferencial simultâneas
UNESP	Universidade Estadual Paulista

Sumário

RESUMO	I
ABSTRACT	II
ÍNDICE DE FIGURAS	III
ÍNDICE DE TABELAS	IV
LISTA DE ABREVIACÕES	V
SUMÁRIO	VI
1 INTRODUÇÃO	14
2 OBJETIVOS	20
2.1 OBJETIVO GERAL	20
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	21
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	21
3.1 BIOCHAR	21
3.2 MATÉRIA PRIMA UTILIZADA NA PRODUÇÃO DE BIOCHAR	22
3.3 FORMAS DE PREPARAÇÃO – TÉCNICAS DE PRODUÇÃO	25
3.3.1 <i>Condições da pirólise</i>	25
3.3.2 <i>Tipos de reatores</i>	26
3.3.3 <i>Fogão tipo Anila</i>	28
3.4 APLICAÇÕES DO BIOCHAR	29
3.4.1 <i>Biochar para gerenciamento de resíduos</i>	30
3.4.2 <i>Biochar e melhoria do solo</i>	31
3.4.3 <i>Biochar e água</i>	31
3.4.4 <i>Biochar e produção de energia</i>	32
3.4.5 <i>Biochar para mitigar mudanças climáticas</i>	32
3.5 BIOCHAR COMO TECNOLOGIA SÓCIO-AMBIENTAL	33

3.6	BIOCHAR DE CAMPIM NAPIER.....	34
4	MATERIAIS E MÉTODO.....	35
4.1	CONSTRUÇÃO DO FOGÃO TIPO ANILA.....	35
4.2	PREPARAÇÃO DA BIOMASSA.....	36
4.3	TABELA DE ANÁLISE FATORIAL (ALEATORIZAÇÃO).....	37
4.4	PREPARO DAS ANÁLISES DAS AMOSTRAS.....	38
4.5	CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS ADSORVENTES.....	41
4.5.1	<i>Termogravimetria e Análise Térmica diferencial simultâneas (TG-DTA).....</i>	<i>41</i>
4.5.2	<i>Espectroscopia na região do infravermelho com método da refletância total atenuada (FTIR-ATR).....</i>	<i>42</i>
4.5.3	<i>Microscopia eletrônica de varredura.....</i>	<i>42</i>
4.6	AVALIAÇÃO DO POTENCIAL DE REMOÇÃO DE CHUMBO.....	42
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	44
5.1	ANÁLISE TERMOGRAVIMÉTRICA – ANÁLISE TÉRMICA DIFERENCIAL SIMULTÂNEA (TG-DTA).....	44
5.2	ESPECTROSCOPIA DE INFRAVERMELHO DA TRANSFORMADA DE FOURIER.....	46
5.3	MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA.....	49
5.4	AVALIAÇÃO DO POTENCIAL DE REMOÇÃO DE CHUMBO.....	51
6	CONCLUSÕES.....	52
7	PERSPECTIVAS FUTURAS.....	53
8	RECOMENDAÇÕES.....	53
9	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	55

1 INTRODUÇÃO

Na atualidade, existem fortes evidências que as atividades humanas vêm causando intensos impactos nos sistemas terrestres e sua resiliência, diante do aumento populacional e suas pressões sobre o meio, fazendo-se urgente ações que integrem o desenvolvimento contínuo das sociedades à manutenção dos sistemas terrestres, garantindo sua resiliência (STEFFEN, Will *et al.*, 2015).

De acordo com o conceito das fronteiras planetárias, a Terra contém limites ambientais, os quais sofrem perturbações a partir das ações humanas (STEFFEN, Will *et al.*, 2015). A definição das fronteiras planetárias baseia-se em debates dentro da comunidade científica e se organiza em 3 linhas de investigação científica: a agenda da economia ecológica, a ciência do sistema terrestre e a estrutura de resiliência, onde são identificados nove processos-chave para regular a estabilidade do sistema terrestre desde o Holoceno: mudança climática, acidificação dos oceanos, destruição do ozônio estratosférico, o limite do fluxo bioquímico incluindo os ciclos de nitrogênio e fósforo, uso global de água doce, mudança na terra, perda de biodiversidade, carga de aerossóis atmosféricos e poluição química.

À partir de diferentes e apropriadas variáveis, foi definido um efeito de limite (ponto de inflexão) cientificamente comprovado, delimitando assim um espaço topológico com 9 dimensões biogeoquímicas como um “espaço operacional seguro para a humanidade (Rockström *et al.*, 2009b), como se observa na Figura 1. A violação de qualquer dessas fronteiras coloca o planeta em risco, podendo derivar em alterações abruptas e irreversíveis. Um fator crítico é que 6 dessas fronteiras já tiveram seus valores-limite extrapolados, sendo o da água verde e o da poluição ambiental os dois últimos a serem ultrapassados (JABOT, 2023). A “água verde” refere-se à água para consumo direto da chuva e a “água azul” a água para consumo disponível em rios, reservatórios, lagos e aquíferos (CAMPBELL, 2017).

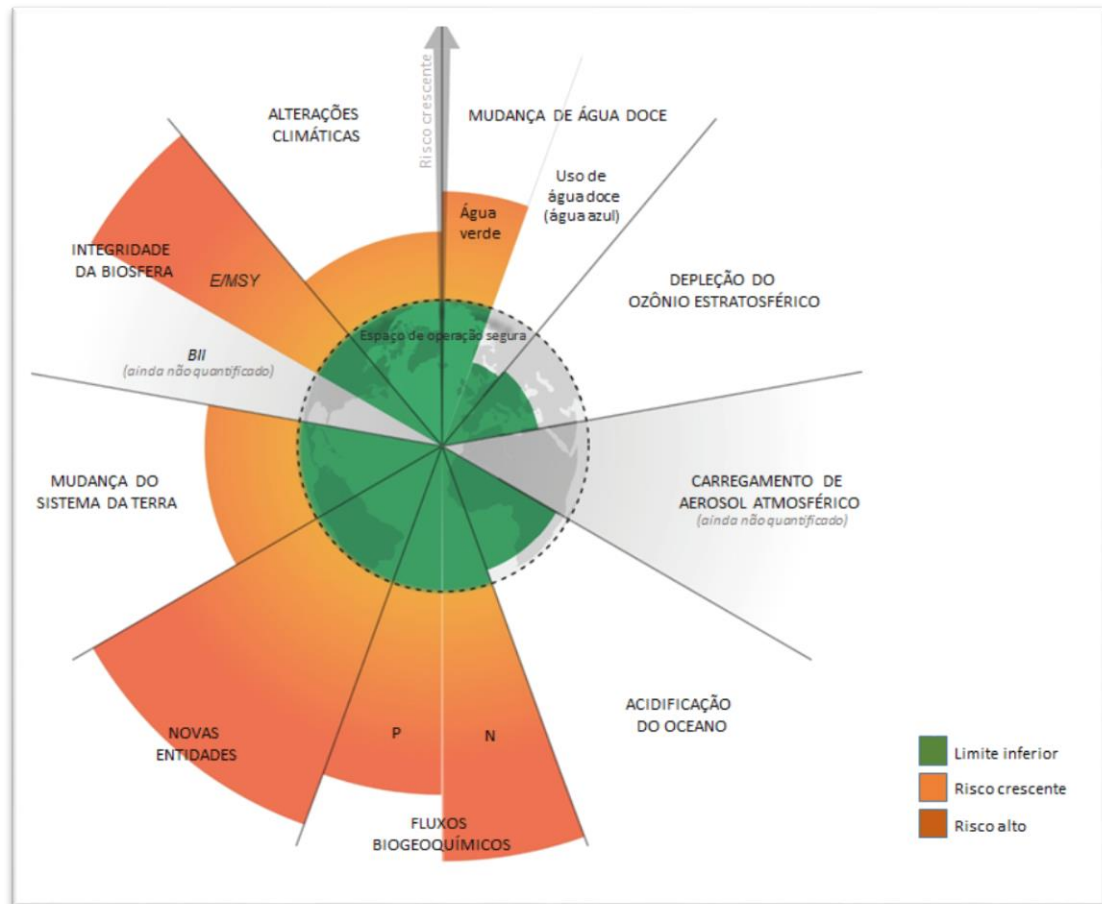


Figura 1: Fronteiras Planetárias.

Fonte: Adaptado de Centro de Resiliência de Estocolmo, 2023.

A agricultura tem papel decisivo na mudança dos sistemas da Terra, uma vez que lavouras e pastagens ocupam aproximadamente 40% da superfície terrestre, tornando essa prática a de maior extensão na face do planeta e por conseguinte, de altíssimo impacto, onde por exemplo, nos trópicos, sua expansão chega às custas da derrubada de florestas, savanas e demais ecossistemas e que, com o aumento populacional, a demanda por alimentos e biocombustíveis também aumenta. Mesmo que haja aumento substancial na intensificação da produção agrícola, a área para agricultura deverá se expandir, pressionando ainda mais os biomas terrestres (CAMPBELL, 2017).

O uso de substâncias agrícolas sintéticas é responsável por grandes impactos ambientais, afetando ecossistemas inteiros, com consequentes danos à saúde. Por exemplo, os pesticidas atingem corpos d'água por escoamento superficial, lixiviação e percolação durante a irrigação ou pela água da chuva, tornando-se grande fonte de poluição difusa de água doce no que tange os recursos hídricos (BARRETO *et al.*, 2020). Fertilizantes orgânicos

e inorgânicos também são fontes de contaminação de metais pesados no solo agrícola através das práticas da calagem e irrigação. Existem níveis diferentes de níquel (Ni), cromo (Cr), cádmio (Cd), zinco (Zn) e chumbo (Pb) nos fertilizantes fosfatados. Em função das longas e repetidas aplicações, o uso constante dos fertilizantes de fosfato pode levar à perigosa acumulação de alguns destes metais (SOUZA *et al.*, 2018), sem contar a contaminação das águas pelas indústrias, as quais, em função dos diferentes tipos de processo que utilizam, acabam lançando também em cursos de água e na atmosfera altos valores de diversos metais. Assim, o transporte de metais através dos ambientes de maneira natural ou entrópica, ocorre através da atmosfera, do solo, da vegetação e das águas (SOUZA *et al.*, 2018).

Também a água utilizada na produção animal muitas vezes vem carregada com dejetos e medicamentos diversos, através do amplo uso de fármacos em medicina humana e veterinária, principalmente antimicrobianos. Suas concentrações vêm aumentando nos solos e corpos d'água nos últimos 20 anos, tendo os ecossistemas aquáticos servido como reservatórios de resistência a antibióticos (MASINDI *et al.*, 2018).

Assim sendo, dentre os grandes impactos está ainda o acesso à água fresca, o qual é de fundamental importância para a manutenção dos ecossistemas e da sociedade, pois trata-se de algo indispensável para os processos industriais agrícola e de produção, estando na base do desenvolvimento socio-econômico (BUNSEN *et al.*, 2021), tendo sido apontada a crise de água como um dos cinco principais riscos em termos de impacto pelo Relatório de Risco Global do Fórum Econômico Mundial (SCHWAB; ZAHIDI; 2020).

Em seu relatório global de 2019, a *Revista Lancet Countdown*, a qual é construída em colaboração internacional multidisciplinar, e vem monitorando as relações entre saúde pública e mudanças climáticas junto à 35 diferentes instituições acadêmicas e agências das Nações Unidas, estima que a combustão do carvão tenha sido responsável por mais de 440.000 mortes prematuras no mundo em 2016 (WATTS *et al.*, 2019). No Brasil, a poluição do ar proveniente de atividades humanas, como emissões das casas, indústria e agricultura resultou em quase 24.000 mortes prematuras em todo território em 2016, demonstrando ser importante causa de mortalidade (FLOSS *et al.*, 2019).

Já em seu relatório de 2021, vemos que a mudança climática, por meio dos padrões de chuvas alterados e aumento da temperatura média, está começando a ter altos impactos, revertendo anos de progresso no combate da insegurança hídrica e alimentar, diminuindo o rendimento das culturas alimentares básicas do mundo, como uma redução de 6,0% para o milho; 3,0% para o trigo de inverno; 5,4% para soja; e 1,8% para o arroz em 2020, em

comparação ao período de 1981–2010 (ROMANELLO *et al.*, 2021), afetando diretamente as populações mais carentes mundo afora. Este mesmo relatório afirma que, “em qualquer mês de 2020, até 19% da superfície terrestre global foi afetada por seca extrema; um valor que não ultrapassou 13% entre 1950 e 1999” (ROMANELLO *et al.*, 2021).

Como vemos, as minorias são as que mais sofrem o fardo da injustiça ambiental, pois 92% das mortes em função de altos índices de poluição ocorrem em países de baixa e média renda demonstrando ser questão ambiental global (FILIPPELLI; TAYLOR; 2018). Assim sendo, a poluição global é uma ameaça existencial à saúde humana e planetária e transgrediu os limites planetários (PERSSON, 2022). Dentro desse contexto, a poluição química, uma das 9 fronteiras planetárias, potencialmente causa diversos problemas aos sistemas terrestres dos quais a vida depende, desequilibrando seus processos vitais, onde inclusive, novos tipos de organismos modificados e desconhecidos anteriormente, ou mesmo metais pesados, são motivos para atenção em nível global (PERSSON, 2022).

A poluição, responsável por aproximadamente 9 milhões de mortes por ano, correspondendo a 1 em cada 6 mortes no mundo, é consequência não intencional da urbanização e industrialização, onde pouco progresso para melhorar este quadro vem sendo notado, especialmente em países de renda mais baixa onde é maior, sendo necessária urgência no controle, prevenção e mitigação para prevenção de doenças relacionadas à poluição, com ênfase no envenenamento por chumbo como poluição química perigosa (FULLER, *et al.*; 2022).

Entre todos os poluentes presentes, os metais pesados recebem atenção especial em função de sua natureza tóxica, mesmo em baixas concentrações. Metais como arsênio (As), chumbo (Pb), níquel (Ni), cádmio (Cd), mercúrio (Hg), cromo (Cr), selênio (Se), zinco (Zn) e cobalto (Co) são altamente tóxicos e podem entrar no corpo humano de diferentes maneiras, como por exemplo, absorvidos pela pele, através dos alimentos, da água e do ar (HUSSAINY *et al.*, 2015). Outras fontes de contaminação por metais pesados incluem ainda o transporte (automóveis, caminhões, aviões), a incineração de resíduos e os aterros. Vale destacar a queima da gasolina contribuindo muito com a emissão de chumbo (Pb) e a incineração de resíduos urbanos colaborando grandemente com a emissão de zinco (Zn), chumbo (Pb), alumínio (Al), selênio (Sn), ferro (Fe) e cobre (Cu) (SOUZA *et al.*, 2018).

Sendo assim, resíduos indesejados de origem antrópica derivam em diferentes tipos de contaminação, tais como: contaminação do ar por material particulado, ozônio (O₃), óxidos de enxofre e nitrogênio (N); poluição da água doce; contaminação do oceano por mercúrio

(Hg), nitrogênio (N), fósforo (P), plástico e resíduos de petróleo; e envenenamento da terra por chumbo (Pb), mercúrio (Hg), pesticidas, produtos químicos industriais, lixo eletrônico e lixo radioativo, os quais são constantemente liberados no ar, na terra, na água e oceanos sem que as consequências sejam devidamente consideradas, tornando-se uma ameaça à existência, afetando diretamente a saúde humana, biosférica, planetária e por consequência, a sustentabilidade da sociedade moderna pois, poluição e biodiversidade estão intimamente ligadas (FULLER, *et al.*, 2022).

Recentemente, em novembro de 2022, a população mundial alcançou a marca de 8 bilhões de seres humanos, podendo chegar a 9 bilhões em 2038 e 10 bilhões em 2059 (WORLD POPULATION PROSPECTS; 2022) como ilustrado na Figura 2, sendo que 2 a 3 bilhões de pessoas que aumentarão a população mundial nascerão em países com maiores índices de pobreza, como a África subsaariana (GOUJON, 2022), sendo o fator determinante para a resiliência planetária, não a quantidade de pessoas que existem ou existirão no planeta, mas mais que nada, seus comportamentos em face à sua vida cotidiana para que estejam preparados para atuar sobre os desafios que viverão, onde serão necessárias mudanças comportamentais individuais e coletivas em face à necessidade de frear o crescimento permanente (GOUJON, 2022).

