

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ**

**GRASIELLE ADRIANE TOSCAN LORENCETTI**

**LODO DE ETE AGROINDUSTRIAL:  
USO AGRÍCOLA E PRODUÇÃO DE BIOCHAR**

**PATO BRANCO**

**2022**

**GRASIELLE ADRIANE TOSCAN LORENCETTI**

**LODO DE ETE AGROINDUSTRIAL:  
USO AGRÍCOLA E PRODUÇÃO DE BIOCHAR**

**AGROINDUSTRIAL ETE SLUDGE:  
AGRICULTURAL USE AND PRODUCTION OF BIOCHAR.**

Trabalho de conclusão de curso (tese) apresentada como requisito para obtenção do título de Doutor em Agronomia do Programa de Pós Graduação em Agronomia da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Orientador: Prof. Dr. Thiago de Oliveira Vargas  
Coorientadora: Prof. Dra. Larissa Macedo dos Santos Tonial

**PATO BRANCO**

**2022**



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

Esta licença permite download e compartilhamento do trabalho desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es), sem a possibilidade de alterá-lo ou utilizá-lo para fins comerciais. Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.



**Ministério da Educação**  
**Universidade Tecnológica Federal do Paraná**  
**Campus Pato Branco**



GRASIELLE ADRIANE TOSCAN LORENCETTI

**LODO DE ETE AGROINDUSTRIAL: USO AGRÍCOLA E PRODUÇÃO DE BIOCHAR**

Trabalho de pesquisa de doutorado apresentado como requisito para obtenção do título de Doutora Em Agronomia da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).  
Área de concentração: Produção Vegetal.

Data de aprovação: 23 de Setembro de 2022

Dr. Thiago De Oliveira Vargas, Doutorado - Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Dra. Andressa Pilonetto, Doutorado - Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Dr. Luis Cesar Cassol, Doutorado - Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Dr. Maico Chiarelotto, Doutorado - Universidade Federal do Oeste da Bahia

Dr. Manuel Angelo Rosa Rodrigues, Doutorado - Instituto Politécnico de Bragança

Documento gerado pelo Sistema Acadêmico da UTFPR a partir dos dados da Ata de Defesa em 01/02/2023.

*Aos meus pais, Losmary e Augusto (in memoriam),  
que me ensinaram que sonhar e concretizar os  
sonhos só dependerá de nossa vontade.*

## AGRADECIMENTOS

A Deus, pelas bênçãos e proteção diária.

À toda a minha família, e em especial ao meu esposo Thiago, minha mãe Losmary, meus irmãos Jhony e Michelle por todo apoio, incentivo e amor.

Ao meu estimado orientador, Dr. Thiago de Oliveira Vargas, pela paciência, amizade, compreensão, ensinamentos e por me permitir desenvolver e compartilhar um pouco deste projeto.

A minha coorientadora, Dra. Larissa Macedo dos Santos Tonial, pela parceria no projeto, disponibilidade e importantes contribuições ao longo deste trabalho.

Ao estimado Prof. Dr. Luís César Cassol, pelo apoio, incentivo e ensinamentos.

A Andressa Pilonetto, técnica de laboratório do Departamento Acadêmico de Ciências Agrárias da UTFPR, pela ajuda com as análises.

Aos técnicos da área experimental que auxiliaram no plantio e manejo das culturas em campo.

Aos amigos e companheiros da pós-graduação: Matheus, Larisse, Pedro, Luana, Jéssica, Débora, Luciano, Lucas, Ana e aos demais do grupo de Olericultura e Agroecologia, pela ajuda nas coletas de campo e análises.

A todos os meus ex-professores da UTFPR Campus Pato Branco, que contribuíram para minha formação.

A UTFPR pelos equipamentos e espaços físicos cedidos, em especial ao Laboratório de Solos (LABSOLOS) pelas análises efetuadas.

À Agroindústria avícola que cedeu o material para estudo, análises de laboratório e demais requisitos indispensáveis para a realização deste trabalho.

E aos demais que, mesmo não citados, colaboraram de alguma maneira ao longo desse trabalho.

A todos o meu sincero agradecimento!

## RESUMO

LORENCETTI, Grasielle A. T. LODO DE ETE AGROINDUSTRIAL: USO AGRÍCOLA E PRODUÇÃO DE BIOCHAR. 100 f. Tese, (Doutorado em Agronomia) – Programa de Pós-Graduação em Agronomia (área de Concentração: Produção vegetal). Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Pato Branco, 2022.

A utilização agrícola de resíduos agroindustriais é uma alternativa desejável e que se enquadra nos princípios de destinação adequada de resíduos orgânicos. Nos abatedouros de aves, a geração de lodo das estações de tratamento de efluentes (ETE) representam os maiores volumes de resíduos gerados. Seu manejo é difícil e novas tecnologias precisam ser buscadas para viabilizar sua disposição final. Este estudo teve como objetivo caracterizar e classificar o lodo de ETE de um abatedouro de aves, e avaliar seu desempenho no solo e sobre três culturas agrícolas, bem como verificar a possibilidade de produção de um biochar a partir do lodo pirolisado. A classificação e caracterização do lodo, foi realizada conforme legislação brasileira, NBR 10004/2004, Resolução CONAMA 498/2020 e IN nº 61/2020 – MAPA. O experimento de campo foi conduzido em blocos casualizados por dois anos agrícolas, 2019-2020 e 2020-2021. Foram avaliados os efeitos da aplicação de diferentes doses lodo de ETE, 0, 20, 40, 60 e 80 t ha<sup>-1</sup> (com 65% de umidade) sobre a produtividade de três culturas em sucessão: aveia preta, soja e milho. Foram determinadas a produção de matéria seca (MS) da parte aérea das plantas para aveia e milho e rendimento para a soja: altura de planta (AP), diâmetro de colmo (DC), número de vagens (NV) e produtividade de grãos (PROD). As propriedades químicas do solo foram avaliadas em três profundidades (0-5 cm, 5-10 cm, 10-20 cm) ao final de cada ciclo. A produção do biochar foi realizada em laboratório, testando temperaturas de pirólise de 400, 450, 500 e 550°C, durante 1 hora. Para o biochar resultante, foram determinados o rendimento e parâmetros químicos conforme legislação pertinente. A aplicação das doses do lodo de ETE ao solo resultaram em maior produtividade das três culturas, nas duas safras com melhor resposta para a dose de 60 t ha<sup>-1</sup>. Para aveia e soja, a produção foi significativamente maior após o segundo ano agrícola. No solo, houve aumento nos teores de fósforo e matéria orgânica. O pH sofreu redução, principalmente nas camadas inferiores, e foram registradas quedas nos teores de K, Mg e V% nos tratamentos com as maiores doses do lodo. A produção do biochar mostrou-se possível, obtendo melhor rendimento na temperatura de 400 °C. Na caracterização do material, para o lodo e seu biochar, verificou-se o atendimento das condicionantes legais, conforme legislação pertinente. A utilização agrícola do lodo de ETE pode ser considerada viável para a produção das culturas estudadas no Sudoeste do Paraná, com potencial para utilização como biochar.

**Palavras-chave:** resíduos agroindustriais; lodo de ETE; abatedouros; biochar.

## ABSTRACT

LORENCETTI, Grasielle A. T. tem 100 f. Thesis, (Doctorate in Agronomy) – Postgraduate Program in Agronomy (area of concentration: Plant production). Federal Technological University of Paraná. Pato Branco 2022.