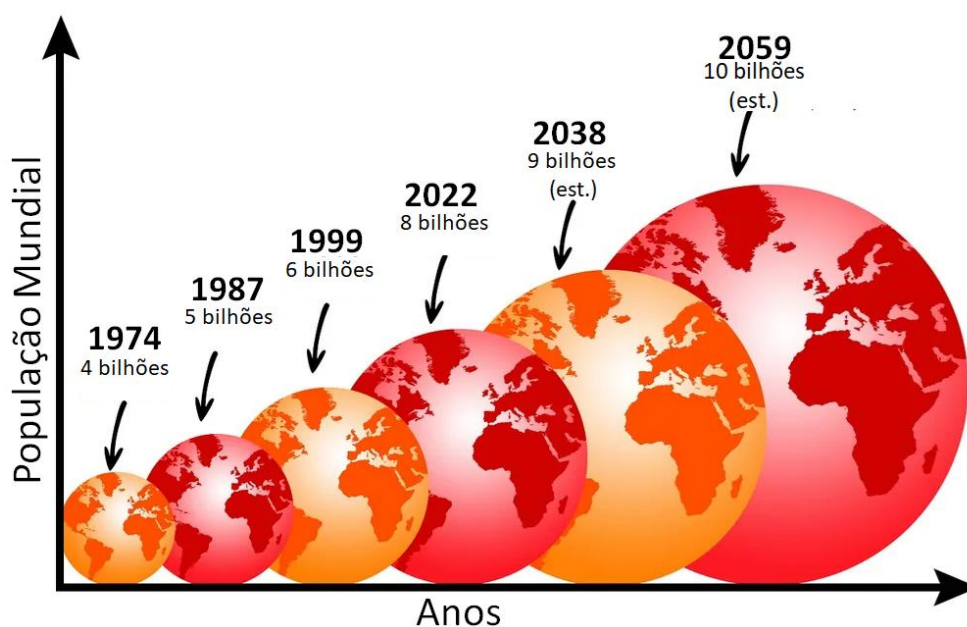


Figura 2: Crescimento da população mundial.
Fonte: Adaptado de Sepúlveda, 2023.

É de amplo conhecimento que o dano à Biosfera terrestre ocorre à partir de políticas econômicas que priorizam e estimulam o crescimento econômico, com a economia global puxada por grandes corporações, sendo este o mecanismo primário, muitas vezes, de amplos danos ambientais (JABOT, 2023). Sendo assim, as mudanças necessárias só virão à partir de uma forte reação reflexiva que derive em ações e mudanças políticas e sociais em larga escala.

Assim, para que o desenvolvimento possa vir associado à preservação de recursos naturais, se faz necessária a pesquisa e o desenvolvimento de novas técnicas de tratamento e mitigação associadas à preservação dos recursos naturais, que contribuam para a mínima contaminação do meio ambiente e possível regeneração dos danos ambientais.

Dentre as tecnologias que estão sendo estudadas, está o biochar ou carvão pirogênico, o qual é produzido por meio da combustão incompleta da biomassa, fonte primária do biochar, o qual vem sendo proposto, entre outras coisas, como uma opção para melhorar a fertilidade do solo e sequestrar carbono, possuindo alta aromaticidade e desempenhando importante papel no ciclo do carbono em função de possuir uma degradação lenta, servindo assim como sumidouro de carbono orgânico a longo prazo (MENG, *et al.*; 2022).

O biochar possui grande potencial de expansão, impactando diretamente diferentes aspectos do sistema de vida humana e planetária, entre eles: rendimento da colheita agrícola, purificação de água (para aplicação doméstica e industrial), combustíveis alternativos (combustível sólido limpo para fogão), purificação de ar, catalisador e produção de biogás. Possui ainda gigantesco potencial em termos de produção de energia, estando disponível para múltiplas aplicações pois a pirólise e a gaseificação (conversão termoquímica) como meio de produção do biochar são formas econômicas e eficientes para produzir ainda diferentes produtos, como bio-óleo, gás combustível, e combustíveis líquidos (SAKHIYA, *et al.*; 2020).

Com tantas aplicações, como as acima descritas, considera-se o uso e aplicação do biochar uma tecnologia ambiental efetiva para proteger as fronteiras planetárias e mitigar seus desequilíbrios (LEHMANN, 2007), inclusive podendo transformar bioenergia em uma fonte negativa de carbono, em escala local ou de campo (LEHMANN, 2007). Dependendo da matéria-prima utilizada e da bioenergia produzida, a pirólise de baixa temperatura com captura de gás oferece oportunidade à bioenergia de ser convertida em indústria negativa em carbono (LEHMANN, 2007), atuando na melhoria das mudanças climáticas, nos ciclos de nutrientes e humidade do solo, agricultura sustentável, controle e novos materiais assim

como na mitigação da poluição ambiental (XIAO, *et al.*, 2018).

Para que se prepare um biochar “inteligente”, com aplicações múltiplas para ambientes sustentáveis, deve-se explorar as potenciais aplicações e recentes avanços no uso em ambientes sustentáveis para estreitar a relação estrutura-aplicação (XIAO, *et al.*, 2018).

Neste caminho, o biochar da capim Napier vem sendo pesquisado por ser uma erva perene com maior rendimento (225–300 t ha⁻¹), crescimento rápido, tolerância ao corte, podendo ser cortado duas vezes em uma única estação, e forte resistência ao estresse, possuindo ainda como qualidade a capacidade de extração de metais pesados como Cd e Zn do solo, podendo reduzir o teor de Cd em 4,6% (QIN, *et al.*; 2022).

Entretanto, não encontram-se estudos disponíveis descrevendo as propriedades de adsorção de metais em água para o biocarvão obtido à partir da pirólise do capim Napier, sendo seu grande potencial de produção *in loco* o maior interesse deste estudo.

Sendo assim, este trabalho propôs o estudo das potencialidades do biochar como tecnologia social, e principalmente, comparar o *biochar* obtido em laboratório e o *biochar* obtido em fogão Anila (tecnologia social). Desta forma, avaliou-se se o potencial adsorativo de um *biochar* obtido de forma barata e simples, que se utiliza de tecnologia social em sua produção, visando atender assim as necessidades sócio-ambientais para a remediação de chumbo (Pb) em água de populações menos favorecidas.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Diante ao problema anunciado, o objetivo deste trabalho é produzir e caracterizar biochar a partir de capim Napier (*Pennisetum purpureum*) utilizando duas metodologias: produção em laboratório e produção em fogão Anila (tecnologia social), visando a obtenção de um biochar barato e de simples produção. Além disso, como exemplo de aplicação, pretende-se comparar a capacidade de adsorção de chumbo (Pb) em água desses materiais, que venha atender as necessidades sócio-ambientais para a remediação de chumbo (Pb) em água.

2.2 Objetivos Específicos

1. Revisão bibliográfica;
2. Preparação do biochar;
 - a. Preparação do biochar à partir de capim Napier em laboratório como material de referência;
 - b. Construção de um fogão Anila que possa ser utilizado para a produção de biochar;
 - c. Produção do biochar de Capim Napier em fogão Anila;
3. Caracterização dos biochars quanto a sua morfologia, porosidade e composição química elementar;
4. Estudo de adsorção de chumbo;

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 *Biochar*

A origem do *biochar* está na Terra Preta de Índio, das populações amazônicas, ou terras antropogênicas, caracterizadas pelo alto teor de matéria orgânica e nutrientes como carbono (C), fósforo (P), cálcio (Ca), magnésio (Mg), zinco (Zn) e manganês (Mn) e matéria orgânica, sendo derivada de antigas práticas humanas para gerenciamento de resíduos de animais e plantas assim como pela prática de queimadas para a formação de terras agrícolas, tendo sua produtividade agrônômica sido reconhecida há séculos, provando ser um excelente melhorador de solo (MORENO-RIASCOS *et al.*, 2020).

O *biochar* é formado de carbono estruturado, possuindo alto grau de porosidade com extensa área de superfície e, sendo um excelente adsorvente, pode ter fundamental importância na mitigação e controle de substâncias tóxicas no meio ambiente (HUSSAINY *et al.*, 2015).

Geralmente são produzidos através do processo de pirólise, ou degradação térmica de uma biomassa, em presença limitada de oxigênio, em temperaturas relativamente baixas (menores que 700°C). Esta pirólise é classificada como lenta, rápida ou flash, dependendo das variáveis aplicadas, como a velocidade de aquecimento, temperatura, tempo de

residência e meio onde ocorre a degradação, fazendo com que diferentes produtos sejam formados a partir da transformação química das moléculas. Carvões são gerados aplicando-se temperaturas inferiores à 500°C e longos tempos de residência (algumas horas) da biomassa no local da pirólise (CONZ *et al.*, 2015).

Embora a maioria dos *biochars* sejam alcalinos, *biochars* com valor de pH < 7 podem ser produzidos em temperaturas mais baixas de pirólise, como por exemplo, < 400°C. De maneira geral, uma redução de matéria volátil pode ser observada com o aumento da temperatura (WANG *et al.*, 2020).

Possuindo boas propriedades, como grande área de superfície e boa estrutura de poros, o *biochar* possui excelente potencial adsorvedor, reduzindo assim ameaças à saúde humana e ambiental (HU *et al.*, 2021). Sua alta capacidade de adsorção ocorre devido a três processos: 1) interações eletrostáticas entre uma superfície de carbono (negativamente carregada) e cátions metálicos; 2) troca iônica entre cátions metálicos e prótons ionizáveis na superfície do carbono e; 3) interação adsortiva em relação aos elétrons de carbono deslocalizados (DUWIEJUAH; ABUBAKAR, 2020).

Gerado à partir da pirólise de diferentes tipos de biomassa (TAN *et al.*, 2015) pode ser utilizado em substituição aos materiais de alto custo, pois apresenta estrutura porosa similar ao carvão ativado, cuja produção precisa de temperatura mais alta além do processo de ativação em si. Em contrapartida, as matérias primas para a produção do *biochar* são de baixo custo e abundantes e podem ser obtidas a partir de resíduos sólidos agrícolas assim como da biomassa de plantas invasoras, promovendo um manejo agrícola win-win, aprimorando a gestão de resíduos e promovendo resiliência ambiental (TAN *et al.*, 2015).

3.2 Matéria prima utilizada na produção do *biochar*

Matérias-primas de origem orgânica e biomassa lignocelulósica, podem ser utilizadas para a produção de *biochar*, fazendo com que sua produção transforme-se em oportunidade para o gerenciamento de diferentes resíduos, colaborando com a redução do volume e potencial poluidor de recursos hídricos (BATISTA, 2018). Além do material de origem animal (ossos e esterco), podem ser utilizados resíduos sólidos urbanos como resíduos sólidos municipais e lodo de esgoto, resíduos agrícolas como bagaços, palhas, capins e restos industriais (SAKHIYA *et al.*, 2020). A Tabela 1 contém algumas das matérias primas para a produção de *biochars* e suas diferentes aplicações:

Tabela 1 – Matérias primas para a produção de *biochars* e suas diferentes aplicações.

Sumário de diferentes espécies de plantas usadas para a produção de <i>biochar</i> de pirólise.				
Tipo de Planta	Espécie	Biomassa pirolisada	Resultados obtidos	Referência
Cereal	Trigo	Casca	<i>Biochar</i> apresentou maior rendimento de massa e energia na temperatura de 400°C e descobriu-se que contém 70,00% de carbono orgânico (C) e 1,57% de hidrogênio (H ₂).	Pawar, <i>et. al.</i> (2022).
	Arroz	Resíduo de Arroz	Este <i>biochar</i> inibiu significativamente a emissão de N ₂ O em comparação com o solo não adubado. A aplicação de uma taxa maior de <i>biochar</i> (3%) aumentou o valor de pH do solo, a abundância dos genes (AOA, AOB, nosZ e nirK), NO ₃ , diminuiu os teores de NH ₄ e a atividade da redutase. Neste estudo o biocarvão preparado a 800 °C apresentou morfologia superficial rugosa com maior área superficial e maior eficiência para sorção do corante BG, sendo a maior capacidade de sorção do corante BG foi de 73,50 mg g ⁻¹ em 60 min. de incubação com pH 8 e temperatura de 60 °C.	Aamer, (2021).
	Soja	Casca	O <i>biochar</i> derivado de casca de amendoim a 550 °C foi de maior estabilidade em termos de matéria residente fixa, alta porosidade e não reteve nenhum dos constituintes tóxicos, podendo ainda ser utilizado como aditivo orgânico.	Vyavahare <i>et al.</i> , (2021).
Óleo	Amendoim	Cascas	A maior área de superfície, menor teor de matéria volátil e menor valor de H:C do <i>biochar</i> BC700 suprimiu a nitrificação líquida e as taxas de consumo de NH ₄ ⁺ , neutralizando a estimulação nas taxas de nitrificação pelo C solúvel adicionado.	Nazir <i>et al.</i> , (2021).
	Canola	Casca	<i>Biochar</i> teve um impacto significativo no processo de respiração do solo, o que resultou em altas leituras em objetos com uma dose de 60 t ha ⁻¹ (18 μmol s ⁻¹ m ⁻²), sendo recomendada para o cultivo da soja, pois aumenta as propriedades físicas do solo arenoso.	Li <i>et al.</i> , (2021).
Fruta	Laranja	Casca	<i>Biochar</i> teve um impacto significativo no processo de respiração do solo, o que resultou em altas leituras em objetos com uma dose de 60 t ha ⁻¹ (18 μmol s ⁻¹ m ⁻²), sendo recomendada para o cultivo da soja, pois aumenta as propriedades físicas do solo arenoso.	Klimek-Kopyra <i>et al.</i> , (2021).
			Este estudo observou <i>biochars</i> com	Gonzalez-

			altos valores de absorção de luz solar semelhantes aos exibidos pelos biochars fototérmicos na literatura, mostrando-se atraentes como potencial material absorvedor de luz em revestimentos de absorvedores solares.	Canche <i>et al.</i> , (2021).
Fibra e Floresta	Algodão	Casca	Entre as condições de pirólise estudadas de <i>biochar</i> derivado de palha de algodão na adsorção de Pb (II), a temperatura de pirólise tem um efeito significativo. A capacidade máxima de adsorção de 124,7mg g ⁻¹ foi obtida a 600 °C com pH ótimo de 5,5.	Wang <i>et al.</i> , (2021).
	Pinheiro	Agulhas	Este estudo mostra a melhoria nas características de combustível sólido do biocarvão à medida que a temperatura de carbonização aumenta como uma indicação de que o biocarvão pode servir como combustível sólido que pode ser queimado e co-combustado com carvão para aquecimento e geração de eletricidade com emissão mínima de poluentes tóxicos. A remoção de amônio pelo biocarvão da casca de café CFH 350 pode atingir a eficiência de 43% em condição ambiente (isto é, 25 °C, concentração inicial de amônio de 50 mg/L e pH de 7). O desempenho de adsorção pode ser melhorado na faixa de pH de 6 a 10.	Oginni; Singh, (2021).
Grãos perenes	Café	Casca	Este estudo demonstra que o biocarvão de casca de coco pode impedir a remodelação da comunidade bacteriana do solo, limitar a dispersão de espécies e fortalecer as ações competitivas entre as bactérias, exibindo ainda uma forte capacidade de adsorção e maior heterogeneidade do solo.	Vu; Do, (2023).
	Coco	Casca	Biomassa de capim-elefante, foi convertida em <i>biochars</i> usando duas temperaturas pirolíticas de 400 °C (<i>Biochar A</i>) e 600 °C (<i>Biochar B</i>). Os dois <i>biochars</i> possuíam boa estabilidade de carbono, retenção de água capacidade, capacidade de troca catiônica, excelente porosidade, bem como grupos funcionais de superfície abundantes na superfície para ligação de nitrato e remoção.	Li, <i>et al.</i> , (2022).
Capim	Napier	Capim seco		ADESEMU YI, <i>et al.</i> , (2020).

Bambu	Bambu picado	De acordo a este estudo, o bambu picado é a fonte mais eficiente para fazer carvão, rendendo uma alta de 74,27% a 300 °C em atmosfera de nitrogênio, onde no bambu D. giganteus, gerou 80% de biocarvão a 300 °C, mostrando-se ainda um adsorvente promissor de ondas eletromagnéticas, desempenhando um papel em células solares sensibilizadas por corantes como eletrodos e na purificação de água como absorvente.	CHATURV EDI, <i>et al.</i> , (2023).
Palha de gramíneas		O presente modelo descreve tendências de rendimento de produção semelhantes para todas as gramíneas consideradas (ou seja, kenaf, bambu, miscanthus, cana canário e <i>switchgrass</i>).	ABHIJEET, <i>et al.</i> , (2020).

Fonte: a própria autora, 2023.

3.3 Formas de preparo – Técnicas de produção

Existem diferentes processos de preparação do *biochar*, como hidro-carbonização térmica (HTC), a torrefação, a pirólise e a gaseificação, à partir das quais a biomassa é convertida em *biochar*, biocombustível e diferentes produtos em diferentes condições de temperatura (QAMBRANI *et al.*, 2017). Dentre eles: a) degradação termal, onde a matéria prima em ambiente selado é imersa na água e aquecida entre 180°C e 250°C, por um período de 24 horas, sob pressão entre 0,5 a 1 MPa (TITIRICI *et al.*, 2007); b) torrefação, processo em que a matéria prima é aquecida lentamente entre 200°C e 300°C, em uma atmosfera sem oxigênio e em pressão ambiente (TUMULURU *et al.*, 2011) e; c) pirólise, processo onde a degradação da matéria orgânica, pode ocorrer em diferentes temperaturas (BATISTA, 2018).

Devido à sua simplicidade, alto rendimento e custo-benefício a pirólise é o método mais utilizado, possuindo ainda o potencial de aumentar o pH, capacidade de troca de íons catiônicos, retenção de nutrientes, incremento de porosidade e área de superfície, comunidade microbiana e capacidade de retenção de água do solo (KUMAR *et al.*, 2023).

3.3.1 Condições da pirólise

As condições de pirólise são um fator muito importante, definindo propriedades do *biochar* resultante, pois existem diferenças em capacidades adsorptivas para *biochars*

produzidos a diferentes temperaturas (BATISTA, 2018). Esse processo resulta em materiais de densidade de média e alta energia, como o *biochar* (~18 MJ/kg) e o bio-óleo (~17 MJ/kg) (MILIAN-LUPERÓN, *et al.*, 2020).

A pirólise pode ser classificada como rápida, lenta ou carbonização e gaseificação, onde os maiores rendimentos de *biochar* são produzidos em pirólise lenta (35%). A pirólise lenta é caracterizada por taxas lentas de aquecimento e longos tempos de residência, onde produtos sólidos, gasosos e líquidos são gerados a partir de diferentes tipos de reatores, com aquecimento interno ou por circulação de gás quente, à pressão atmosférica, com calor fornecido por combustão de uma fonte de alimentação, onde biomassas com alto teor de lignina alcançam rendimentos mais altos de *biochar* com menor produção de líquidos ou bio-óleo em função de reações de craqueamento, sendo a pirólise lenta um bom processo a ser praticado em pequenas propriedades rurais (QAMBRANI *et al.*, 2017).

Já a pirólise rápida diz respeito a curtos períodos de residência, temperaturas moderadas (500–1000 °C) e rápidas taxas de aquecimento ($>2\text{ °C s}^{-1}$), resultando em maiores níveis de biocarvão pirolisados parcialmente quando comparados aos da pirólise lenta, gerando em torno de 75% de bio-óleo, 13% de gases não condensáveis e 12% de biocarvões, resultando em uma mistura homogênea originada da despolimerização da celulose, ligninas e hemiceluloses, possuindo diversas aplicações (QAMBRANI *et al.*, 2017).

Na gaseificação a reação da matéria orgânica, em temperaturas muito altas (700–800 °C), em ambiente controlado de O₂, ou com vapor sem combustão, se decompõe em hidrogênio (H₂), monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO₂) e provavelmente pequenos hidrocarbonetos como metano (CH₄), gerando aproximadamente 85% de gás de síntese (Syngas), usado como combustível em motores a gás e turbinas a gás, composto de H₂, CO, CO₂, CH₄, C₂H₂, C₂H₆ e N₂ sendo o meio oxidante o ar, além de gerar 10% de *biochar* (sólido) e 5% de produto líquido ou alcatrão (hidrocarbonetos aromáticos) (QAMBRANI *et al.*, 2017).

3.3.2 Tipos de reatores

Existem diversos projetos de reatores de pirólise, os quais possuem princípios de funcionamento parecidos com respeito à disponibilidade de O₂, mas podendo variar nas taxas de pressão, calor e tempo de residência, os quais podem alterar as proporções dos produtos finais (QAMBRANI *et al.*, 2017).

Dentre os diferentes reatores de pirólise estão os fornos e “*retorts*” para a modalidade lenta, os conversores para a intermediária e o micro-ondas para a pirólise rápida, sendo que de acordo a Garcia-Nunez *et al.* (2017) a classificação também pode ser alinhada com os produtos finais desejados (óleo, carvão, calor, eletricidade, gases), o modo de funcionamento do reator (batelada ou contínuo), forma de aquecimento (direto ou indireto, autotérmico, micro-ondas), fonte de calor utilizada (elétrico, aquecedor a gás, combustão de biomassa), método usado para carregar o reator (manual, mecânico), a pressão na qual a unidade opera (vácuo, atmosférica, pressurizada), o material usado para a construção do reator (solo, tijolo, concreto, aço), portabilidade do reator (estacionário, móvel) e posição do reator.

O termo reator de pirólise rápida refere-se a reatores projetados para produzir bio-óleo em alto rendimento e, normalmente usam biomassa em pó como matéria-prima para maximizar o rendimento (GARCIA-NUNEZ *et al.*; 2017), sendo utilizados diferentes tipos de reatores, entre eles: vácuo, leito fluidizado, leito transportado, cone rotativo, centrífuga de vórtice, ablativo e reatores tripulados (QAMBRANI *et al.*, 2017).

No caso dos gaseificadores, os mais utilizados são os sistemas de leito fixo, leito fluidizado e leito de fluxo arrastado, podendo ainda ser categorizados em leitos fixos *updraft*, *downdraft* e *cross-flow*, dependendo da direção do fluxo de gás, estando ainda disponíveis gaseificadores de fluxo arrastado, plasma e sistemas de radicais livres (QAMBRANI *et al.*, 2017).

Existem ainda os reatores de pirólise ‘lenta’, como fornos, “*retorts*” e conversores, reatores industriais para a produção de carvão, condensados líquidos e gás de síntese, onde o forno é o equipamento tradicional de fabricação de carvão, utilizado exclusivamente para produzir carvão a partir de toras de madeira; os ‘*retorts*’ são os feitos para pirolisar toras ou pilha de madeira com mais de 30 cm de comprimento e 18 cm de diâmetro, condensando vapores e otimizando o conteúdo energético dos gases; enquanto os conversores produzem pequenas partículas de biomassa de carvão carbonizando, sendo excelentes para a produção em larga escala de carvão e bio-óleo (GARCIA-NUNEZ *et al.*, 2017).

A pirólise por micro-ondas, ou pirólise rápida, é uma opção para dispositivos modulares no gerenciamento de resíduos sólidos, onde suas vantagens sobre as tecnologias tradicionais são a limpeza, controle simples e o rápido aquecimento, tendo ainda a possibilidade de ser utilizado *in loco* por dar a opção de ser modular, entretanto há pouca informação disponível e torna-se oneroso em função do uso de eletricidade, sendo assim mais caro que os sistemas

tradicionais (GARCIA-NUNEZ *et al.*, 2017). Pode-se observar na Tabela 2 outros tipos de fogão listados para a preparação de *biochar*:

Tabela 2 – Outros tipos de fogão para a preparação de biochar.

Tipo de fogão	País	Combustível	Redimento de Biochar (%)
<i>Champion</i> TLUD	Índia	Biomassa robusta (lascas, pellets, galhos, briquetes, etc.)	~ 20
Sampada	Índia	Biomassa robusta (lascas, pellets, galhos, briquetes, etc.)	20 - 25
Vesto	Suiça	Biomassa robusta (lascas, pellets, galhos, briquetes, etc.)	25
MJ fogão a gás para biomassa	Indonésia	Biomassa robusta (lascas, pellets, galhos, briquetes, etc.)	30 - 35
Lucia Fogões	Italia	Biomassa robusta (lascas, pellets, galhos, briquetes, etc.)	~ 30
Anila	Índia, Kenya	Combinação de combustíveis em dois compartimentos separados	20 - 30
BMC Fogão a gás para casca de arroz	Filipinas	Casca de arroz	17 - 35
MJ Fogão a gás para casca de arroz	Indonésia	Casca de arroz	30

Fonte: Adaptado de Lehmann; Joseph, (2015).

3.3.3 Fogão tipo Anila

Biochars podem ser produzidos através de processos industriais modernos altamente controlados, com baixas emissões de gases. Entretanto, é possível alcançar as mesmas condições com tecnologias sociais para sua produção. Um tema desafiador é produzir o *biochar in loco*, em propriedades rurais, para que esses possam ser utilizados no tratamento da água e solo. Geralmente, os métodos de produção mais utilizados nestas condições são os fornos de cava ou com cobertura de terra, os quais emitem grandes quantidades de gases e materiais particulados (SMEBYE *et al.*, 2017).

Existem fogões pirolíticos, como os TLUDs (fogões Top-Lit Up-Draft) e fogões

Anila, que podem gerar *biochar* enquanto fornecem calor para cozinhar, além de possuírem a grande vantagem da queima limpa. Isso porque, os gases derivados da pirólise são queimados principalmente na frente da chama, aumentando o calor e reduzindo as emissões de gases em cerca de 75% em comparação ao fogo aberto (SMEBYE *et al.*, 2017).

Os fogões de pirólise utilizam material orgânico como fonte de geração de energia, assim como produzem um excelente *biochar*. O modelo Anila foi desenvolvido pelo Prof. Ravikumar na Índia, como tecnologia alternativa ao cozimento para aliviar a poluição dentro de casas e cozinhas em todo o terceiro mundo, uma vez que estudos mostram que doenças respiratórias agudas decorrentes da inalação de fumaça de fogos de cozinha, é causador número um de mortes de crianças menores de 5 anos, estimando-se que mais de 2 milhões de crianças morram anualmente (FREISE, 2008). Portanto, este fogão como tecnologia social pode gerar energia além produzir *biochar in loco* que pode ser aplicado na melhoria do solo e descontaminação de água, melhorando a qualidade vida de populações vulneráveis.

Na Figura 3 observa-se o fogão pirolítico Anila em funcionamento, onde a segunda queima é produzida através da combustão dos gases produzidos durante a pirólise da biomassa.

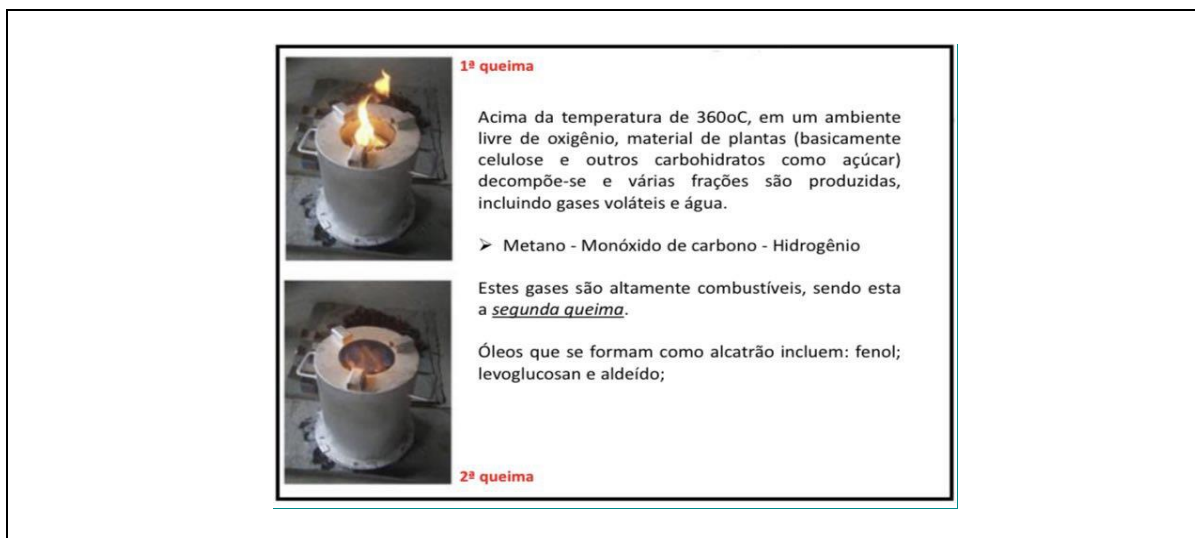


Figura 3: Fogão Anila, mostrando seu funcionamento.

Fonte: ILIFFE, 2009

3.4 Aplicações do *Biochar*

O *biochar* para a gestão ambiental pode ser aplicado em diferentes sistemas e escalas, havendo sinergia e complementariedade em suas diferentes aplicações (Figura 4), como a

melhoria do solo, onde ele aumenta a produtividade ao mesmo tempo em que reduz a poluição, mitigando as mudanças climáticas por meio do manejo de resíduos e na produção de energia, trazendo benefícios ambientais, financeiros e sociais, onde as escalas de produção variam de pequenas unidades domésticas até grandes plantas de produção de energia, sendo produzido assim em diferentes escalas, conforme indicado por Lehmann *et al.*, (2015).

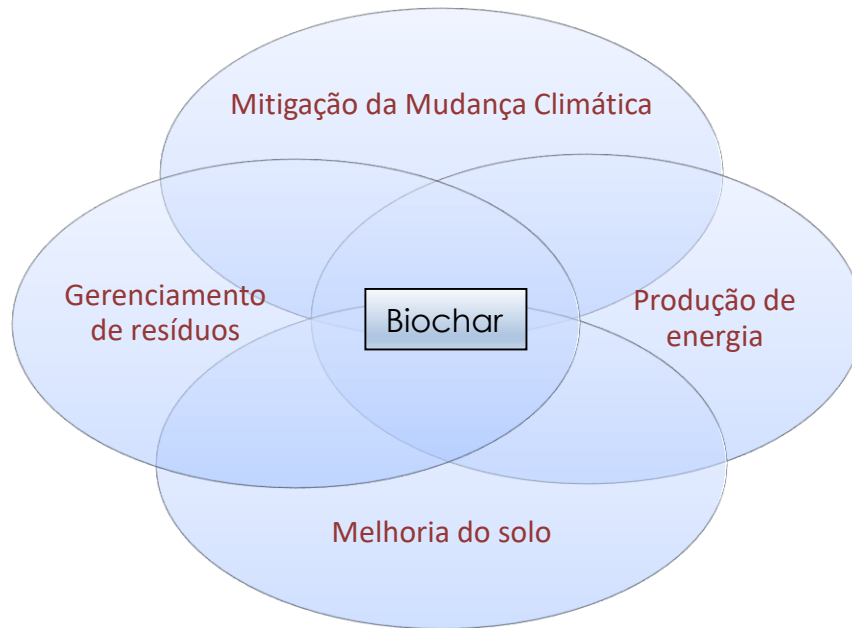


Figura 4: Benefícios ambientais, financeiros e sociais da aplicação do *biochar* – adaptado de Lehmann *et. al.*, (2015)

3.4.1 **Biochar para gerenciamento de resíduos**

O gerenciamento de resíduos é fator de alto impacto ambiental, especialmente por levar à poluição de solo e água superficiais, existindo excelentes oportunidades de produção de *biochar* tanto à partir de resíduos urbanos verdes ou mesmo industriais limpos como à partir de fábricas de papel, onde subprodutos orgânicos oferecem fonte de matéria prima local, gerando oportunidades econômicas, colaborando na mitigação da mudança climática reduzindo as emissões de metano (CH_4) em aterros, reduzindo e reciclando o desperdício de produções industriais, aumentando o sequestro de CO_2 e diminuindo o gasto energético para o transporte de resíduos a longas distâncias (LEHMANN *et al.*, 2015). Ainda de acordo a Lehmann (2015), a produção de *biochar* pode ainda ser utilizada no controle biológico rigoroso de materiais residuais, como lodo de esgoto e estrume animal, em função do

processo de pirólise, a qual ocorre geralmente acima de 350°C, onde o controle de metais pesados pode ainda ser fonte de preocupação.