The agricultural use of agro-industrial residues is a desirable alternative that fits in with the principles of proper disposal of organic residues. In poultry slaughterhouses, the generation of sludge from effluent treatment stations (ETE) represents the largest volumes of waste generated. Its handling is difficult and new technologies need to be sought to enable its final disposal. This study aimed to characterize and classify the ETE sludge from a poultry slaughterhouse, and to evaluate its performance in the soil and on three agricultural crops, as well as to verify the possibility of producing a biochar from the pyrolyzed sludge. The classification and characterization of the sludge was carried out in accordance with Brazilian legislation, NBR 10004/2004, CONAMA Resolution 498/2020 and IN N° 61/2020 – MAPA. The field experiment was conducted in randomized blocks for two agricultural years, 2019-2020 and 2020-2021. The effects of applying different ETE sludge doses, 0, 20, 40, 60 and 80 t ha<sup>-1</sup> (with 65% moisture) on the productivity of three crops in succession: black oat, soybean and millet were evaluated. The production of dry matter (MS) of the aerial part of the plants for oats and millet and yield for soybean were determined: plant height (AP), stem diameter (DC), number of pods (NV) and grain yield (PROD). Soil chemical properties were evaluated at three depths (0-5 cm, 5-10 cm, 10-20 cm) at the end of each cycle. Biochar production was carried out in the laboratory, testing pyrolysis temperatures of 400, 450, 500 and 550°C for 1 hour. For the resulting biochar, the yield and chemical parameters were determined according to the relevant legislation. The application of ETE sludge doses to the soil resulted in higher productivity of the three crops, in the two agricultural seasons, with a better response to the dose of 60 t ha<sup>-1</sup>. For oats and soybeans, production was significantly higher after the second agricultural year. In the soil, there was an increase in the levels of phosphorus and organic matter. The pH suffered a reduction, mainly in the lower layers, and decreases in the contents of K, Mg and V% were registered in the treatments with the highest doses of sludge. The production of biochar proved to be possible, obtaining better yield at a temperature of 400 °C. In the characterization of the material, for the sludge and its biochar, compliance with the legal conditions was verified, in accordance with the relevant legislation. The agricultural use of ETE sludge can be considered viable for the production of the cultures studied in the Southwest of Paraná, with potential for use as biochar.

**Keywords:** agro-industrial waste; ETE sludge; slaughterhouses; biochar.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1. Produção de frango (%) por unidade federativa em 2021.....	21
Figura 2. Projeções da evolução da produção de carne de frango - 2021 a 2031 (milhões de toneladas).....	22
Figura 3. Temperatura mínima, média e máxima do ar e precipitação pluviométrica, referente ao período de condução do experimento (março 2019 a junho 2021).....	43
Figura 4. Rota de produção do lodo de ETE.....	45
Figura 5. Etapas de tratamento do efluente: Peneira estática e tanque de equalização (A); Flotador e tanque de lodo (B); Saída do efluente líquido do flotador (C); Tridecanter centrífugo (D); Lodo armazenado após desidratação (E); Lagoas para tratamento secundário do efluente líquido (F). Pato Branco - PR.....	46
Figura 6. Esquema de delineamento experimental para o experimento de campo para as doses 0, 20, 40, 60 e 80 t ha <sup>-1</sup> .....	51
Figura 7. Aplicação inicial do lodo de ETE. Pato Branco - PR. ....	52
Figura 8. Fases do ciclo da aveia preta: Plantio (A); Germinação (B); Pleno florescimento (C); Pato Branco - PR. ....	53
Figura 9. Rolagem da aveia (A) e fases do plantio da soja (B e C). Pato Branco - PR. ....	54
Figura 10. Produção do biochar em mufla – UTFPR Campus Pato Branco. ....	56
Figura 11. Matéria seca de aveia, em função de cinco doses de lodo de ETE (0, 20, 40, 60 e 80 t ha <sup>-1</sup> ) e dois anos de cultivo, conduzido em delineamento de blocos ao acaso com quatro repetições. UTFPR, Pato Branco, 2022.....	67
Figura 12. Altura de planta (A), diâmetro de colmo (B), número de vagens (C) e produtividade de soja (D) em função de cinco doses de lodo de ETE (0, 20, 40, 60 e 80 t ha <sup>-1</sup> ) e dois anos de cultivo, conduzido em delineamento de blocos ao acaso com quatro repetições. UTFPR, Pato Branco, 2022. ....	68
Figura 13. Matéria seca do milho, em função de cinco doses de lodo (0, 20, 40, 60 e 80 t ha <sup>-1</sup> ) e dois anos de cultivo, conduzido em delineamento de blocos ao acaso com quatro repetições. UTFPR, Pato Branco, 2022. ....	70
Figura 14. Valores médios de P na profundidade de 0-5 cm do solo em função de doses de lodo de ETE. ....	74
Figura 15. Valores médios de K na profundidade de 0-5 cm do solo em função de doses de lodo de ETE. ....	75
Figura 16. Valores médios de P (A), pH (B), Al (C), Mg (D) e V% (E), na profundidade de 5-10 cm do solo em função de doses de lodo de ETE.....	78
Figura 17. Valores médios de P (A), pH (B), Mg (C), e V% (D), na profundidade de 10-20 cm do solo em função de doses de lodo de ETE.....	81



## LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Valores médios de N, P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> , K <sub>2</sub> O, CaO e MgO em resíduos utilizados na agricultura...	27
Tabela 2. Resumo da classificação dos fertilizantes orgânicos. ....	28
Tabela 3. Resumo dos processos de tratamento e estabilização do lodo e classificação do biossólido ser aplicado em solos. ....	31
Tabela 4. Rendimentos de biochar sob diferentes condições de pirólise. ....	40
Tabela 5. Características químicas do solo da área experimental, antes do início do experimento. UTFPR, Pato Branco, 2019. ....	44
Tabela 6. Parâmetros analisados do lodo de ETE, para fins de classificação conforme NBR 10004/2004.....	48
Tabela 7. Recomendação de N, P e K pela produção das culturas. ....	50
Tabela 8. Características agronômicas do resíduo orgânico de lodo de ETE e da cinza vegetal. UTFPR, Pato Branco – PR, 2019.....	58
Tabela 9. Substâncias potencialmente tóxicas no lodo de ETE e cinzas, e limites máximos permitidos pela Resolução CONAMA 498 (BRASIL, 2020). ....	61
Tabela 10. Características microbiológicas do resíduo de lodo de ETE e cinzas de caldeira e limites permitidos conforme Resolução CONAMA 498 (BRASIL, 2020). ....	63
Tabela 11. Características para macro e micronutrientes no lodo de ETE e teores mínimos para fertilizantes orgânicos simples e compostos, conforme IN n° 61 (BRASIL, 2020). ....	64
Tabela 12. Análise de variância para MS <sup>1</sup> (aveia) e MS <sup>2</sup> (milheto) em função de cinco doses de lodo de ETE (0, 20, 40, 60 e 80 t ha <sup>-1</sup> ) e dois anos de cultivo em um experimento conduzido em blocos ao acaso com quatro repetições. UTFPR, Pato Branco, 2022. ....	65
Tabela 13. Análise de variância para AP, DC, NV e PROD em soja, em função de cinco doses de lodo de ETE (0, 20, 40, 60 e 80 t ha <sup>-1</sup> ) e dois anos de cultivo em um experimento conduzido em blocos ao acaso com quatro repetições. UTFPR, Pato Branco, 2022. ....	66
Tabela 14. Médias dos dois anos de cultivo para as variáveis: matéria seca de aveia (MS <sup>1</sup> ) e matéria seca de milheto (MS <sup>2</sup> ) em kg ha <sup>-1</sup> , altura de planta (AP) diâmetro de colmo (DC) em cm, número de vagens (NV) e produtividade de grãos (PROD) em kg ha <sup>-1</sup> da soja, de um experimento conduzido em delineamento experimental de blocos ao acaso com quatro repetições. UTFPR, Pato Branco, 2022.....	71
Tabela 15. Análise de variância para nove parâmetros químicos de análise do solo na profundidade 0-5 cm, de um experimento bifatorial (5 doses de lodo de ETE x 2 anos de cultivo) em delineamento de blocos ao acaso com quatro repetições. UTFPR, Pato Branco, 2022. ....	73
Tabela 16. Valores médios de MO, P, Mg, Ca e K em função do ano de cultivo, na profundidade 0-5 cm.....	74
Tabela 17. Análise de variância para nove parâmetros químicos de análise do solo na profundidade 5-10 cm, de um experimento bifatorial (5 doses de lodo de ETE x 2 anos de cultivo) em delineamento de blocos ao acaso com quatro repetições. UTFPR, Pato Branco, 2022. ....	76
Tabela 18. Valores médios de MO, P, pH, Al, Ca e V% em função do ano de cultivo, na profundidade 0-5 cm.....	77