3.4.2 **Biochar e melhoria do solo**

A melhoria do solo, à partir das práticas adotadas pela Revolução Verde, iniciada no México na década de 1940, baseada na intensificação de práticas agrícolas como variedades culturais melhoradas, irrigação e fertilizantes químicos e agrotóxicos, não é um luxo mas sim uma necessidade de nossa atualidade (LEHMANN *et al.*, 2015).

A incorporação do *biochar* no solo, entre outros benefícios, reduz a compactação do solo, melhora a retenção de água em função de sua alta área de superfície específica, aumenta sua temperatura, especialmente quando feito à partir de resíduos de gramíneas por sua cor escura associada à captação de energia do sol, efeito que beneficia a diferentes comunidades microbianas, além de melhorar a capacidade de troca catiônica, alterando suas propriedades químicas e aumentando sua fertilidade por meio de uma maior disponibilidade de nutrientes benéficos para as plantas (SANCHEZ-REINOSO *et al.*, 2019).

O uso do *biochar* no manejo do solo a longo prazo oferece um excelente caminho para mitigar os efeitos da Revolução Verde na degradação ambiental, pois otimiza a eficiência de nutrientes, melhorando a fertilidade do solo e oferece à agricultores com escassos recursos, a oportunidade de converter resíduos orgânicos e biomassa em biochar, caminhando assim para uma prática agroecossistêmica sustentável pois, a degradação dos solos em diferentes países, está ocorrendo como nunca antes, com intensas consequências para a humanidade (LEHMANN *et al.*, 2015).

3.4.3 **Biochar e água**

A contaminação das águas, especialmente por metais pesados, mesmo em baixas concentrações, podem impactar a saúde humana e ambiental (SERRA, 2019). Biochars feitos a partir de uma grande variedade de biomassas vem sendo submetidos a estudos para avaliar sua eficiência na capacidade de adsorção em ambientes aquosos para a remoção de diferentes metais, como cobre (Cu), chumbo (Pb), íons de cromo (Cr) e mercúrio (Hg) (SERRA, 2019).

Zhou (2013) mostra em seus estudos que *biochars* feitos a partir de bambu, madeira de nogueira, bagaço de cana-de-açúcar e derivados de casca de amendoim alcançaram taxas

de adsorção de 4% a 16% para Cu (II), 11% a 18% de eficiência para Cd (II) e 18% a 35% para Pb (II). E conclui que a adsorção de Cd e Pb é influenciada pela estrutura do poro do *biochar*, enquanto que no caso do Cu a remoção sofreu influência dos grupos funcionais da superfície do *biochar*.

Devido a sua alta área de superfície e acesso a grupos funcionais, o *biochar* tem ótimo desempenho, por exemplo, com íons de cobre, os quais tem afinidade mais forte com este biocarvão, pois sua superfície forma complexos entre Cu^{2+} e grupos funcionais OH e COOH, em alguns casos chegando à eficiência de 97% para metais tóxicos testados. Assim, *biochars* são capazes de remover metais tóxicos com excelente taxa de remoção, a qual varia em função da natureza da biomassa e das propriedades físico-químicas do *biochar* (DUWIEJUAH, 2020).

Grande parte dos estudos realizados para adsorção de metais por *biochar* são feitos a partir da sorção de um único metal, entretanto, metais como Cu, Cd, Pb e Zn, os quais são potencialmente tóxicos, muitas vezes coexistem em águas contaminadas, sendo suas interações e associações com outros componentes fatores conhecidos por influenciar suas mobilidades, tornando-se assim necessária a compreensão dos mecanismos envolvidos e o desenvolvimento de um bio absorvente capaz de remover diferentes metais tóxicos simultaneamente de águas contaminadas (DUWIEJUAH, 2020). Isso torna o *biochar* uma opção econômica e atraente para a adsorção de múltiplos metais e remediação de águas contaminadas.

3.4.4 *Biochar* e produção de energia

A captação de energia durante a produção do *biochar* por pirólise é uma solução ambientalmente eficaz pois pode contribuir significativamente ao suprimento de energia verde, alcançando uma fração de potencial global e podendo contribuir pra a demanda energética, especialmente em regiões dependentes de energia de biomassa, como a maior parte da África rural e grandes áreas da América latina e Ásia, onde a ampla opção de diferentes biomassas pode ser utilizada na geração de energia à partir de madeira, capins, resíduos de colheitas, oferecendo energia limpa e necessária para o cozimento de alimentos (LEHMANN *et al.*, 2015).

3.4.5 *Biochar* para mitigar mudanças climáticas

A habilidade e potencial do biochar para sequestrar carbono e reduzir as emissões de gases de efeito estufa, o tornam atualmente uma das tecnologia mais atrativas para mitigar os efeitos das mudanças climáticas, sendo sua aplicação em solos proposta como uma maneira de reduzir a concentração de CO₂ na atmosfera, servindo de sumidouro de carbono a longo prazo (MORENO-RIASCOS *et al.*, 2020).

A captura e armazenamento de carbono evita sua emissão para a atmosfera, fazendo com que o carbono livre seja transferido para um reservatório de carbono inerte ou passivo (Qambrani *et. al.*, 2017), oferecendo o *biochar* uma via de fácil transferência, possibilitando que mesmo uma pequena quantia de carbono que circula entre a atmosfera e as plantas, seja transferida para um ciclo de biocarvão muito mais lento, gerando impacto nas concentrações atmosféricas de CO₂ (QAMBRANI *et al.*, 2017).

3.5 ***Biochar* como tecnologia sócio-ambiental**

Nos últimos anos, o interesse no *biochar* tem aumentado muito entre pesquisadores em função dos benefícios agrônômicos e ambientais percebidos. Devido aos seus múltiplos benefícios e potencial como ferramenta de mitigação de danos ambientais e do clima, pesquisadores ao redor do mundo que trabalham com o *biochar*, criaram em 2006, a *International Biochar Initiative* (IBI), plataforma que visa “promover boas práticas do setor, colaboração de partes interessadas e padrões ambientais e éticos para fomentar sistemas *biochar* economicamente viáveis que sejam seguros e eficazes para uso na fertilidade do solo e como ferramenta de mitigação climática” (IBI, 2014).

A adoção do uso de *biochars* tem promissores impactos positivos na saúde dos usuários em um contexto social, especialmente no caso da utilização de fogões produtores de biocarvão em função da diminuição da demanda de combustível e reduções na poluição do ar interno, efeitos de rendimentos de colheita melhorados onde, embora a coleta de madeira para combustível ainda ser um fator importante para sua adoção, sua flexibilidade não apenas dá acesso mais amplo a diferentes tipos de combustível, mas também permite que o usuário escolha como usar o *biochar*, podendo ser queimado no fogão para obter energia de cozimento adicional ou removido do fogão e guardado para aplicação no solo ou como filtragem de água ou saneamento (SCHOLZ *et al.*, 2014).

Muitas pesquisas investigam principalmente os processos químicos e termodinâmicos do *biochar* (OTTE; VIK, 2017), porém, poucos estudos abordam os

aspectos econômicos e sócio-culturais da utilização da tecnologia, demonstrando que se faz necessário o surgimento de pesquisas mais interdisciplinares, principalmente para o seu uso como tecnologia social, onde os atores relevantes são responsáveis pelo projeto, implementação e sua operacionalização dentro do sistema para resolver problemas e projetar soluções adequadas. Apenas a consideração de fatores tanto técnicos como sociais pode levar à implementação bem-sucedida de tecnologias de *biochar* (OTTE; VIK, 2017).

3.6 **Biochar de capim Napier**

Uma parte fundamental que define o escopo potencial dos projetos de biocarvão é a disponibilidade de biomassa ou quais categorias poderiam ser mais apropriadas sendo altamente específicas de acordo ao local e ao sistema, podendo ser utilizados diversos tipos de biomassa para produzir biocarvão, havendo muitas vezes oportunidades quanto ao custo associado ao uso de uma fonte de biomassa específica para pirólise, sendo esta uma questão sensível para os países em desenvolvimento onde os solos geralmente são degradados resultando em recursos limitados de biomassa, devendo a disponibilidade de material sempre ser levada em consideração (SCHOLZ *et al.*, 2014).

A Figura 5 apresenta o capim Napier (*Pennisetum purpureum*), também conhecido como capim elefante, o qual é uma gramínea perene da família *Poaceae*, originária do continente africano e introduzida no Brasil em 1920. Ele apresenta rápido crescimento (3 a 5 m de altura), podendo ser colhido até quatro vezes por ano, sendo de fácil propagação e resistente a doenças.



Figura 5: Capim Napier ou capim elefante (*Pennisetum purpureum*)
Fonte: a própria autora, 2023.

Sendo assim, essa gramínea apresenta potencial significativo como precursor para a produção de *biochar*, chegando sua produtividade em torno de 30 toneladas por hectare (t/ha). O Brasil possui potencial para produção de 1,2 Gt de biochar por ano de capim Napier, (FERREIRA, 2019), o qual, pode ser convertido em biochar de boa qualidade. O capim Napier quando convertido em biochar com temperaturas pirolíticas entre 400°C e 600°C, possui boa estabilidade de carbono, assim como retenção de água, excelente porosidade, capacidade de troca catiônica, bem como grupos funcionais de superfície abundantes em sua superfície (ADESEMUYI, 2020).

4 MATERIAIS E MÉTODO

4.1 Construção do fogão tipo Anila

O fogão utilizado neste trabalho foi produzido na Metalúrgica Irmãos Quessada, em Bauru-SP, a partir de chapa de ferro de 3/16'' (4,75mm), cortada a laser, dobrada e soldada de acordo com o projeto para fabricação do fogão tipo Anila que pode ser visto na Figura 6, respeitando as dimensões de seu projeto original (Figura 7). Para seu aquecimento durante a produção do *biochar*, utilizou-se lenha seca de eucalipto, e sua temperatura durante o uso e funcionamento foi medida através de termômetro digital com sensor termopar tipo K.

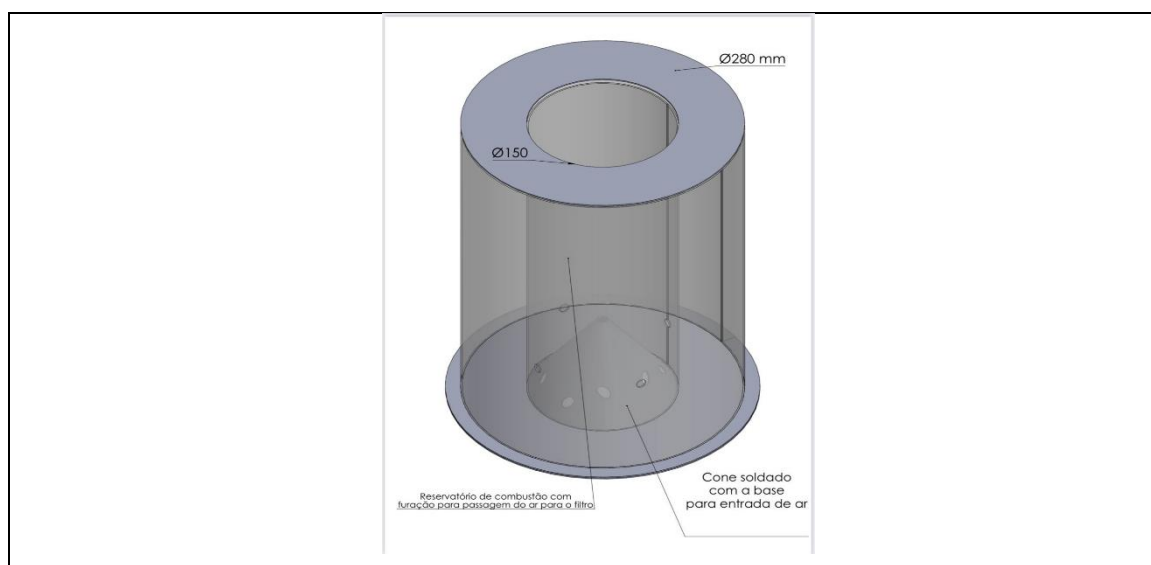


Figura 6: Projeto para fabricação do fogão tipo Anila
Fonte: adaptada de FREISE, 2008.

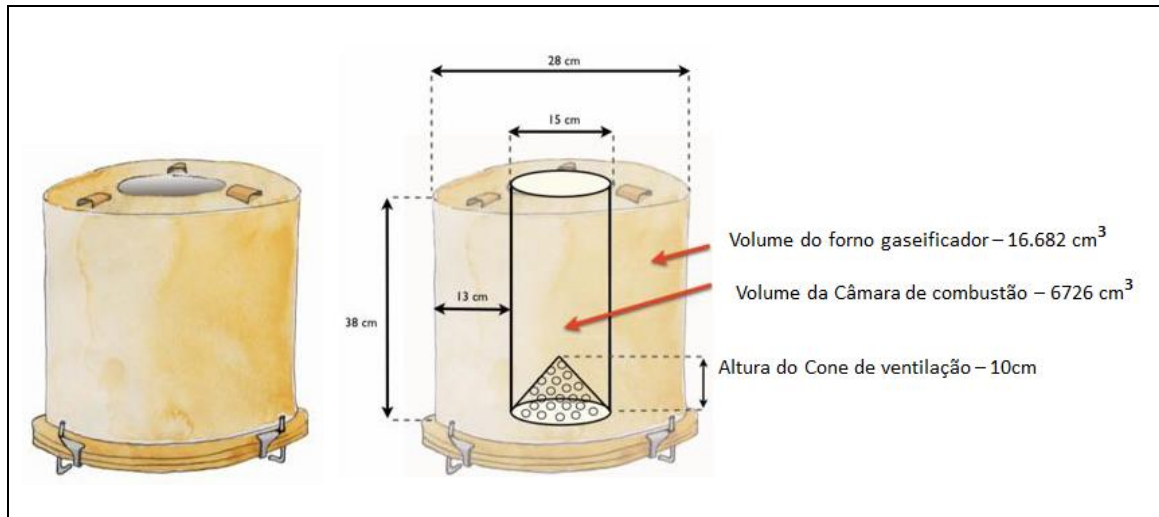


Figura 7: Dimensões do fogão Anila em seu projeto original
Fonte: FREISE, 2008.

4.2 Preparação da biomassa

O capim Napier (*Pennisetum purpureum*) foi coletado no Sítio Casa do Jatobá em Arealva/SP, Brasil. Esta propriedade rural há mais de 13 anos vem recebendo manejo agroecológico. Foram coletados 3 tipos de capim Napier: o capim seco há muitos dias no campo (amostra denominada CSS), o capim verde e fresco recém coletado do campo (amostra denominada CV) e o capim verde e fresco porém exposto ao sol por 4 dias consecutivos para secagem (amostra denominada CVS). A Figura 8 ilustra as 3 amostras coletadas inicialmente para a produção do *biochar*.