<b>Tabela 19. Análise de variância para nove parâmetros químicos de análise do solo na profundidade 10-20 cm, de um experimento bifatorial (5 doses de lodo de ETE x 2 anos de cultivo) em delineamento de blocos ao acaso com quatro repetições. UTFPR, Pato Branco, 2022. ....</b>	<b>80</b>
<b>Tabela 20. Valores médios de P, Al, Ca, V% e CTC em função do ano de cultivo, na profundidade 10-20 cm. ....</b>	<b>80</b>
<b>Tabela 21. Rendimento do Biochar de lodo de ETE, conforme a temperatura aplicada e tempo de 1 hora. UTFPR, Pato Branco, 2022.....</b>	<b>83</b>
<b>Tabela 22. Características agronômicas do Biochar e do lodo de ETE. Pato Branco, 2022. ....</b>	<b>84</b>
<b>Tabela 23. Características do Biochar de lodo de ETE e limites permitidos para aplicação no solo, conforme Resolução CONAMA 498 (BRASIL, 2020). ....</b>	<b>86</b>

## LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SIMBOLOS

ABPA	Associação Brasileira de Proteína Animal
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANOVA	Análise de variância
Ag	Prata
As	Arsênio
B	Boro
Ba	Bário
C	Carbono
Ca	Cálcio
CaO	Óxido de Cálcio
Cd	Cádmio
CEPEA	Centro de Estudos Avançados em Economia Aplicada
CTC	Capacidade de troca catiônica
CONAB	Companhia Nacional de Abastecimento
CONAMA	Conselho Nacional de Meio Ambiente
Cr	Cromo
Cu	Cobre
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
EPA	Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos
E. coli/g <sup>1</sup> ST	<i>Escherichia coli</i> por grama de sólidos totais
et al.	e outros
EBC	European Biochar Certificate
ETE	Estação de Tratamento de Efluentes
Fe	Ferro
Hg	Mercúrio
IAT	Instituto Água e Terras
IBI	International Biochar Initiative
IN	Instrução Normativa
IPC	International Poultry Council
K	Potássio
K <sub>2</sub> O	Óxido de Potássio
Kg	Kilogramas
MAPA	Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento
m	Metro
mm	Milímetro
m <sup>3</sup>	Metro cúbico
Mg	Magnésio
MgO	Óxido de Magnésio
MMA	Ministério do Meio Ambiente
Mn	Manganês
MS	Matéria seca

MO	Matéria Orgânica
N	Nitrogênio
NBR	Norma Brasileira
OMS	Organização Mundial da Saúde
ONG	Organização Não Governamental
ONU	Organização das Nações Unidas
P	Fósforo
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Pentóxido de Fósforo
Pb	Chumbo
PMET	Ponto de máxima eficiência técnica
PR	Paraná - Unidade da Federação
S	Enxofre
Se	Selênio
SEMA	Secretário de Estado de Meio Ambiente e Recursos Hídricos
SPA	Secretaria de Política Agrícola
T	Tempo
t	tonelada
UTM	Universal Transverse Mercator
UTFPR	Universidade Tecnológica Federal do Paraná
V%	Saturação por bases
VOCs	Contaminantes orgânicos voláteis
Zn	Zinco

## SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO .....	14
1.1 OBJETIVO GERAL .....	16
1.1.1 Objetivos Específicos.....	16
2. REFERENCIAL TEÓRICO.....	18
2.1 A IMPORTÂNCIA DA GESTÃO DOS RESÍDUOS.....	18
2.2 A PROBLEMÁTICA DOS RESÍDUOS NAS AGROINDÚSTRIAS .....	19
2.2.1 Expansão do setor avícola no Brasil .....	20
2.2.2 Geração de resíduos no setor avícola.....	23
2.2.3 Lodos de ETE de abatedouro de aves .....	24
2.2.4 Cinzas de caldeira .....	26
2.3 UTILIZAÇÃO AGRONÔMICA DE RESÍDUOS .....	26
2.3.1 Vantagens da utilização agrícola dos resíduos.....	26
2.3.2 Fertilizantes e condicionadores de solo a base de resíduos.....	27
2.3.3 Critérios e restrições do uso agrícola do lodo .....	30
2.3.4 Principais processos de estabilização do lodo .....	33
2.3.5 Aspectos legais do uso de lodos em solos agrícolas .....	35
2.3.6 Impactos ambientais da utilização de resíduos no solo .....	36
2.3.7 Utilização agrícola de cinzas de caldeira .....	37
2.3.8. Características das culturas da aveia preta, soja e milho.....	38
2.4 BIOCHAR.....	39
2.4.1 Definição .....	39
2.4.2 Processos de pirólise.....	40
2.4.3 Utilização agrícola do biochar.....	41
2.4.4 Biochar de lodo de ETE.....	42
3. MATERIAL E MÉTODOS .....	43
3.1 LOCALIZAÇÃO E CARACTERÍSTICAS DA ÁREA EXPERIMENTAL.....	43
3.2 ORIGEM DO LODO.....	44
3.2.1 Processo de geração, cozimento e desidratação do lodo.....	44
3.2.2 Cinzas vegetais de caldeira .....	46
3.4 DETERMINAÇÃO DAS DOSES.....	50
3.5 DELINEAMENTO EXPERIMENTAL, TRATAMENTOS E AVALIAÇÕES .....	51

3.6 PRODUÇÃO DO BIOCHAR .....	55
3.7 CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA E CLASSIFICAÇÃO DO BIOCHAR .....	56
3.8 ANÁLISE ESTATÍSTICA .....	57
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	58
4.1 CARACTERIZAÇÃO E CLASSIFICAÇÃO DO LODO .....	58
4.2 DESEMPENHO AGRONÔMICO DAS CULTURAS .....	65
4.3 EFEITOS DA DISPOSIÇÃO DE LODO DE ETE NAS PROPRIEDADES QUÍMICAS DO SOLO .....	72
4.3.1 Camada de 0-5 cm .....	72
4.3.2 Camada de 5-10 cm .....	76
4.3.3 Camada de 10-20 cm .....	79
4.4 PRODUÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DO BIOCHAR .....	82
4.4.1 Rendimento do biochar sob diferentes temperaturas .....	82
4.4.2 Características químicas e classificação do biochar .....	84
5. CONCLUSÕES .....	89
6. REFERÊNCIAS .....	90

## 1. INTRODUÇÃO

Os resíduos agroindustriais representam a fração de matéria-prima não aproveitada no processamento e elaboração de produtos comerciais. São basicamente constituídos por restos orgânicos de vegetais e animais, que representam uma problemática constante para as agroindústrias, devido aos conflitos econômicos e ambientais em torno de seu gerenciamento.

As agroindústrias do setor avícola têm destaque neste cenário, uma vez que o Brasil é líder na exportação da carne de frango, sendo responsável por 4,61 milhões de toneladas, (32,17% da produção total), com destaque para o Estado do Paraná que é o principal produtor com mais de 34% da produção nacional (ABPA, 2022).

Como consequência da larga escala de produção, o setor gera uma grande quantidade de resíduos, em várias fases do processo de criação e processamento. Neste cenário, destaque para a indústria a qual gera grande volume de lodos oriundos do tratamento das águas residuais nas estações de tratamento de efluentes.

Para o abate de aves, o consumo de água gira em torno de 25 L ave<sup>-1</sup>, provocando a geração de enormes quantidades de efluentes líquidos e lodos. Os efluentes líquidos após tratamento, atingem parâmetros mínimos, e podem ser lançados nos corpos hídricos, seguindo normas específicas. O lodo representa a fração semissólida do tratamento dos efluentes, e tem como principais rotas de eliminação a incineração, o aterro sanitário e a compostagem.

O lodo proveniente de efluentes é rico em nutrientes e contém alto teor de material orgânico, podendo desempenhar importante papel no condicionamento do solo e na produção agrícola (PEREIRA; GARCIA, 2017). Além disso, o uso de lodo no solo, principalmente na agricultura, em comparação com a incineração ou aterro sanitário, tem custos mais baixos (LAMASTRA, 2018). O'Kelly (2006) relata que controles mais rigorosos sobre a qualidade das descargas de águas residuais, têm dado origem a volumes crescentes de lodo, sendo o principal destino os aterros sanitários municipais e os aterros exclusivos. Na Europa, 35 a 40% do lodo de esgoto produzido era destinado a aterros, seguido do uso agrícola (37%) e da incineração (11%) (FYTILI; ZABANIOTOU, 2008). Em alguns países como Bélgica, França, Irlanda, Espanha e Reino Unido, mais de metade de toda a produção de lodos é utilizada na agricultura (MILIEU, 2010).