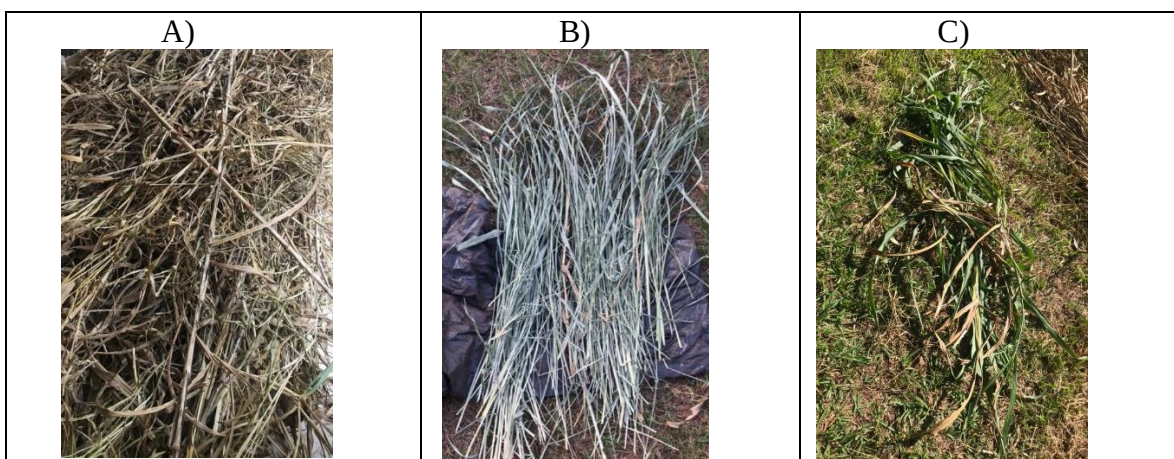


Figura 8: Amostras coletadas de capim Napier para a produção de *biochar* A) capim seco-seco; B) capim verde-seco; C) capim verde.

Fonte: a própria autora, 2023.

4.3 Tabela de análise fatorial (aleatorização)

Na preparação deste experimento e posterior queima no fogão Anila, utilizamos amostra de folha de capim napier seco no campo de forma natural (CSS), a qual foi denominada Capim -1 e amostra de folha verde seca à pleno sol por 4 dias (CVS), a qual foi denominada +1. Quanto à Massa Seca, amostras de 250 g foi denominada -1 e de 150 g foi denominada +1. Por último foi feita queima de capim verde com massa de 150 g (-1).

Tabela 3 – Tabela de análise fatorial.

Nome da amostra	Capim	Massa Seca	Temp. Máxima no fogão	Tempo de queima	Temp. Externa	Umidade externa	Velocidade do vento	Variacao da temperatura durante o tempo de queima Mín/max e média	Ordem aleatória
A1	-1	-1	281°	60'	32°	51%	13 km/h	131°C – 281°C - 224°C	5
A2	+1	-1	320°	60'	29°	49%	19 km/h	175°C – 320°C – 314,1°C	7
A3	-1	+1	284°	60'	28°	50%	10 km/h	143°C – 284°C – 226,3°C	1
A4	+1	+1	278°	60'	30°	51%	15 km/h	157°C – 278°C – 259,5°C	4
A5	-1	-1	287°	60'	28°	61%	6 km/h	109°C – 287°C – 227,6°C	3
A6	+1	-1	255°	60'	27°	69%	24 km/h	148°C – 255°C – 226,5°C	6
A7	-1	+1	296°	60'	29°	61%	20 km/h	159°C – 296°C – 266,5°C	10
A8	+1	+1	272°	60'	28°	63%	8 km/h	173°C – 272°C – 257,8°C	2
A9	-1	-1	298°	60'	27°	55%	4 km/h	145°C – 298°C – 282°C	11
A10	+1	-1	299°	60'	29°	17%	4 km/h	204°C – 299°C – 282,7°C	9
A11	-1	+1	295°	60'	28°	89%	6 km/h	165°C – 295°C – 270,3°C	8
A12	+1	+1	266°	60'	28°	66%	6 km/h	128°C – 266°C – 245,8°C	12
ACV	CV	-1	270°	60'	28°	67%	6km/h	130°C - 270°C - 230°C	13

Fonte: a própria autora, 2023.

4.4 Preparo das análises das amostras

Para avaliar as propriedades físico-químicas e morfológicas do *biochar* a partir do capim Napier, as amostras de CSS, CVS e CV foram submetidas a diferentes processos de pirólise: o primeiro, seguindo uma metodologia descrita na literatura e produzida em laboratório; e o segundo utilizando a queima das amostras em fogão Anila.

Para as amostras preparadas em laboratório utilizou-se os capins coletados no Sítio Casa do Jatobá em Arealva/SP conforme descrito na sessão 2. Primeiramente, as mesmas foram picadas com tesoura (Figura 9), acomodadas em cadinhos de porcelana e secas na mufla a 105°C por 24 horas. Após a secagem (Figura 10), os *biochars* foram preparados a partir das amostras de CSS, CVS e CV por pirólise no forno com aquecimento a 3 temperaturas diferentes: 250°C, 450°C e 800°C, a uma faixa de 5°C min⁻¹, baseado na metodologia descrita por Jesus *et al.*, (2019). Estes materiais foram denotados como CSS-250-Lab, CSS-450-Lab, CSS-800-Lab, CVS-250-Lab, CVS-450-Lab, CVS-800-Lab, CV-250-Lab, CV-450-Lab e CV-800-Lab, cujo resultado podemos contemplar na Figura 11.

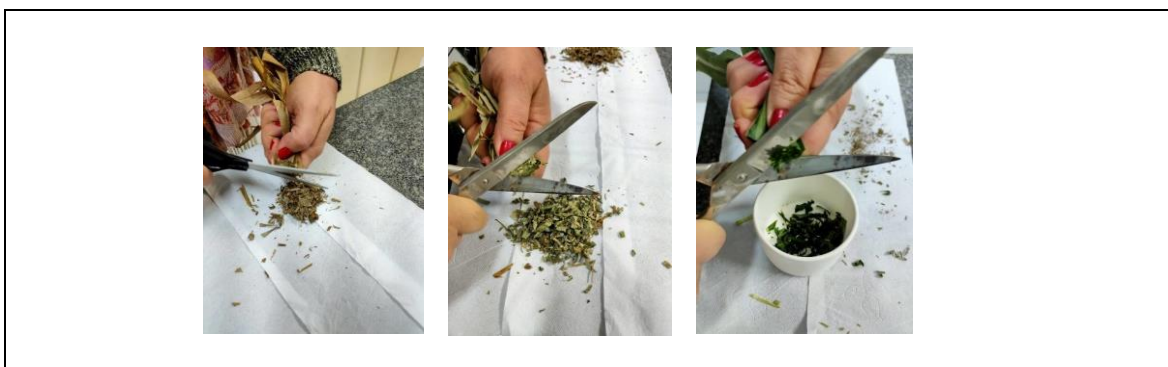


Figura 9: Produção do *biochar* em laboratório – picando as amostras
Fonte: a própria autora, 2023.



Figura 10: Processo de secagem
Fonte: a própria autora, 2023.



Figura 11: Resultado das queimas em mufla a 250°C, 450°C e 800°C respectivamente.
Fonte: a própria autora, 2023.

Para a queima no fogão Anila utilizou-se lenha de eucalipto seca, localmente comercializada para fogão à lenha, a qual foi cortada com moto serra na medida adequada para utilização no fogão Anila, aproximadamente 13 cm. Em seguida, abriu-se o fogão em sua parte de baixo para a inserção das amostras CSS, CVS e CV a serem queimadas na câmara interna, sendo feita sua distribuição de forma homogênea, sendo fechado em seguida. Após as amostras inseridas, se acomodou a lenha no tubo de combustão central, colocando pedaços mais grossos embaixo, médios ao meio e mais finos na parte superior, junto a gravetos e finas ramas para iniciar o fogo. Em sequência, adicionou-se querosene e o fogo foi aceso, aguardando a total combustão da lenha e do capim na câmara interna do fogão, processo que durou aproximadamente 1 hora e com temperatura média de 257°C aferida com equipamento termopar. A queima de cada amostra foi feita individualmente e estes materiais foram denotados como CSS-257-anila, CVS-257-anila, CV-257-anila, estando todas as etapas demonstradas na Figura 12.





Figura 12: Fotos do fogão Anila e detalhes de funcionamento.
Fonte: a própria autora, 2023.

Na figura 13 se pode ver o resultado de uma das queimas e na Figura 14, o resultado de cada uma das 12 queimas aleatórias, as quais foram posteriormente passadas por peneiras de 8 mesh e 18 mesh, como vemos na Figura 15.



Figura 13: Biochar produzido no fogão Anila.
Fonte: a própria autora, 2023.

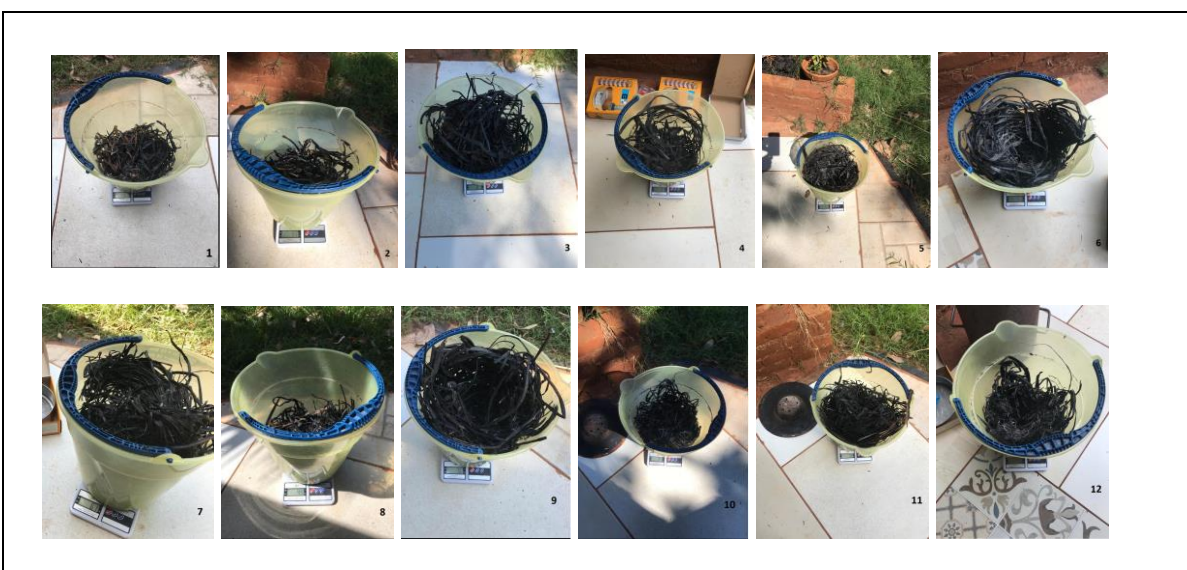


Figura 14: Biochars produzidos pelo fogão Anila - experimentos 1 ao 12.
Fonte: a própria autora, 2023.



Figura 15: Biochar obtido e peneirado em 8 mesh e 18 mesh respectivamente.
Fonte: a própria autora, 2023.

4.5 Caracterização dos materiais adsorventes

4.5.1 *Termogravimetria e Análise Térmica diferencial simultâneas (TG-DTA)*

A análise termogravimétrica - análise térmica diferencial simultânea (TG-DTA) e a Termogravimetria derivada (DTG) são métodos para determinar a resistência térmica dos materiais e seu comportamento pirolítico. Para as análises de Termogravimetria e Térmica diferencial (TG-DTA), foram utilizados os materiais passados por malha 18 mesh e ilustrados na Figura 16:

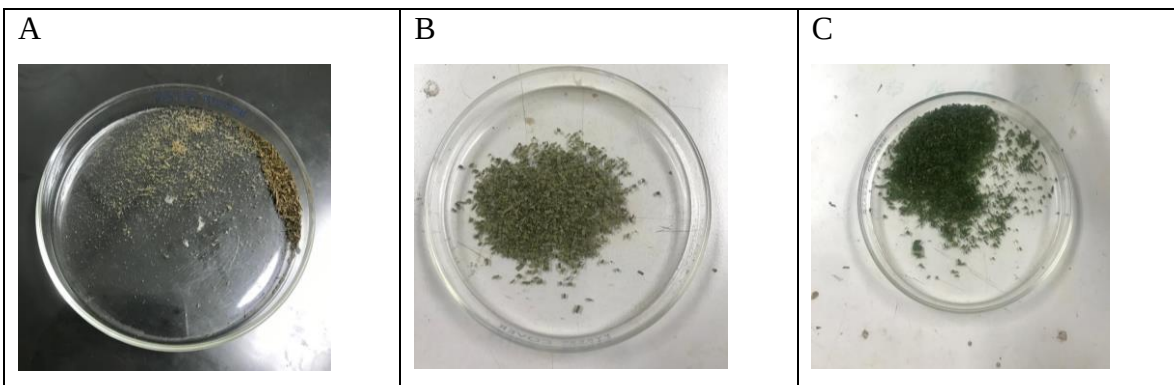


Figura 16: Preparação de amostras para Termogravimetria: A) capim seco-seco; B) capim verde-seco e; C) capim verde.
Fonte: a própria autora, 2023.

As curvas TG-DTA foram obtidas pelo equipamento STA 499 F3 (Netzsch). O equipamento foi ajustado para uma razão de aquecimento de 10°C/min, usando um fluxo de

ar seco de 70 ml/min em cadinho de α -alumina. A faixa de temperatura foi de 27°C a 800°C e utilizou-se a massa amostral de aproximadamente 5,0 mg.

4.5.2 *Espectroscopia na região do infravermelho com método da refletância total atenuada (FTIR-ATR)*

O FTIR-ATR foi realizado com o propósito de investigar os grupos funcionais presentes nas diferentes amostras de biochar de capim-napiê. O equipamento utilizado foi um espectrômetro Vertex 70 (Bruker) com faixa de comprimento de onda entre 4000 a 400 cm^{-1} , resolução de 4 cm^{-1} e 32 varreduras realizadas em um cristal de diamante como suporte.

Para realizar as medidas por esta técnica, uma pequena quantidade das amostras peneiradas em malha 18 mesh dos *biochars* obtidos foi depositada em toda a superfície do cristal com o auxílio de uma espátula. Entre as medidas de cada uma das diferentes amostras, o cristal foi higienizado com álcool etílico absoluto, para remoção de qualquer resquício da amostra anterior.

Assim, foram efetuadas as medidas das três modalidades de *biochar* de capim Napier (CSS, CVS e CV) obtidos em laboratório nas temperaturas de 250°C, 450°C e 800°C, e os obtidos por meio da queima em fogão Anila.

4.5.3 *Microscopia eletrônica de varredura*

As micrografias obtidas por microscopia eletrônica de varredura foram feitas em um microscópio eletrônico de varredura do tipo EVO LS15 da Carl Zeiss, com filamento de tungstênio com voltagem de 4 kV. Primeiramente, pequenas porções das amostras de biochar foram colocadas em microtubos tipo eppendorf, juntamente com etanol e agitados/misturados em banho-maria por 10 min. Em seguida, as amostras foram depositadas em stubs sobre uma fita de cobre e metalizadas com ouro. As imagens foram feitas com ampliações de 500x e 1000x em duas regiões diferentes de cada amostra.

4.6 AVALIAÇÃO DO POTENCIAL DE REMOÇÃO DE CHUMBO

Uma solução simuladora (SS) foi preparada contendo uma concentração conhecida de íons de chumbo e submetida a estudo adsorptivo para remoção desse metal. A SS simuladora foi produzida utilizando padrão de referência monoelementar (SpecSol

Certificate) de concentração de 1000 mg L^{-1} de Chumbo (Pb) que, após diluições analíticas, obteve-se uma solução final na concentração de 100 mg L^{-1} para os estudos adsorptivos. O estudo de adsorção foi realizado em sistemas de bateladas, com volumes reacionais fixos de $0,025 \text{ L}$ e valor de pH fixo em 6 (JESUS, 2009; ADESEMUYI *et. al.*, 2020), pois resultados evidenciam que em pHs com valores acima de 6 é possível alcançar máxima adsorção (SILVA, 2020).

As massas dos adsorventes as amostras CSS, CVS e CV preparadas no fogão Anila, em todas as bateladas, foi de $0,50 \text{ g}$, de acordo com a metodologia de Jesus (2009) e Adesemuyi *et.al.*, (2020). O sistema permaneceu sob agitação contínua durante todo processo, média de 300 rpm , sendo utilizado agitador magnético, em temperatura ambiente, por 60 minutos. Posteriormente, os adsorventes CSS, CVS e CV (Anila) foram separados do sobrenadante com o auxílio de filtro de papel quantitativo faixa preta em funil de vidro, armazenados em tubos falcon para posterior análise.

Após esta etapa, o percentual de remoção das amostras de capim CSS, CVS e CV a partir da pirólise em fogão Anila, foi avaliado por meio da técnica de Espectrometria de Emissão Ótica por Plasma Acoplado Indutivamente (ICP-OES) sendo a concentração de chumbo (Pb) determinada através da curva de sensibilidade pré-determinada para o metal analisado. A curva analítica foi confeccionada utilizando o padrão de referência monoelementar (SpecSol). Duas amostras de água Milli-Q também foram preparadas no mesmo volume e acidez (amostra branco). Na Figura 17 podemos ver o fluxograma simplificado da metodologia aplicada neste estudo:

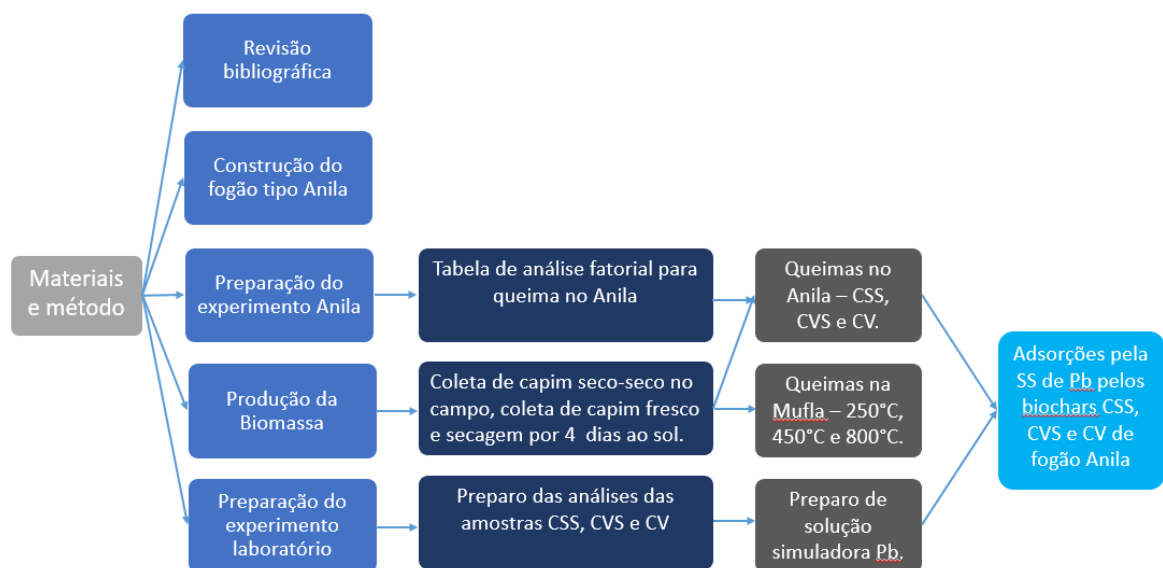


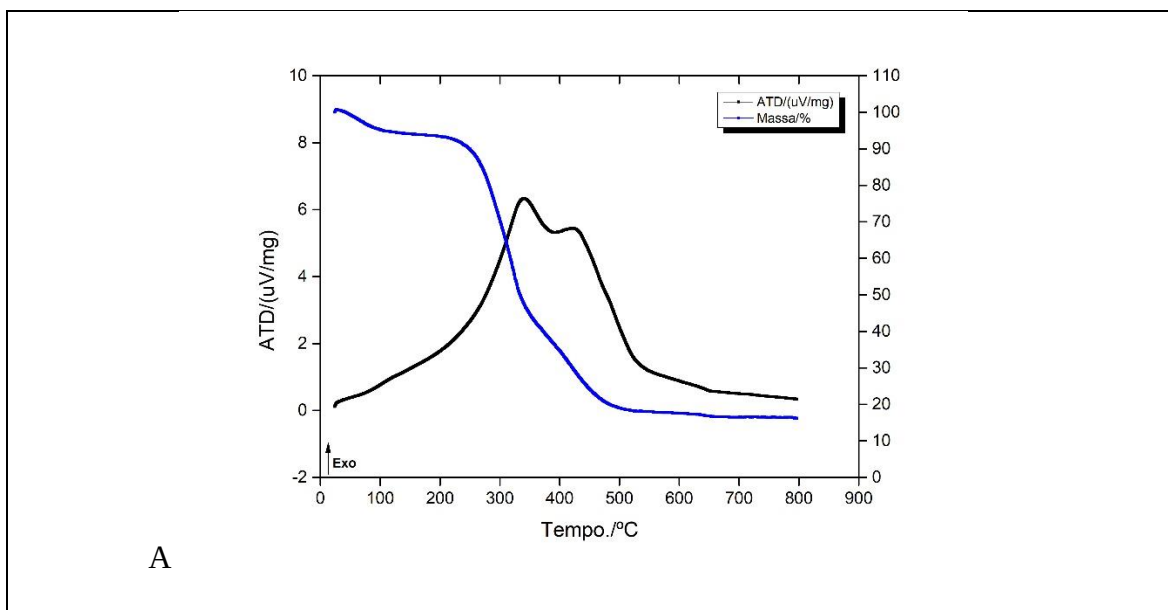
Figura 17: Fluxograma da metodologia

Fonte: a própria autora, 2023.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Análise termogravimétrica - análise térmica diferencial simultânea (TG-DTA)

As curvas TG-DTA para os *biochars* de CSS, CVS e CV são apresentados na Figura 18, onde três principais estágios de degradação foram observados para estes materiais. No estágio 1 de degradação, entre 30°C e 100°C, a perda de massa deve-se principalmente à eliminação de água. Esta perda de massa inicial é mais evidente na amostra de CV, que consiste no capim verde sem processo de secagem natural. No estágio 2, entre 250°C e 350°C, a perda de massa ocorre devido a remoção de materiais voláteis pela degradação de hemicelulose e celulose e na etapa 3, entre 350°C e 500°C, a perda de massa deve-se à degradação da matéria orgânica (REZA *et al.*, 2020).



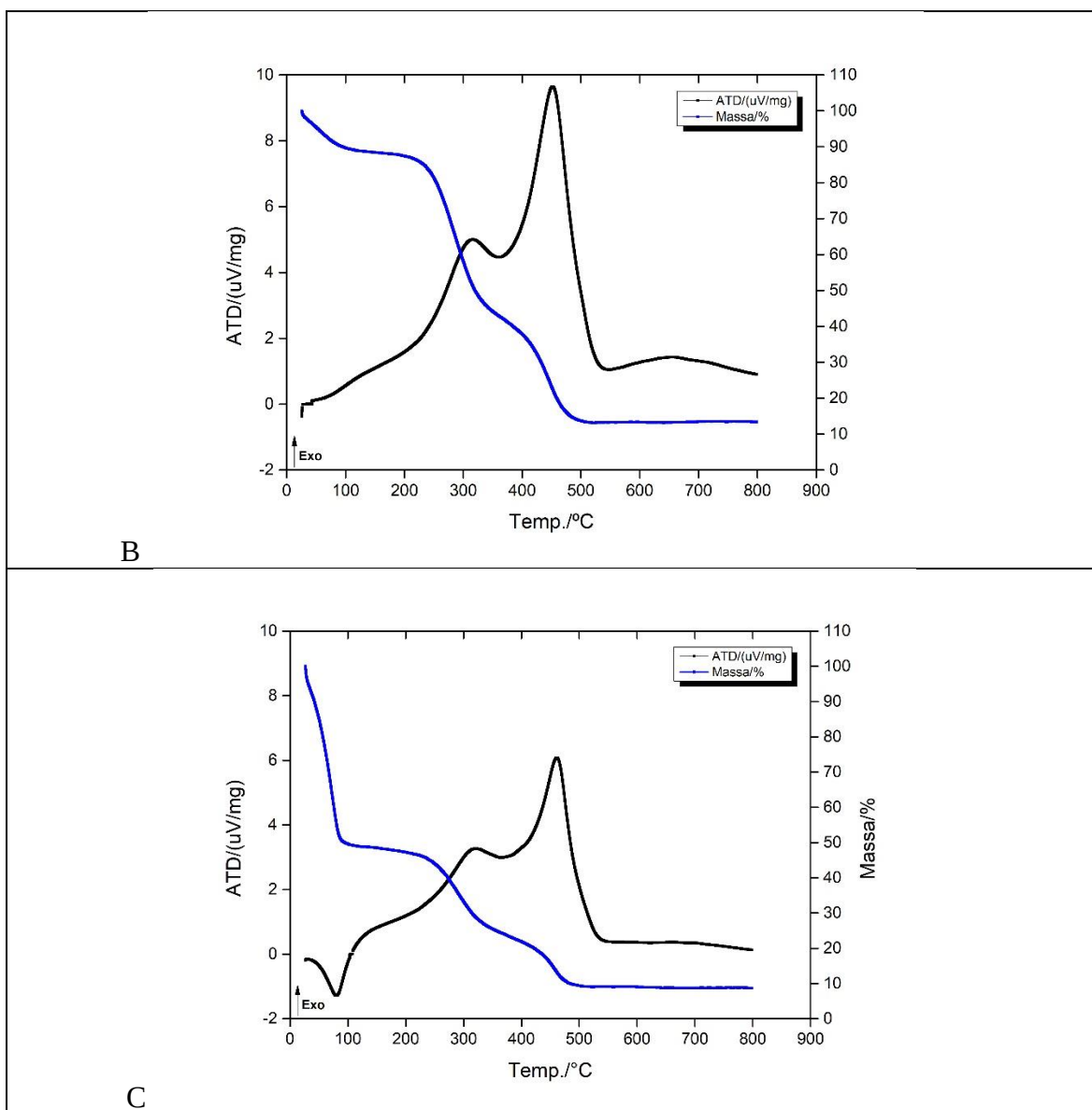


Figura 18: Curvas de TG-DTA e % de massa das amostras A) CSS; B) CVS; C) CV.
Fonte: a própria autora, 2023.

Na Figura 18A são apresentadas as curvas TG-DTA da amostra CSS. Observa-se no estágio 1 (de 30 a 100°C) a perda de água, uma faixa estável de 100°C até 250°C, seguida de duas etapas de perda de massa. Uma ocorre entre 220°C e 350°C ($\Delta m = 50\%$) e está associada ao evento exotérmico da curva DTA em 340°C. A seguinte etapa de perda de massa ($\Delta m = 30\%$) ocorre entre 350-700°C ($\Delta m = 28\%$) e está relacionada à oxidação da matéria carbonácea e decomposição do material associado ao evento exotérmico na curva DTA em 422°C.

Na Figura 18B as curvas TG-DTA da amostra CVS mostram que seu perfil térmico é muito similar ao apresentado pela amostra CSS. No estágio 1, de 30 a 100°C ocorre a perda de água ($\Delta m = 9,6\%$), seguido de um patamar de estabilidade até 206°C. A partir desta

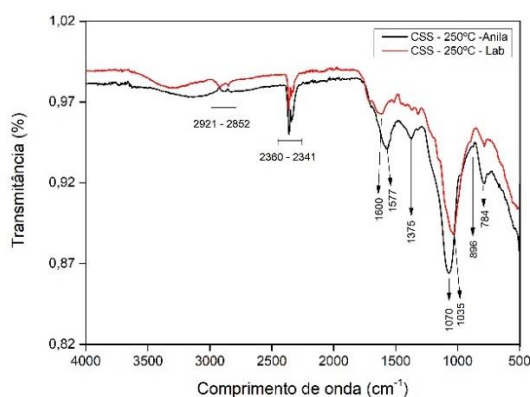
temperatura observa-se uma perda de massa até 360°C ($\Delta m = 45\%$), associada ao evento exotérmico da curva DTA em 317°C. A última perda de massa ($\Delta m = 29,6\%$) ocorre entre 360-548°C, estando relacionada à oxidação da matéria carbonácea e decomposição do material associado aos eventos exotérmicos na curva DTA em 452°C.

Na Figura 18C a curva da amostra CV mostra que no estágio 1, de 30 a 100°C ocorre uma acentuada perda de água ($\Delta m = 48\%$), resultando em um evento endotérmico na curva DTA em 80°C. Esta grande perda de massa inicial é esperada pois esta amostra CV não foi seca inicialmente como as amostras de CSS e CVS. Após a desidratação, observa-se para CV um patamar de estabilidade entre 100°C e 220°C, seguida de outras duas etapas de perda de massa, ocorrendo entre 220°C e 350°C ($\Delta m = 21\%$), associada ao evento exotérmico da curva DTA em 320°C. A seguinte etapa de perda de massa ($\Delta m = 16\%$) ocorre entre 350-540°C e está relacionada à oxidação da matéria carbonácea e decomposição do material. Esta última etapa de perda de massa resultou em um evento exotérmico na curva DTA em 461°C.

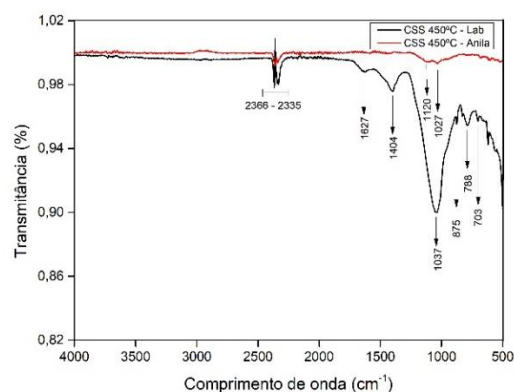
5.2 Espectroscopia de Infravermelho da Transformada de Fourier (FTIR)

Para determinar os constituintes químicos, grupos funcionais e estrutura química do *biochar* de capim Napier em função dos diferentes tipos de preparo, realizou-se a espectroscopia de infravermelho de transformada de Fourier (FTIR). Na Figura 19 são apresentados os espectros das amostras CSS, CVS e CV preparadas na mufla à temperaturas de 250°C, 450°C e 800°C e as amostras CSS, CVS e CV preparadas no fogão Anila, com temperatura média de 257°C.

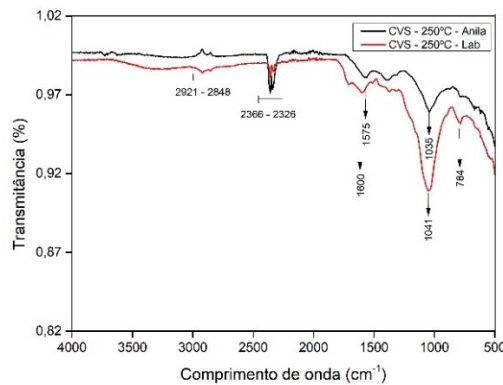
A



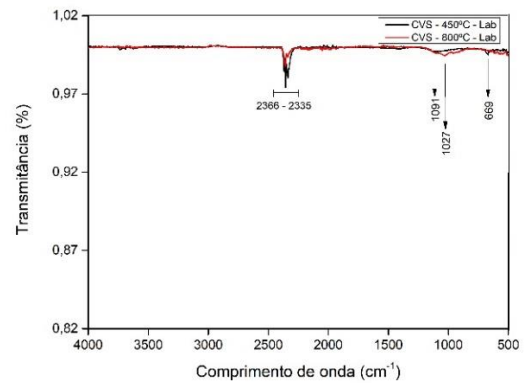
D



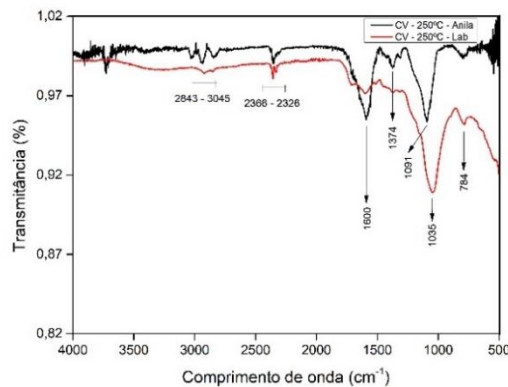
B



E



C



F

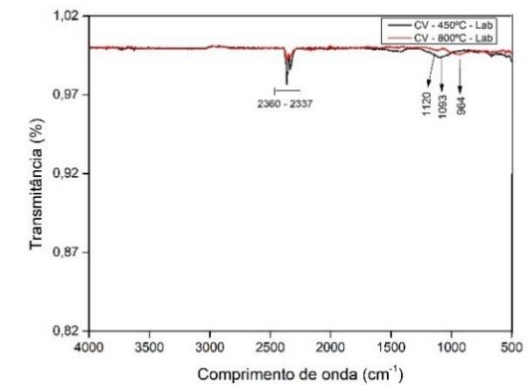


Figura 19: Espectros de Infravermelho de Transformada de Fourier (FTIR) para as amostras CSS, CVS e CV. Queimas a A), B) e C) 250°C e 257°C e D, E e F) 450°C e 800°C.