De acordo com a Política Nacional de Resíduos Sólidos (Lei Federal 12.305 – BRASIL, 2010) a hierarquia de ações quanto ao manejo de resíduos, prioriza o tratamento e reutilização, sendo que a disposição final em aterros deve ser a última alternativa empregada, não só pelas consequências ambientais, mas principalmente por não se integrarem em uma

lógica de sustentabilidade, dada a potencialidade de muitos resíduos em alguns setores de atividade econômica.

O uso agrícola é uma alternativa que apresenta vantagens ambientais quando comparado a outras práticas de destinação, enquadrando-se nos princípios de reutilização de resíduos de forma ambientalmente adequada segundo a Resolução do Conselho Nacional de Meio Ambiente - CONAMA 375 (BRASIL, 2006) e 498/2020 (BRASIL, 2020). Entretanto, é importante que sua utilização no solo seja feita de maneira controlada devido à possibilidade da presença de constituintes poluentes (PEREIRA; GARCIA, 2017).

Neste sentido, são recomendados os processos de estabilização do material, como por meio da compostagem, formulação de fertilizantes, ou da decomposição térmica da biomassa, para a produção do biochar. Segundo TRIPATHI et al. (2016) entende-se por biomassa um produto sólido orgânico ou não orgânico derivado de organismo vivo ou recentemente vivo e disponível naturalmente, dos quais se incluem vários tipos de resíduos como estrume animal, resíduos industriais e agroindustriais e, inclusive, lodo gerado em estações de tratamento de esgoto (ETE) e efluentes.

O biochar pode ter origem vegetal ou animal e é obtido pelo processo de pirólise, apresenta composição variável em função das características da matéria prima empregada e método de obtenção, sendo normalmente ricos em C e pobres em N, já que o N é bastante volátil (KIM et al., 2013). Bibar et al. (2013), encontraram essa mesma dinâmica para o biochar produzido a partir de oito diferentes resíduos orgânicos. Além do uso agrícola, existem inúmeros outros usos para o biochar, como sua incorporação no aço, concreto e asfalto.

A utilização agrícola de resíduos, contribui com a economia circular dos sistemas de produção. Na cadeia avícola, a destinação dos resíduos orgânicos nas etapas iniciais do processo (incubatório e aviários) são tradicionalmente o uso agrícola. O aproveitamento destes materiais no solo, servem de base para a fertilização de culturas como a soja, grão este que está na base da alimentação de diversos animais, e desta forma, geralmente retorna para o ciclo, na forma de ração para a criação das aves. Já nas etapas finais da cadeia avícola (abate e processamento), muitos resíduos, como o lodo de ETE e cinzas, são corriqueiramente pouco valorizados.

A nível internacional, considerando o cenário econômico pós pandemia e a guerra entre Rússia e Ucrânia, o qual acentuou a dificuldade brasileira em obter insumos para a produção de fertilizantes, iniciativas de reaproveitamento de matérias-primas de setores tradicionais da agroindústria poderão reduzir a dependência do país sobre adubos importados. As diretrizes do Plano Nacional de Fertilizantes (Decreto nº 10.991, Brasil, 2022), ampliam os investimentos em pesquisa científica, pesquisa aplicada, desenvolvimento experimental e



inovação tecnológica pode, além de propiciar novos produtos e processos para a cadeia de fertilizantes, reduzir a demanda por moléculas desses nutrientes. Caligaris et al. (2022) destaca que serão grandes aliados da redução da dependência externa: novas tecnologias de manejo, novas fontes de matéria-prima e novos materiais, produtos com maior eficiência agrônômica e tecnologia abarcada, a colaboração científica internacional, a congregação de esforços institucionais sobre a forma da inovação aberta em um hub para os fertilizantes e insumos para nutrição de plantas e a promoção de uma maior proximidade entre a academia e a indústria.

O estudo do uso agrícola de resíduos agroindustriais proporciona o desenvolvimento de práticas eficientes e inovadoras para aproveitar os recursos de forma sustentável, englobando conceitos de economia circular, além de contribuir para a redução das emissões de gases de efeito estufa, pelos processos industriais. Representa uma vantagem financeira para a empresa, uma vez que reduz os custos com a destinação e o passivo ambiental gerado e pode contribuir para a redução pela demanda externa de fertilizantes. Este trabalho visa analisar a utilização de resíduos de lodo de ETE, na sua forma natural e também testar a sua produção de biochar.

## 1.1 OBJETIVO GERAL

Avaliar o efeito de diferentes doses de lodo de ETE de abatedouro de aves nas características químicas do solo e na produção de aveia, soja e milho e testar a produção de seu biochar, a fim de viabilizar seu uso agrícola.

### 1.1.1 Objetivos Específicos

- Classificar o lodo de ETE com base nos parâmetros IN 61 – MAPA (BRASIL, 201), Resolução CONAMA 498 (BRASIL, 2020), NBR 10004/2004 (ABNT, 2004);
- Determinar os parâmetros químicos e biológicos do lodo centrifugado, das cinzas e do solo, para posterior determinação das doses a serem aplicadas;
- Avaliar os efeitos de diferentes doses de lodo de ETE centrifugado e cinzas na produção de aveia preta, soja e milho, durante 2 anos agrícolas;
- Avaliar o solo sob as diferentes doses de lodo, em três profundidades, no final de cada ano agrícola;
- Testar a produção de biochar e definir a temperatura ideal, a partir de resíduos de lodo de ETE;

- Comparar quimicamente o biochar com o lodo de ETE e classificá-lo conforme a legislação vigente.

## 2. REFERENCIAL TEÓRICO

### 2.1 A IMPORTÂNCIA DA GESTÃO DOS RESÍDUOS

Segundo a Associação Brasileira de Normas Técnicas, NBR 10004/2004 (ABNT, 2004), resíduos sólidos são aqueles que:

“Resultam de atividades de origem industrial, doméstica, hospitalar, comercial, agrícola, de serviços e de varrição. Ficam incluídos nesta definição os lodos provenientes de sistemas de tratamento de água, aqueles gerados em equipamentos e instalações de controle de poluição, bem como determinados líquidos cuja particularidades tornem inviável o seu lançamento na rede pública de esgotos ou corpos de água, ou exijam para isso soluções, técnica e economicamente, inviáveis em face à melhor tecnologia disponível.”

Os resíduos sólidos apresentam uma vasta diversidade e complexidade, sendo que suas características físicas, químicas e biológicas variam de acordo com a fonte ou atividade geradora, podendo ser agrupados de várias formas, como pelo risco potencial de contaminação do meio ambiente, pela natureza, local de origem, atividade, entre outros.

A NBR 10004/2004 (ABNT, 2004), classifica os resíduos sólidos em geral em dois grupos: perigosos ou Classe I e não perigosos ou Classe II, sendo este último grupo subdividido em inerte e não inerte.

Os resíduos Classe I são aqueles que em função de suas propriedades físicas, químicas ou infectocontagiosas, podem apresentar risco a saúde pública ou ao meio ambiente, com características como: inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade e patogenicidade. Os demais resíduos são classificados como Classe II, podendo ser inertes ou não inertes. Os resíduos serão caracterizados como não inertes quando apresentarem propriedades de biodegradabilidade, combustibilidade ou solubilidade em água (NBR 10004/2004, ABNT, 2004).

Os resíduos orgânicos geralmente se enquadram como não perigosos, Classe II, não inertes, pois constituem a fração de material que se degrada espontaneamente e recicla os nutrientes nos processos da natureza (NBR 10004/2004, ABNT, 2004). No entanto, alguns resíduos orgânicos podem ser enquadrados na Classe I, devido a suas características de periculosidade e patogenicidade.