Fonte: a própria autora, 2023.

Nas Figuras 19A, 19B e 19C são apresentados os espectros dos *biochars* CSS, CVS e CV obtidos a 250°C em laboratório e a 257°C em fogão Anila. Observamos que os picos são semelhantes nas 3 figuras, o que indica que nessa temperatura de queima, independente de ser no laboratório ou no fogão Anila, os *biochars* apresentam grupos funcionais semelhantes, referentes às vibrações do grupo metileno (2921 cm^{-1} , 2852 cm^{-1} , 2848 cm^{-1} , 2843 cm^{-1} , 3045 cm^{-1}), estiramento assimétrico de CO_2 (2360 cm^{-1} - 2341 cm^{-1}), alongamento do anel $\text{C}=\text{C}$ (1600 cm^{-1} , 1577 cm^{-1} , 1575 cm^{-1}), dobramento $\text{C}-\text{H}$ em grupo metila e metileno (1375 cm^{-1} , 1374 cm^{-1}), dobramento $\text{C}-\text{O}$ de alcóois e fenóis (1070 cm^{-1} , 1091 cm^{-1}), éter alifático $\text{C}-\text{O}$ ou alongamento álcool $\text{C}-\text{O}$ (1035 cm^{-1}), carbonatos (896 cm^{-1}) e vibrações $\text{C}-\text{X}$ (Fluoreto, Cloreto, Brometo, Iodeto em 784 cm^{-1}) (CUI *et al.*, 2019; PAIVA, 2010; ADENIYI *et al.*, 2022; YADAV *et al.*, 2016).

Em comparação, nas Figuras 19D, 19E e 19F, que mostram os espectros dos *biochars* de CSS, CVS e CV preparados a 450°C e 800°C em laboratório, observa-se que em altas temperaturas, os materiais perdem a maioria de seus grupos funcionais. Nestas amostras, são apenas observadas a banda de absorção correspondente ao estiramento assimétrico de CO₂ (2360 cm⁻¹ - 2337 cm⁻¹), e sinais discretos para as bandas referentes às vibrações de C=C (1404 cm⁻¹), estiramento de éter alifático C-O ou alongamento álcool C-O (1120 cm⁻¹ - 1093 cm⁻¹), grupos carboxílicos (964 cm⁻¹), carbonatos (875 cm⁻¹), e vibrações C-X (Fluoreto, Cloreto, Brometo, Iodeto em 703 cm⁻¹ e 788 cm⁻¹) (PAVIA, 2014; ADENIYI *et al.*, 2022; YADAV *et al.*, 2016).

Na Figura 19D, observa-se uma exceção do *biochar* CSS 450°C que mantém alguns grupos funcionais, apenas da elevada temperatura de queima. Pode-se justificar este fato por haver sido coletado em campo, tendo sido seco de maneira aleatória, sem que tenha tido condições de secagem controladas, estando exposto à condições que desconhecemos.

Na Tabela 4 é possível observar os grupos funcionais presentes para as amostras CSS, CVS e CV nas queimas a 250°C e 257°C, 450°C e 800°C.

Tabela 4 – Grupos funcionais presentes nas amostras

Grupos funcionais	Comprimento de onda (cm ⁻¹)	Biochar 250°C/257°C	Biochar 450°C	Biochar 800°C	Referências
Grupo -CH ₂	2923 cm ⁻¹ ; 2853 cm ⁻¹ e 1318 cm ⁻¹ –1453 cm ⁻¹	2921 cm ⁻¹ 2848 cm ⁻¹			Cui <i>et al.</i> , 2019.
Estiramento assimétrico CO ₂	2350 cm ⁻¹	2366 cm ⁻¹ - 2326 cm ⁻¹	2366 cm ⁻¹ - 2335 cm ⁻¹	2360 cm ⁻¹ - 2337 cm ⁻¹	Pavia <i>et al.</i> , 2014.
Amida C=O	1700 cm ⁻¹ 1640 cm ⁻¹	1700 cm ⁻¹			Pavia <i>et al.</i> , 2014.
Alongamento do anel C=C	1602 cm ⁻¹	1600 cm ⁻¹			Adeniy <i>et al.</i> , 2022.
Alongamento do anel C=C para todos os biochars aromáticos	1446 cm ⁻¹		1404 cm ⁻¹		Yadav <i>et al.</i> , 2016.

Estiramento					
simétrico forte	1140 cm ⁻¹			1120 cm ⁻¹	Pavia <i>et al.</i> , 2014.
Sulfona S=O					
Éter alifático C-O					
ou alongamento	1092 cm ⁻¹		1093 cm ⁻¹		Yadav <i>et al.</i> , 2016.
álcool C-O					
Éter alifático C-O					
ou alongamento	1018 cm ⁻¹	1035 cm ⁻¹	1037 cm ⁻¹	1027 cm ⁻¹	Yadav <i>et al.</i> , 2016.
álcool C-O					
Grupos					
carboxílicos	995 cm ⁻¹			964 cm ⁻¹	Adeniy <i>et al.</i> , 2022.
Carbonatos	875 cm ⁻¹ e 803 cm ⁻¹	896 cm ⁻¹	875 cm ⁻¹		Yadav <i>et al.</i> , 2016.
Ligação aromática	874 cm ⁻¹ , 832		788 cm ⁻¹		Cui <i>et al.</i> , 2019.
C-H	cm ⁻¹ e 702 cm ⁻¹	784 cm ⁻¹	703 cm ⁻¹		

Fonte: a própria autora, 2023.

5.3 Microscopia eletrônica de varredura

Morfologicamente, as micrografias apresentadas na Figura 20, demonstram que os *biochars* de CSS, CVS e CV para as diferentes temperaturas de queima (257°C-Anila e 250°C, 450°C e 800°C Lab) revelam uma superfície rugosa com poros pequenos e uniformemente distribuídos.

Nas imagens, com ampliação de 1kx, pode-se observar que os *biochars* 257°C-Anila e 250°C-Lab mostram estruturas mais definidas, as quais, à partir do aumento de temperatura vão diminuindo como resultado da destruição dos compostos orgânicos lignocelulósicos por volatilização, resultando assim na perda de compostos orgânicos (ADESEMUYI *et al.*, 2020). Estes resultados concordam com o estudo de Adeniyi *et al.*, (2021), que também observou que à medida que a temperatura de queima aumenta, a estrutura do biochar torna-se mais uniforme, com a quantidade de poros diminuindo para *biochars* preparados a 600°C comparado com o preparado a 400°C (ADENIYI *et al.*, 2021).

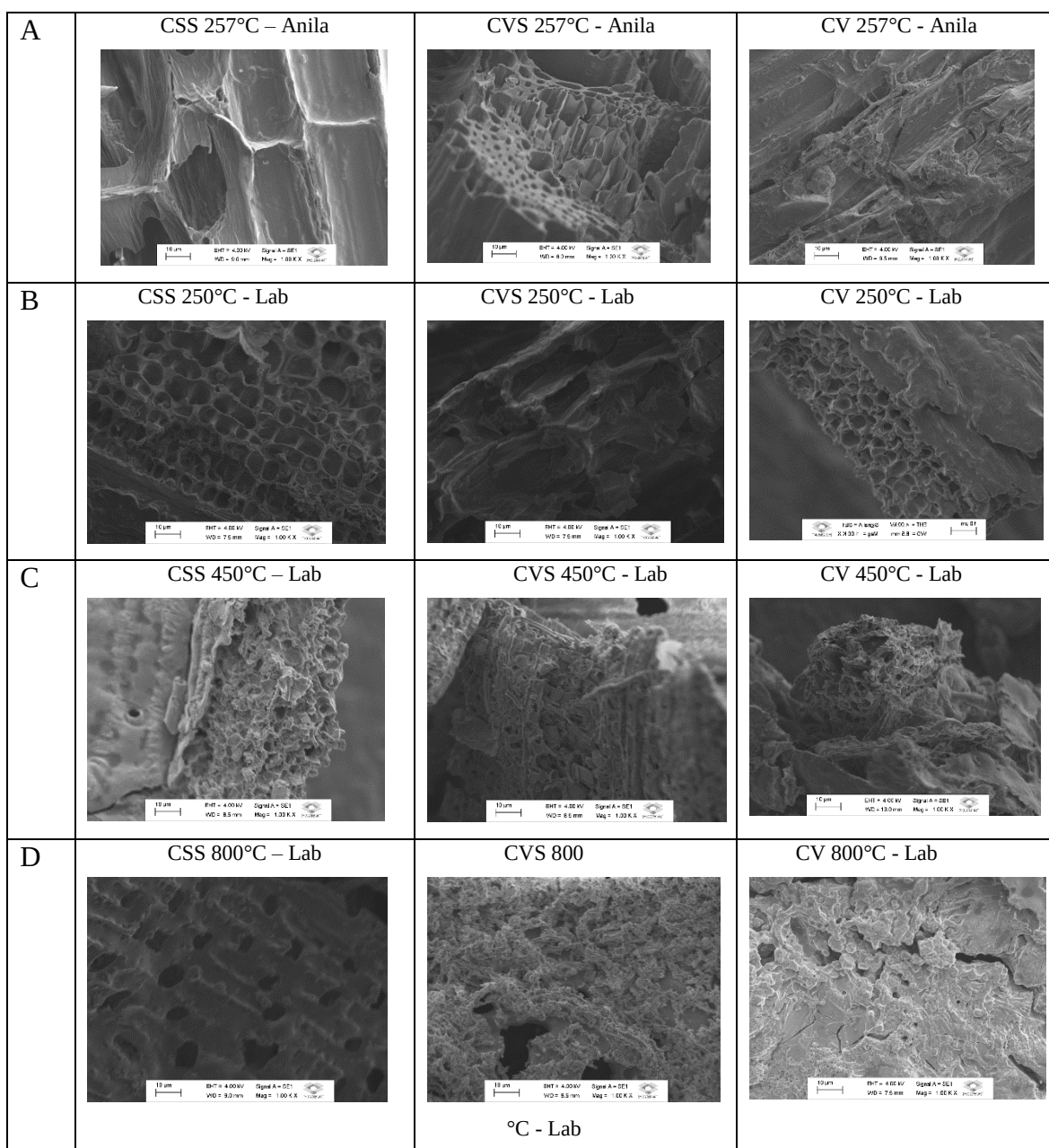


Figura 20: Imagens de microscopia eletrônica de varredura para as amostras CSS, CVS e CV. A) 257°C-Anila; B) 250°C-Lab; C) 450°C-Lab e D) 800°C-Lab.

Fonte: a própria autora, 2023.

Nota-se que as análises térmicas dos diferentes capins, apresentadas na Figura 19, indicam que durante a queima, até aproximadamente 250°C os capins ainda têm muitos grupos orgânicos, sendo que a 2ª etapa da queima de massa ocorre entre 350-700°C ($\Delta m = 28\%$), estando relacionada à oxidação da matéria carbonácea e decomposição do material associado ao evento exotérmico na curva DTA em 422°C.

Os grupos funcionais observados nos *biochars* produzidos a partir de 450°C e 800°C, apresentados na Figura 20 concordam com o trabalho de Reza *et al.* (2020), que demonstra

o efeito da temperatura de pirólise em sua preparação. A composição química de *biochars* é altamente dependente de sua temperatura de queima. Compostos preparados a temperaturas na faixa de 400°C a 600°C, e até 800°C (como neste trabalho) perdem muitos grupos funcionais, demonstrando que temperaturas de pirólise menores favorecem a produção do *biochar* pois, a condensação de compostos alifáticos é mínima em temperaturas de pirólise mais baixas (ADENIYI *et al.*, 2021).

Pensando nos *biochars* produzidos como potenciais materiais adsorvedores, nossos resultados sugerem que os materiais produzidos em menores temperaturas de queima podem ter maior poder de adsorção devido à presença dos grupos funcionais como grupos carboxila, carbonila, hidroxila e amino, os quais possuem boa afinidade com cátions metálicos (QIU *et al.*, 2021), além disso, *biochars* produzidos em temperaturas baixas tem mais grupos funcionais que contém oxigênio e área de superfície maior, com mais microporos, o que melhora a capacidade de adsorção para metais pesados (QIU *et al.*, 2021).

5.4 AVALIAÇÃO DO POTENCIAL DE REMOÇÃO DE CHUMBO

A quantificação de chumbo (Pb) foi feita através da técnica de Espectrometria de Emissão Ótica por Plasma Acoplado Indutivamente (ICP-OES) e a concentração de chumbo (Pb) determinada através da curva de sensibilidade pré-determinada. O percentual de remoção (%) foi determinado utilizando-se a equação 1:

$$(\%) = \frac{C_o - C_e}{C_o} \cdot (100) \quad (1)$$

onde C_o e C_e são, respectivamente, as concentrações inicial e final dos metais na solução em mg L^{-1} .

Na Figura 21 observa-se que as porcentagens de adsorção de Pb por cada uma das respectivas amostras, apontando que a amostra CSS Anila teve porcentagem de 34,34% de adsorção, a CVS Anila apresentou 67,68% e a CV Anila adsorveu 61,62%, mostrando com clareza que as amostras de *biochar* preparadas à partir de capim verde foram as que mostraram maior eficiência na adsorção proposta e o *biochar* feito à partir do capim colhido fresco e seco a pleno sol (amostra CVS 257-Anila) por 4 dias teve melhor resultado para a adsorção de chumbo.

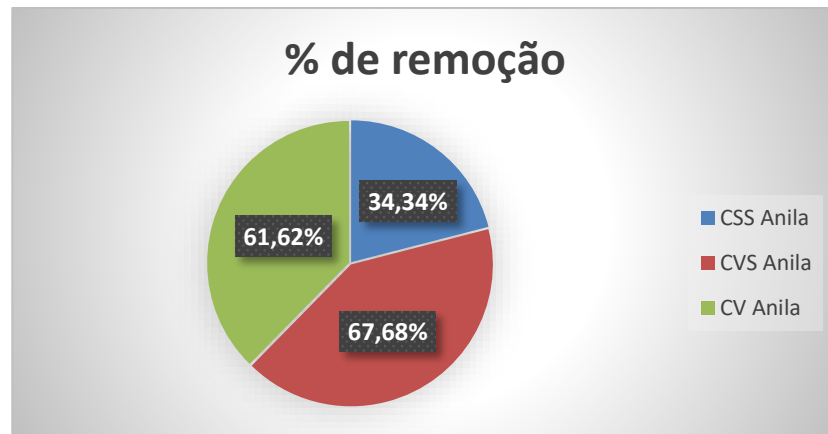


Figura 21: Porcentagem de remoção de Pb em solução simuladores para as amostras CSS Anila, CVS Anila e CV Anila,

Fonte: a própria autora, 2023.