A legislação ambiental brasileira é uma das mais completas e avançadas do mundo e possui o intuito de proteger o meio ambiente e reduzir ao mínimo os impactos das atividades que dependem dos recursos naturais, de forma que seu cumprimento interessa tanto às pessoas físicas quanto às jurídicas (ABPA, 2022). A Política Nacional de Resíduos Sólidos (BRASIL,

2010), prevê uma hierarquia de ações sobre os resíduos, contemplando, a princípio, a não geração, e na impossibilidade desta, a redução, reutilização, reciclagem, tratamento e como última alternativa, a destinação ambientalmente adequada dos rejeitos em aterro.

O fortalecimento das etapas hierárquicas na gestão dos resíduos sólidos, bem como o desvio de resíduos orgânicos de aterros sanitários e lixões, reduz as pressões dos resíduos sólidos sobre o meio ambiente em termos de contaminação do solo e dos corpos d'água e de poluição do ar, ao evitar a geração de chorume e as emissões de gases de efeito estufa (GEE). Por isso, é fundamental para a redução dos impactos negativos sobre a saúde pública (MMA, 2020). Independentemente do tipo de resíduo, os descartes inadequados devem ser minimizados e o potencial de uso alternativo deverá ser explorado.

## 2.2 A PROBLEMÁTICA DOS RESÍDUOS NAS AGROINDÚSTRIAS

A agroindústria compreende o segmento da indústria responsável pelo processamento ou beneficiamento de matérias-primas provenientes da agricultura e pecuária em diversos produtos, alimentícios e não alimentícios.

As principais atividades agroindustriais no Paraná são: suinocultura, avicultura, bovinocultura, cana de açúcar, mandioca, citricultura, madeira, dentre outras. Durante a produção e transformação destas atividades, todas geram resíduos. Geralmente esses resíduos apresentam valor nutricional para as plantas, podendo ser retornados ao local de origem, desde que de forma adequada (MIYAZAWA; BARBOSA, 2019).

No setor da agroindústria, prevalece o princípio do poluidor-pagador, no qual quem produz os resíduos ou polui o ambiente deve pagar a totalidade dos custos das suas ações. Assim, os responsáveis pelo planejamento e os gestores de resíduos deverão sistematicamente escolher as melhores opções de tratamento e/ou destinação final, com o mínimo de riscos possível para a saúde humana e para o ambiente.

A destinação dos resíduos pode representar um grande entrave para a ascensão da atividade agroindustrial no Brasil, além de ser alvo de muitos conflitos ambientais. É alta a quantidade de resíduos gerados nos mais diversos ramos da agroindústria, sendo necessárias medidas que busquem a disposição ambientalmente correta e o aproveitamento destes, como matéria-prima para outras atividades (VIANA; CRUZ, 2016). Em todos os casos, faz-se necessário o cumprimento de exigências legais. O descarte, processamento ou utilização inadequada de resíduos, independente da sua classificação, pode gerar contaminação do ar, do solo, das águas, proliferação de vetores e doenças, ocasionando impactos na saúde, meio

ambiente e qualidade de vida, e, portanto, seu gerenciamento deve ser priorizado (MIYAZAWA; BARBOSA, 2019; ABPA, 2022).

O cenário atual, pós pandemia da COVID-19 e a guerra entre Rússia e Ucrânia evidenciaram a dificuldade brasileira em obter insumos para a produção de fertilizantes. O elevado nível de importação, aliado à dependência tecnológica, deixa a economia brasileira vulnerável às oscilações do mercado internacional (CALIGARIS et al., 2022). A Rússia é o principal fornecedor de fertilizantes para o Brasil, responsável por 22% do total. Dos fertilizantes que o País importa, o cloreto de potássio, representa 31%, sendo seguido por ureia, com 17%, e fosfato monoamônico, com 12% (CAFFAGNI, 2022).

Para Caffagni (2022), ao longo dos últimos anos, ocorreu uma relação inversa entre fertilizantes produzidos e utilizados no Brasil, o que explica o rápido crescimento do vínculo aos fornecedores internacionais. Nesse período, a produção doméstica caiu 32%, enquanto a entrega de fertilizantes para o mercado cresceu 50%. Como consequência, a produção representava 30% do consumo em 2013, caindo para apenas 14% em 2021.

Desta forma, iniciativas de reaproveitamento de matérias-primas de setores tradicionais da agroindústria poderão reduzir a dependência do país sobre adubos importados. Além disso, a reciclagem ou reutilização total ou parcial dos resíduos orgânicos, atendem as premissas do PNRS, contribuem para a economia circular e redução da pressão pela extração de matérias-primas naturais.

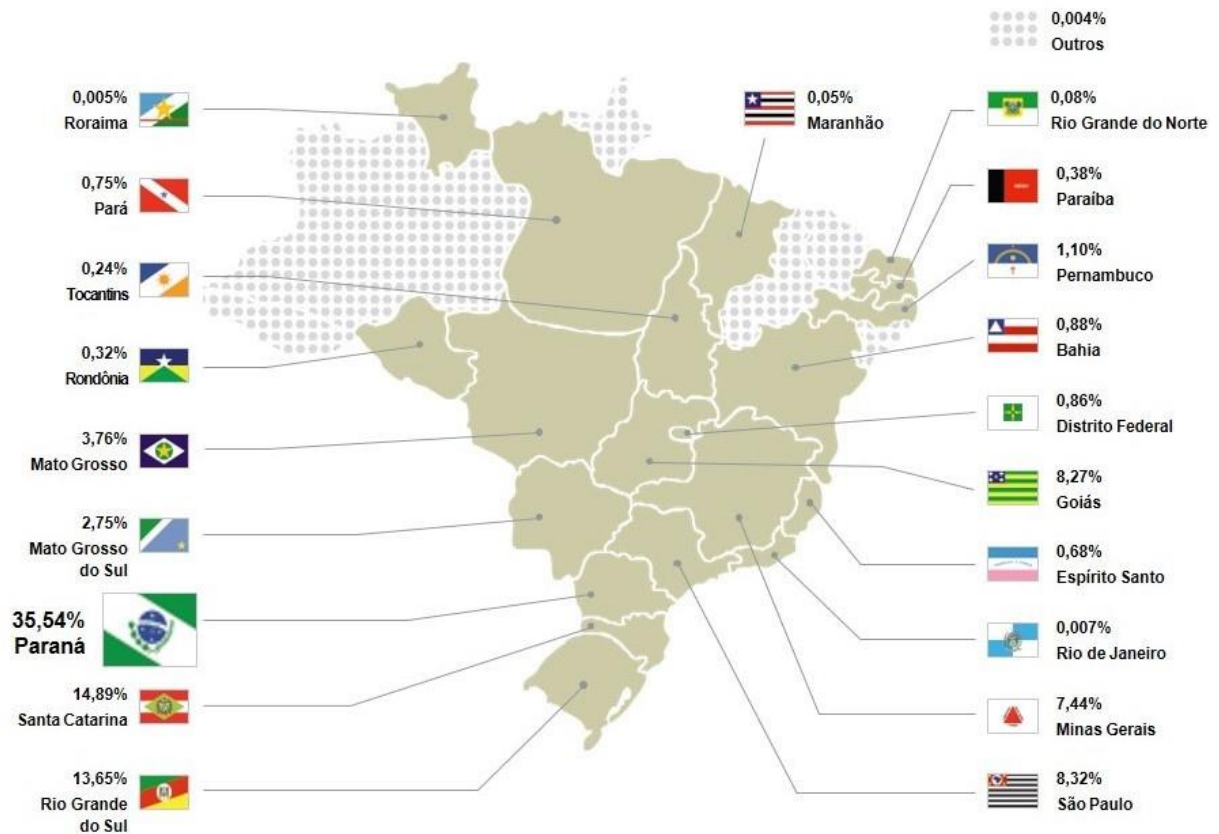
O arcabouço legislativo ambiental brasileiro é fortemente restritivo, o que assegura o controle sobre o uso dos recursos naturais e a correta preservação da natureza, sem prejudicar a produção de alimentos de forma acessível, sendo peça chave para o desenvolvimento de forma sustentável. Do lado privado, a maneira como as empresas lidam com os recursos naturais e gerenciam seu impacto ambiental tem cada vez mais relevância para a sociedade em geral (ABPA, 2022). Assim, transparência e cuidados com o meio ambiente são pontos fundamentais para a reputação das agroindústrias brasileiras, que vêm internalizando cada vez mais a sustentabilidade nas suas estratégias de negócios.

### **2.2.1 Expansão do setor avícola no Brasil**

Entre as agroindústrias no Brasil tem destaque, em volume de produção, o setor avícola. De acordo com a Associação Brasileira de Proteína Animal (ABPA, 2022), foram produzidos no país 14.329 milhões de toneladas de carne de frango em 2021, sendo o Paraná o

maior produtor, com 35,54%, seguido por Santa Catarina, com 14,89%, e Rio Grande do Sul com 13,65% (Figura 1).

**Figura 1. Produção de frango (%) por unidade federativa em 2021.**



Fonte: MAPA/ ABPA (2022)

Em termos de produção mundial, em 2021, o Brasil apresentou o terceiro maior volume, perdendo somente para os Estados Unidos, que produziu 20.378 milhões de toneladas, e China, com 14.700 milhões de toneladas. Já quando se trata de mercado externo, o Brasil é líder na exportação da carne de frango, sendo responsável por 4.610 milhões de toneladas (32,17% da produção total), com o estado do Paraná novamente liderando, com 40,38% do total das exportações nacionais. Os principais destinos foram China (14,33%), Japão (10,04%) e Emirados Árabes (8,71%) (ABPA, 2022).

De acordo com a projeção realizada pelo Ministério da Agricultura Pecuária e Abastecimento (MAPA, 2021), é esperado que a produção brasileira de carne de frango até 2031 possa aumentar à razão de, aproximadamente, 2,5% ao ano, acumulando em 10 anos incremento de quase 28%. Porém, não havendo entraves, a produção pode apresentar níveis de evolução bem mais significativos, próximos de 4%. É o que a SPA/MAPA projeta como limite

superior. Neste caso, o total produzido em 2031 pode chegar aos 21,6 milhões de toneladas, cerca de 46% a mais que o previsto para o corrente exercício (Figura 2).

**Figura 2. Projeções da evolução da produção de carne de frango - 2021 a 2031 (milhões de toneladas).**



Fonte: SPA/MAPA; Elaboração e análise – Avisite (2021)

A avicultura brasileira conta com alguns aliados fundamentais que conferem predisposição natural de suas cadeias à sustentabilidade, como a ampla disponibilidade de água e de terra somadas a um clima favorável. Estes recursos naturais proporcionam o abastecimento adequado de insumos agrícolas e são responsáveis por gerar uma demanda menor do consumo de energia nos sistemas de produção, além de permitir boas condições de saúde e bem-estar animal (ABPA, 2022). As agroindústrias podem impactar o ambiente de diversas maneiras, contudo, de acordo com o International Poultry Council (IPC, 2022), o setor avícola pode contribuir para reduzir os impactos ambientais no mundo por meio do manejo sustentável e do uso eficiente de recursos. O IPC (2022) identifica áreas em que o setor avícola pode fazer a diferença nos três pilares da sustentabilidade – ambiental, econômico e social e classifica a carne de aves como um dos sistemas de produção de alimentos mais sustentáveis, com um impacto ambiental bastante baixo.

O modelo de produção avícola atual, intensivo e centralizado, no qual a empresa produz internamente tudo o que puder, diminui a dependência de terceiros e contribui para a economia circular e o desenvolvimento do setor. De acordo com o Centro de Estudos Avançados em Economia Aplicada (CEPEA, 2014), o sistema de integração vertical na avicultura surgiu

na década de 70, sendo uma parceria entre a indústria (frigoríficos) e os produtores. Neste modelo, o avicultor integrado passou a contar com o apoio da indústria no que se refere ao fornecimento dos principais insumos da atividade, como ração e medicamentos, além de assistência técnica e reposição de lotes (pintainhos). A produção é, então, repassada à indústria, que garante a remuneração ao avicultor. Este sistema de produção, considerado mais verticalizado e intensivo, contribuiu para o desenvolvimento da avicultura nacional, principalmente nos quesitos relacionados à biossegurança, sanidade, qualidade dos animais. A presença da integradora, por sua vez, tornou a atividade mais organizada, estabelecendo padrões de manejo e de “boas práticas” e fornecendo assistência técnica para os produtores, além de uma maior preocupação com a destinação adequada dos resíduos gerados em toda a cadeia.

### **2.2.2 Geração de resíduos no setor avícola**

Como consequência da larga escala de produção no setor avícola, existe a geração de um volume considerável de resíduos orgânicos, desde a fase de criação das aves, até o abate e processamento.

A cadeia produtiva de frangos de corte tem quatro etapas principais de produção significativa de resíduos orgânicos: avicultura reprodutiva, incubatório, crescimento de frangos de corte e indústria de frangos de corte. Os principais resíduos dessa indústria são cama de aves reprodutiva, resíduos de incubatório, resíduos de ração, carcaças, fração sólida de limpeza de caminhões, lodo de flotação, tripas de salsicha, carvão e cinzas (CHIARELOTO, 2021).

O não tratamento dos resíduos da cadeia produtiva de frango de corte pode levar a problemas ambientais e sanitários significativos (CHIARELOTTO, 2021). O manejo, armazenamento e a disposição inadequados, tanto dos resíduos principais da produção, quanto destes resíduos secundários, em áreas descobertas e/ou sobre o solo sem proteção e/ou sem dispositivos de contenção de líquidos podem contaminar o solo e as águas superficiais e subterrâneas, tornando-os impróprios para qualquer uso, bem como gerar problemas de saúde pública (MACHADO, 2014).

Nos abatedouros, os principais volumes de resíduos gerados estão ligados à alta demanda de tratamento dos efluentes líquidos e resíduos sólidos do processo industrial. Os principais resíduos sólidos orgânicos gerados, são os resíduos retidos nas peneiras e filtros, lodos provenientes das estações de tratamento de águas e efluentes e cinzas das caldeiras. Os restos de animais, como sangue, tripas, penas, cabeças, recolhidos no setor de subprodutos, são



geralmente aproveitados para a fabricação de rações (PACHECO, 2008; MACHADO, 2014; KUNH, 2022).

### 2.2.3 Lodos de ETE de abatedouro de aves

O consumo de água necessário para o abate de aves gira em torno de 25 L ave<sup>-1</sup> (PARANÁ, 2006) levando a geração de enormes quantidades de efluentes líquidos e lodos nas ETE.

As ETE têm por objetivo a remoção dos poluentes e carga orgânica presentes nos efluentes gerados no processo produtivo antes que retornem ao meio ambiente. A indústria de abate e processamento de aves é um segmento que demanda grande quantidade de água em todas as etapas do processo produtivo, gerando efluentes com altas concentrações de matéria orgânica (MO) biodegradável (BUSTILLO-LECOMPTE; MEHRVAR, 2015), com lipídios, proteínas, sólidos em suspensão, óleo, graxa, N e P. Esses componentes variam de planta para planta, dependendo do processo industrial e do consumo de água (KUNH, 2022).

Nos abatedouros, geralmente as ETE contam com um sistema primário físico-químico, com peneira, tanque de equalização e flotador, e sistema secundário biológico com lagoas de estabilização. No tratamento primário, o flotador promove a remoção de gorduras e sólidos suspensos do efluente através da coagulação, floculação e flotação. Este processo pode ocorrer pela ação físico-química, utilizando coagulantes ou floculantes, como cloreto férrico, sulfato de alumínio ou policloreto de alumínio, em conjunto com polímeros e alcalinizantes, ou somente física, através da injeção de micro bolhas de ar com vaso aerador. Esse processo promove elevada redução dos parâmetros do efluente (demanda bioquímica de oxigênio (DBO), óleos e graxas, sólidos suspensos e dissolvidos, entre outros), o que corresponde a cerca de 3 a 4% do volume de efluente tratado, e que irá gerar o lodo.

Após a remoção no flotador, considerando que o lodo *in natura* possui um elevado teor de umidade, é indicado que se realize um tratamento no mesmo com o objetivo de reduzir cada vez mais o teor de umidade, obtendo assim, um resíduo com menor volume para disposição final (VON SPERLING, 2005).