6. CONCLUSÕES

Neste trabalho foi preparado *biochar* por pirólise lenta de capim Napier no fogão Anila em propriedade rural e *biochar* preparado no laboratório em diferentes temperaturas, os quais tiveram sua estrutura e composição demonstradas, seguido de teste de porcentagem de adsorção para chumbo (Pb). A queima foi semelhante para as 3 amostras como demonstram os gráficos de análise térmica TG/DTA, onde observa-se três principais estágios de degradação sendo o estágio 1 relacionado à perda de água entre 30°C e 100°C, o estágio 2, entre 250°C e 350°C, ocorrendo a perda de massa devido a degradação de hemicelulose e celulose e a etapa 3, entre 350°C e 500°C, onde a perda de massa deve-se à degradação da matéria orgânica. Sendo assim, a queima do fogão Anila seria semelhante para as 2 primeiras etapas, pois a temperatura média ficou em 257°C. O FTIR mostrou que as 3 amostras de *biochar* (CSS, CVS e CV) feitos no laboratório na temperatura de 250°C apresentaram grupos funcionais semelhantes sendo que em 450°C apenas o CSS preservou os grupos funcionais e o CVS e CV perderam alguns grupos funcionais porém ficaram com espectros semelhantes. Esses grupos funcionais perdidos poderiam comprometer a adsorção de metais. Em 800°C os 3 *biochars* apresentaram espectroscopia semelhante apresentando perda de grupos funcionais. É importante considerar que o fogão Anila queima de 250°C a 300°C graus e que os resultados mostram que tanto o *biochar* produzido no fogão Anila a uma

temperatura média de 257 °C quanto o feito na mufla em laboratório a 250°C, apresentam os mesmos grupos funcionais indicando que a adsorção de metais ocorreria de forma semelhante também, tendo sido constatado nas adsorções das amostras 257-Anila um percentual de remoção de chumbo de 34,34% para a amostra CSS 257-Anila, 61,61% para a amostra CV 257-Anila, e 67,68% para a amostra CVS 257-Anila, mostrando assim que o *biochar* feito de capim colhido fresco e seco a pleno sol (amostra CVS 257-Anila) por 4 dias teve melhor resultado para a adsorção de chumbo, demonstrando assim que o mesmo poderá ser feito também em fogão doméstico, na cidade, mesmo que seja utilizado gás de cozinha para a queima, demonstrando ser uma tecnologia social para a mitigação de contaminação local para a melhoria global. Este *biochar* foi utilizado para a adsorção de chumbo (Pb) neste trabalho, entretanto, poderia ainda ser utilizado para outras aplicações, como remediação de solos, adsorção de diferentes contaminantes de água, gerenciamento de resíduos e consequente mitigação do avanço sobre as fronteiras planetárias.

7. PERSPECTIVAS FUTURAS

- Estudar a capacidade de adsorção do *biochar* utilizando solução multi-elementar simuladora contendo concentrações de íons metálicos a ser submetida a remoção de forma simultânea desses metais.
- Avaliar as condições para a melhor capacidade adsorptiva dos *biochars* com variação do valor do pH, variação da concentração dos adsorventes e a interpretação da cinética das adsorções, bem como o tempo de contato para atingir o equilíbrio adsorptivo.
- Estudar outras potenciais aplicações do *biochar* de capim Napier como melhoria da qualidade dos solos, capacidade de retenção de água, adsorção de diferentes metais e outros contaminantes em solo e água.

8 RECOMENDAÇÕES

Este *biochar* está sendo testado com a intenção de ser incorporado a processos de filtragem de água para consumo humano e animal, com vistas ao desenvolvimento de uma tecnologia social de baixo custo e alta eficiência para a melhoria da saúde integral.

Assim sendo, avançar com um estudo adsorptivo em meio monoelementar, visando

investigar níveis de afinidade de metais diferentes, para interpretar os níveis de competitividade entre as espécies metálicas dispersas na solução será interessante para aprofundar o conhecimento em relação à eficiência do adsorvente para metais pesados.

Por fim, investigar diferentes aplicações deste *biochar*, especialmente no que tange a adsorção de diferentes contaminantes químicos em água e solos.

9 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABHIJEET, P. Previsão da composição do produto pirolítico e rendimento para várias matérias-primas de biomassa de gramíneas. **Conversão de Biomassa e Biorrefinaria**, n. 10, p. 663–674, 2020.

ADENIYI, A. et al. Produção de biocarvão a partir de capim-elefante (*Pennisetum purpureum*) utilizando um gaseificador de biomassa de corrente ascendente com aquecimento por retorta. **Biocombustíveis**, v. 12, n. 10, p. 1283–1290, 2021.

ADENIYI, A. Um estudo sobre a co-conversão termoquímica de cama de aves e capim-elefante em biocarvão. **Tecnologias Limpas e Política Ambiental**, v. 24, n. 7, p. 2193–2202, 2022.

ADESEMUYI, M. Preparação e caracterização de biochars de capim-elefante e sua utilização para remoção aquosa de nitratos: Efeito da temperatura de pirólise. **Revista de Engenharia Química Ambiental**, n. 6, 2020.

AAMER, M. et al. O biocarvão à base de resíduo de arroz mitiga a emissão de N₂O do solo vermelho-ácido. **Agronomy (Basileia, Suíça)**, v. 11, n. 12, pág. 2462, 2021.

ANA, A. N.; DE, Á. Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil 2018: informe anual. **Agência Nac. Águas**, v. 1, 2018.

ANA, A. N.; DE, Á. Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil 2020: informe anual. **Agência Nac. Águas**, v. 1, 2020.

BARRETO, M. Avaliação da pegada hídrica cinzenta para misturas de agrotóxicos aplicados a uma cultura de cana-de-açúcar no Brasil: uma comparação entre dois modelos. **Revista de Produção Mais Limpa**, v. 276, 2020.

BATISTA, E. M. C. C. Biochar como ligante macromolecular no solo visando aumentar a capacidade de retenção de água nos solos do nordeste do Brasil. **Universidade Federal do Paraná, Curitiba, Paraná, Brasil. Recuperado de <https://hdl.handle.net/1884/59431>**, 2018.

CAMPBELL, B. M. A produção agrícola como um dos principais impulsionadores do sistema terrestre excedendo os limites planetários. **Ecologia e sociedade**, 2017.

Limites planetários. Disponível em: <<https://www.stockholmresilience.org/planetary-boundaries>>. Acesso em: 11 jul. 2023.

CHATURVEDI, K. et al. Bambu para produção de carvão e biocarvão para aplicações versáteis. **Conversão de biomassa e biorrefinaria**, p. 1–27, 2023.

CONZ, R. F. **Caracterização de matérias-primas e biochars para aplicação na agricultura**. [s.l.] Universidade de São Paulo, 14 abr. 2016.

CUI, X. Transformação de fósforo em biomassa de áreas úmidas durante pirólise e tratamento hidrotermal. **ACS Sustainable Chemistry & Engineering**, p. 16520–16528, 2019.

DE JESUS, J. H. F. et al. Adsorção de compostos aromáticos por biocarvão: influência do tipo de precursor de biomassa tropical. **Celulose (Londres, Inglaterra)**, v. 26, n. 7, pág. 4291–4299, 2019.

FILIPPELLI, G. M.; MARK, P. Abordando os ônus da saúde ambiental global relacionados à poluição. **GeoSaúde**, p. 2–5, 2018.

FLOSS, M. Lancet Countdown: briefing para políticas de saúde no Brasil. **Revista Brasileira de Medicina de Família e Comunidade**, v. 14, p. 2286–2286, 2019.

GARCIA-NUNEZ, J. A. et al. Desenvolvimentos históricos de reatores de pirólise: Uma revisão. **Energia e combustíveis: um jornal da American Chemical Society**, v. 31, n. 6, pág. 5751-5775, 2017.

GONZALEZ-CANCHE, N. G. et al. Caracterização físico-química e óptica de biocarvão derivado de citrus aurantium para aplicações em absorvedores solares. **Materiais**, v. 14, n. 16, pág. 4756, 2021.

GOUJON, A. **8 bilhões e depois?** [s.l.] Conselho de População, 2022.

HU, Q. Indústria de biochar para economia circular. **Ciência do Ambiente Total**, v. 757, 2021.

JABOT, R. Para uma tradução contábil do Antropoceno: alimentando o debate sobre as fronteiras planetárias. **Revista de Contabilidade, Gestão e Política de Sustentabilidade**, p. 21–48, 2023.

KIM, V. et al. **Carbono Orgânico do Solo e Alimentação do Futuro: Processos Básicos do Solo**. [s.l.: s.n.].

KLIMEK-KOPYRA, A. et al. Biocarvão de casca de girassol como fator agrotécnico chave para a produção sustentável de soja. **Agricultura**, v. 11, n. 4, pág. 305, 2021.

KUMAR, A. et al. Aplicações multifacetadas do biocarvão na gestão ambiental: um perfil bibliométrico. **Biochar**, v. 5, n. 1, 2023.

LEHMANN, J.; JOSÉ, E. Biochar para a gestão ambiental: uma introdução. Em: **Biochar para gestão ambiental. Routledge**. [s.l: s.n.]. p. 1–13.

LI, H. Casca de coco e seu biocarvão como corretivo de fertilizante aplicado com fertilizante orgânico: eficácia e curso de ações na eliminação de genes de resistência a antibióticos em solo agrícola. **Journal of Hazardous Materials**, v, v. 437, 2022.

LI, J. Os biocarvões de palha de canola produzidos sob diferentes temperaturas de pirólise e a nitrapirina afetaram independentemente as emissões de óxido nitroso do solo das lavouras. **Biologia e Fertilidade dos Solos**, v, v. 57, p. 319–328, 2021.

MASINDI, Vhahangwele; MUEDI, Khathutshelo L. Contaminação ambiental por metais pesados. **Metais pesados**, v. 10, p. 115-132, 2018.

MENG, L. Isótopos de carbono estáveis traçam o efeito dos combustíveis fósseis em frações de carbono negro particulado em um grande lago urbano na China. **Revista de Gestão Ambiental**, v. 318, 2022.

MILIAN-LUPERÓN, L. Obtenção de bioprodutos por pirólise lenta de cascas de café e cacau como candidatos adequados para serem utilizados como emenda do solo e fonte de energia. **Revista Colombiana de Química**, v, v. 49, n. 2, p. 23–29, 2020.

MORENO-RIASCOS, S.; GHNEIM-HERRERA, T. Impact of biochar use on agricultural production and climate change. A review. **Agronomia colombiana**, v. 38, n. 3, p. 367–381, 2020.

NARZARI, Rumi et al. Biochar: uma visão geral sobre sua produção, propriedades e benefícios potenciais. **Biologia, biotecnologia e desenvolvimento sustentável**, v. 1, n. 1, pág. 13-40, 2015.

NAZIR, A. Manejo Sustentável da Casca de Amendoim através do Biochar e sua Aplicação como Melhorador do Solo. **Sustentabilidade**, v. 13, 2021.

OGINNI, O.; SINGH, K. Efeito da temperatura de carbonização nas características de adsorção de combustível e cafeína de biocarvões derivados de agulhas de pinheiro branco e abeto da Noruega. **Culturas e Produtos Industriais**, v. 162, 2021.

PAVIA, D. L. et al. **Introdução à espectroscopia**. South Melbourne, VIC, Austrália: Cengage Learning, 2014.

PAWAR, A.; PANWAR, N. L. Análise de biocarvão proveniente da carbonização de palha de trigo usando reator helicoidal contínuo. **Revista**, 2022.

Perspectivas da População Mundial - Divisão de População - Nações Unidas. Disponível

em: <<https://population.un.org/wpp>>. Acesso em: 11 jul. 2023.

PERSSON, L. Fora do espaço operacional seguro da fronteira planetária para novas entidades. **Ciência e tecnologia ambiental**, p. 1510–1521, 2022.

QAMBRANI, N. Propriedades de biochar e aplicações ecológicas para mitigação de mudanças climáticas, gerenciamento de resíduos e tratamento de águas residuais: uma revisão. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 79, p. 255–273, 2017.

QIN, J. Reciclagem de metais pesados e modificação de biocarvão derivado do capim Napier usando HNO₃. **Journal of Environmental Management**, v. 318, 2022.

QIU, B. Biochar como um adsorvente de baixo custo para remoção aquosa de metais pesados: Uma revisão. **Revista de Pirólise Analítica e Aplicada**, v. 155, 2021.

REZA, M. Caracterização biochar de capim invasor Pennisetum purpureum: efeito da temperatura de pirólise. **Biochar**, n. 2, p. 239–251, 2020.

ROCKSTRÖM, J. Um espaço operacional seguro para a humanidade. **natureza**, p. 472–475, 2009.

ROMANELLO, M. O relatório de 2021 da Lancet Countdown sobre saúde e mudanças climáticas: código vermelho para um futuro saudável. **The Lancet**, p. 1619–1662, 2021.

SAKHIYA, A. K.; ANAND, A.; KAUSHAL, P. Produção, ativação e aplicações de biochar nos últimos tempos. **Biochar**, v. 2, n. 3, pág. 253–285, 2020.

SÁNCHEZ-REINOSO, A. et al. **USO DO BIOCHAR NA AGRICULTURA Uso de biocarbón en la agricultura**. [s.l.: s.n.].

SCHOLZ, S. B. **Sistemas de biochar para pequenos agricultores em países em desenvolvimento: alavancando o conhecimento atual e explorando o potencial futuro para uma agricultura inteligente para o clima**. [s.l.: s.n.].

SCHWAB, K.; ZAHIDI, S. Relatório de competitividade global: edição especial 2020. Em: **Fórum Econômico Mundial**. [s.l.: s.n.].

SEPÚLVEDA, A. **A população mundial está crescendo vertiginosamente, dobrou em meio século**. Disponível em: <<https://www.tiempo.com/noticias/ciencia/cual-es-la-poblacion-mundial-10-mil-millones-de-personas.html>>. Acesso em: 11 jul. 2023.

SILVA, M. P. DA [UNESP]; (UNESP), U. E. P. Remediação de metais pesados em esgoto sanitário através da aplicação de farinha da casca de banana e nanopartículas magnéticas. 2020.

SMEBYE, A. Avaliação do ciclo de vida de sistemas de produção de biocarvão em áreas rurais tropicais: Comparando fornos de cortina de chama com outros métodos de produção. **Biomassa e Bioenergia**, v. 101, p. 35–43, 2017.

SOUZA, A. K. R.; MORASSUTI, C. Y.; DEUS, W. B. DE. POLUIÇÃO DO AMBIENTE POR METAIS PESADOS E UTILIZAÇÃO DE VEGETAIS COMO BIOINDICADORES. **Acta Biomédica Brasiliensia**, v. 9, n. 3, p. 95, 2018.

STEFFEN, W. **Fronteiras planetárias: Guiando o desenvolvimento humano em um planeta em mudança**. **Ciência**, v. 347, n. 6223. [s.l: s.n.].

TAN, X. et al. Aplicação de biochar para a remoção de poluentes de soluções aquosas. **Chemosphere**, v. 125, p. 70-85, 2015.

TITIRICI, M.-M.; THOMAS, A.; ANTONIETTI, M. De volta ao preto: carbonização hidrotermal de material vegetal como um processo químico eficiente para tratar o problema do CO₂. **New Journal of Chemistry**, n. 6, p. 787–789, 2007.

TUMULURU, J. **Uma revisão sobre o processo de torrefação da biomassa e as propriedades do produto**. [s.l: s.n.].

VYAVAHARE, G. Sorção de corante verde brilhante com biocarvão derivado da palha de soja: estudos de caracterização, cinética, termodinâmica e toxicidade. **Geoquímica Ambiental e Saúde**, p. 1–14, 2021.

VU, N.-T.; DO. Insights sobre a adsorção de amônio por biocarvão derivado da pirólise de baixa temperatura da casca de café. **Conversão de Biomassa e Biorrefinaria**, p. 2193–2205, 2023.

XIAO, X. Insight sobre estruturas múltiplas e multiníveis de biochars e suas potenciais aplicações ambientais: uma revisão crítica. **Ciência e tecnologia ambiental**, p. 5027–5047, 2018.

YADAV, A. Biocarvão pirolisado a vácuo para alteração do solo. **Tecnologias Eficientes em termos de Recursos**, p. S177–S185, 2016.

WANG, L. Novas tendências na pirólise de biocarvão e estratégias de modificação: matéria-prima, condições de pirólise, preocupações com a sustentabilidade e implicações para a alteração do solo. **Uso e Manejo do Solo**, p. 358–386, 2020.

WANG, Z. Efeitos do biocarvão derivado da palha de algodão sob diferentes condições de pirólise sobre as propriedades de adsorção de Pb (II) em soluções aquosas. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, v. 157, 2021.

WATTS, N. **O relatório de 2019 do The Lancet Countdown sobre saúde e mudanças climáticas: garantir que a saúde de uma criança nascida hoje não seja definida por uma mudança climática.** *The Lancet*, v. 394, n. 10211, pág. [s.l: s.n.].