Para Von Sperling (2005), as principais etapas para o tratamento do lodo de ETE são:

- Adensamento, responsável pela remoção de umidade e, conseqüentemente, redução de volume do lodo;
- Estabilização, remoção de matéria orgânica;

- Condicionamento, etapa de preparação para desidratação e adição de polímero, utilizada principalmente para desaguamento mecânico;
- Desaguamento, desidratação ou secagem, utilizado para remoção de umidade do lodo, reduzindo ainda mais o seu volume;
- Higienização, para remoção de eventuais organismos patogênicos;

Segundo Von Sperling e Gonçalves (2001) nestas etapas de tratamento do lodo, os sólidos são capturados ou recuperados, enquanto a parte líquida separada retorna à estação, evitando que siga diretamente para as etapas seguintes.

Já o efluente de saída do flotor segue para o tratamento secundário, onde ocorre a autodegradação do efluente com a oxidação e estabilização do material orgânico que é consumido ou sedimentado no fundo das lagoas. Ao final do processo o efluente final é lançado no corpo hídrico, mediante monitoramento, seguindo as exigências da Resolução CONAMA nº 430 (BRASIL, 2011).

As características dos lodos gerados nas ETE são muito variáveis. Lodos de esgoto sanitário podem apresentar alta concentração de patógenos (SILVA et al., 2001), assim como cargas altas de contaminantes químicos provenientes de produtos domésticos de limpeza, cosméticos, higiene pessoal entre outros (SAITO, 2007; SMITH, 2009). Similarmente ao resíduo doméstico, a natureza da atividade industrial, como o tipo de processo produtivo e insumos utilizados, determina a composição do lodo. Em lodo de abatedouro, mesmo sem a contribuição de esgoto sanitário, são verificados altos níveis de contaminantes microbiológicos (MÉNDEZ-CONTRERAS et al., 2009), sendo que lodos com alta concentração de metais estão relacionados principalmente com galvanoplastia, curtumes, indústrias farmacêuticas e de formulação de compostos orgânicos, fundições, lavanderias, indústrias de petróleo, de corantes e pigmentos (SILVA et al., 2001).

Em um sistema de tratamento de efluentes, o manejo do lodo, separação, adensamento, estabilização e acondicionamento frequentemente são considerados um grande desafio, tanto tecnicamente como operacionalmente. O manuseio das enormes quantidades de lodo acarreta uma proporção significativa dos custos operacionais totais, e por esse motivo, são necessárias estratégias adequadas de reutilização que sejam sustentáveis do ponto de vista ambiental e econômico (LAMASTRA, 2018; KUNH, 2022). As alternativas para o gerenciamento do lodo são variáveis, contudo, considerando sua rica composição em material orgânico uma alternativa bastante indicada é o uso na agricultura.

#### **2.2.4 Cinzas de caldeira**

As cinzas vegetais são um dos resíduos de maior expressão no meio agroindustrial. Nos abatedouros, as cinzas são provenientes da queima de cavaco ou lenha (geralmente eucalipto) nas caldeiras responsáveis por produzir vapor para a indústria. Os maiores consumidores de vapor nos abatedouros de aves são os setores de escaldagem e higienização. Também são produzidas cinzas nas fornalhas para o processamento dos subprodutos das aves, como para a extração de óleos e fabricação de farinhas e/ou rações. A atividade das caldeiras e fornalhas ocorre de forma ininterrupta e são fundamentais do início ao fim dos processos produtivos.

As cinzas são frequentemente descartadas em aterros ou destinadas à compostagem e utilização agrícola, desde que atendam às exigências legais. Seu potencial se dá em função de características de pH alcalino, e presença de minerais e nutrientes, possibilitando então seu uso para fins de adubação do solo (SANTOS, 2012; ONDRASEK et al., 2020).

### **2.3 UTILIZAÇÃO AGRONÔMICA DE RESÍDUOS**

#### **2.3.1 Vantagens da utilização agrícola dos resíduos**

Muitos resíduos agroindustriais podem representar uma fonte de matéria prima de reaproveitamento na agricultura. O material orgânico, pode atuar sobre a fertilidade do solo, de forma a disponibilizar nutrientes para as plantas e aumentar a atividade microbiana benéfica (MIYAZAWA; BARBOSA, 2019), além de reduzir o passivo ambiental gerado. Para isso, é necessário que o material apresente a qualidade ambiental requerida, de acordo com a legislação pertinente.

A aplicação de resíduos agroindustriais em sistemas de produção agrícola tem mostrado efeitos positivos tanto na produtividade das culturas como na qualidade do solo (MIYAZAWA; BARBOSA, 2019). O uso de compostos orgânicos melhora as propriedades químicas, físicas e biológicas do solo, por meio do fornecimento de nutrientes, favorecendo a estrutura do solo com mais aeração e permeabilidade, aumentar a porosidade e a capacidade de retenção de água, permitindo também, a reciclagem de nutrientes para o meio de forma natural, além de contribuir no sequestro de C no solo (CHAUDHARY et al., 2017; SANTOS, 2018; MUSCOLO et al., 2018; HUANG et al., 2019; CHIARELOTTO, 2022).

A aplicação de um resíduo orgânico ao solo resulta em estímulos diferenciados para os microrganismos, devido a uma modificação direta ou indireta das características do meio, determinantes da qualidade, quantidade e atividade da população microbiana existente (OLIVEIRA et al., 2011). Também pode contribuir na disponibilidade de macro e micronutrientes e na produtividade de culturas agrícolas (BEDADA et al. 2016). Os teores médios de nutrientes para alguns resíduos utilizados na agricultura estão apresentados na Tabela 1.

**Tabela 1. Valores médios de N, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, K<sub>2</sub>O, CaO e MgO em resíduos utilizados na agricultura.**

Resíduos	Teores médios (%)				
	N	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O	CaO	MgO
Cama de frango de corte	1.7	1.3	0.84	1.4	-
Cama de Peru	1.8	2.19	1.4	2.5	-
Esterco bovino	2.25	1.83	4.8	3.06	1.75
Lodo de esgoto alcalinizado	1.38	1.6	0.07	19.71	2.87
Cinza de caldeira	-	2.75	2.31	6.28	1.73

**Fonte: NEPAR-SBCS (2019) (Adaptado).**

A aplicação combinada de fertilizantes minerais e compostos orgânicos vem ganhando reconhecimento como prática viável na melhoria da qualidade do solo e no desenvolvimento de culturas agrícolas. Se houver uma substituição em partes do fertilizante clássico por outras fontes naturais, pode-se reduzir a exploração do petróleo e fertilizantes químicos extraídos de rochas, ambos de longos ciclos geológicos (BONFIM-SILVA et al., 2011). Essa prática, no Brasil, pode proporcionar a redução do uso de fertilizantes minerais e reduzir a dependência da importação desses produtos.

### **2.3.2 Fertilizantes e condicionadores de solo a base de resíduos**

Fertilizantes são definidos como substâncias minerais ou orgânicas, naturais ou sintéticas, fornecedoras de um ou mais nutrientes às plantas. Os fertilizantes orgânicos são aqueles obtidos por processo físico, químico, físico-químico ou bioquímico, natural ou controlado, a partir de matérias-primas de origem industrial, urbana ou rural, vegetal ou animal, enriquecido ou não de nutrientes minerais (Decreto Federal 4.954/2004 - BRASIL e Decreto Federal 8.384/2014 - BRASIL).

Os fertilizantes orgânicos, simples, mistos, compostos e organominerais, podem ser classificados de acordo com as matérias-primas utilizadas na sua produção (IN nº 61- MAPA, BRASIL, 2020) (Tabela 2).

**Tabela 2. Resumo da classificação dos fertilizantes orgânicos.**

Fertilizante	Origem
Classe “A”	Utiliza matérias-primas das atividades extrativas, agropecuárias, industriais, agroindustriais e comerciais, de origem mineral, vegetal, animal, incluindo lodos agroindustriais de sistema de tratamento de águas residuárias, <b>isentos de despejos ou contaminantes sanitários.</b>
Classe “B”	Utiliza matérias-primas orgânicas geradas nas atividades urbanas, industriais e agroindustriais, resíduos sólidos urbanos e lodos, <b>contendo contaminantes sanitários.</b>

**Fonte: IN nº 61- MAPA (BRASIL, 2020).**

Os resíduos que enquadram-se como fertilizantes orgânicos Classe “A” (sem fração sanitária), têm uso permitido em pastagens e capineiras, desde que seja realizada a incorporação ao solo. É permitido o pastoreio somente após 40 dias depois da incorporação do fertilizante ao solo. Para os fertilizantes orgânicos Classe “B” (com fração sanitária), o uso torna-se mais restrito, sendo proibido em pastagens e cultivo de olerícolas de folhosas, bulbosas, rasteiras, tubérculos e raízes, e, bem como as demais culturas cuja parte comestível entre em contato direto com o solo. Para culturas industriais, como algodão, cana-de-açúcar, espécies florestais, jardins etc, as maiores preocupações são com a liberação de N e P para os mananciais de águas superficiais e subterrâneos (IN nº 61- MAPA, BRASIL, 2020).

Podem ser utilizados para a produção de fertilizante orgânico Classe "A", os resíduos provenientes de serviços públicos de limpeza urbana e de manejo de resíduos sólidos, desde que estes serviços contemplem a segregação na fonte geradora e a coleta diferenciada de resíduos em, no mínimo, três frações: resíduos orgânicos, resíduos recicláveis e rejeitos, evitando qualquer tipo de contaminação sanitária (IN nº 61- MAPA, BRASIL, 2020).

As formulações dos fertilizantes, devem resultar em produto de utilização segura na agricultura, atendendo aos parâmetros e limites máximos estabelecidos para contaminantes. Também para que sejam considerados fertilizantes, o material orgânico deverá atender a um valor mínimo de macro e micronutrientes. Para os fertilizantes orgânicos simples, mistos e compostos, o teor de C orgânico mínimo é de 15%, o N total, pelo menos 0,5% e a umidade

máxima é de 50%. Tais produtos para serem comercializados ou expostos à venda, devem estar estabilizados (IN nº 61- MAPA, BRASIL, 2020).

Os fertilizantes devem ser registrados no MAPA, porém são dispensados de registro: esterco e camas, tortas vegetais, farelos, húmus de minhoca, gerados e processados naturalmente, sem o uso de aditivos ou de outros componentes químicos, quando utilizados para uso próprio ou comercializados diretamente com o consumidor final, sem prejuízo às exigências do uso e à aplicação segura (Decreto 4.954/2004 – BRASIL, 2004; IN nº 61 - MAPA, BRASIL, 2020). Para a utilização de resíduos de lodo como fertilizantes ou condicionadores de solo, existe ainda a necessidade de comprovar o pré-tratamento para a redução de patógenos e de atratividade de vetores, e/ou a estabilização do material, conforme processos aprovados pelo órgão de controle ambiental e definidos pela Resolução CONAMA Nº 498 (BRASIL, 2020).

A atual situação do mercado internacional para os fertilizantes, pode significar riscos altos para a agropecuária brasileira. A possibilidade de falta de fertilizantes em decorrência de sucessivas crises, sendo o conflito entre Rússia e Ucrânia a mais conhecida delas, expõem as vulnerabilidades do Brasil pela alta dependência de insumos estratégicos, e acelerou a implementação de medidas que já vinham sendo desenhadas pelo governo federal (CALGARIS et al., 2022).

Em 2021 mais de 85% dos fertilizantes utilizados no país foram importados, de um mercado dominado por poucos fornecedores. O elevado nível de importação em um setor concentrado comercial e geograficamente, aliado à dependência tecnológica, deixa a economia brasileira vulnerável às oscilações do mercado internacional (CALGARIS et al., 2022).

Para tanto, a construção de um ambiente de negócios mais estável para os fertilizantes no Brasil, vem sendo estimulado, por meio do Plano Nacional de Fertilizantes 2022-2050, por meio do Decreto nº 10.991 (BRASIL, 2022), o qual prevê como diretrizes e serem implantadas:

- I - a modernização, a reativação e a ampliação das plantas industriais e dos projetos de fertilizantes existentes no País;
- II - a melhoria do ambiente de negócios no País, com vistas à atração de investimentos para a cadeia de produção e distribuição de fertilizantes e insumos para nutrição de plantas;
- III - a promoção de vantagens competitivas para o País na cadeia de produção mundial de fertilizantes;
- IV - a ampliação dos investimentos nas atividades de pesquisa, desenvolvimento e inovação e no aperfeiçoamento da cadeia de produção e distribuição de fertilizantes e insumos para nutrição de plantas do País; e
- V - a adequação da infraestrutura para a integração de polos logísticos e a viabilização de novos empreendimentos.

A sucessão de crises pode ser a oportunidade de se perceber que, para a agricultura nacional ocupar posição global proeminente, é preciso se atentar para seus alicerces. A

disponibilização a preços praticáveis de fertilizantes e insumos para nutrição de plantas deve ser entendida como vetor estratégico não apenas para a agricultura nacional, mas também para a renda, o emprego e a segurança alimentar (CALGARIS et al., 2022). Este cenário destaca a valorização e uso agrícola de resíduos agroindustriais, como os lodos de ETE, e a importância de desenvolver e levar à campo, novos produtos e tecnologias nacionais.

### **2.3.3 Critérios e restrições do uso agrícola do lodo**

Muitos resíduos são passíveis de utilização agrícola, todavia, a utilização desses resíduos na forma pura, sem nenhum tratamento prévio, pode apresentar um impacto ambiental. Os lodos podem conter metais pesados, compostos orgânicos persistentes e patógenos em concentrações nocivas à saúde e ao meio ambiente e, portanto, é previsto que os lodos, para terem aplicação agrícola, deverão ser submetidos a processo de redução de patógenos e da atratividade de vetores (Resolução CONAMA 498, BRASIL, 2020), como a estabilização, a compostagem, digestão aeróbia ou anaeróbia, secagem ou tratamento térmico, entre outros.

A estabilização do lodo é empregada, principalmente, para reduzir a densidade de organismos patogênicos e/ou evitar seu desenvolvimento, minimizar a atividade de vetores e promover o controle de odores. A estabilidade do lodo é geralmente associada à tendência do material orgânico a biodegradar, conduzindo à produção de odor (LOTITO et al., 1991).

Dois níveis principais de estabilização do lodo são reconhecidos pela Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos, desde 1979 (EPA, 2002): estabilização biológica e a estabilização química. Em síntese, a estabilização biológica inclui a digestão anaeróbia e aeróbia, secagem ao ar e compostagem como também outros métodos capazes de obterem os mesmos resultados, e a estabilização química, refere-se principalmente à adição de substâncias químicas como a cal.

O termo lodo tem sido utilizado para designar os subprodutos sólidos do tratamento de esgotos. O lodo proveniente de ETE, processados de modo a permitir seu manuseio de forma segura na utilização agrícola, é denominado biossólido. O termo biossólido é uma forma de ressaltar seus aspectos benéficos, valorizando a utilização produtiva, em comparação com a mera disposição final improdutiva, por meio de aterros, disposição superficial no solo ou incineração (VON SPERLING; GONÇALVES, 2001).

Os métodos que podem ser utilizados, são definidos pela Resolução CONAMA N° 498 (BRASIL, 2020), e incluem etapas de pré-tratamento e estabilização química, física e biológica (Tabela 3).

**Tabela 3. Resumo dos processos de tratamento e estabilização do lodo e classificação do bio sólido ser aplicado em solos.**

<b>Bio sólido</b>	<b>Processo de tratamento do lodo</b>	<b>Requisitos</b>
Classe “A”	1. Tempo e temperatura.	Manter a temperatura de 50°C pelo tempo determinado na equação (Art.9º -Tabela 1).
	2. Elevação de pH e temperatura.	Manter pH>12 por 72 h Temperatura >50°C por 12 horas, enquanto o pH estiver acima de 12. Secagem do lodo ao ar.
	3. Processos de regime 1 e 2, mas que não atendem os requisitos.	Submeter plano de amostragem para aprovação do órgão ambiental competente e atender >1 Ovo de helminto g <sup>1</sup> de ST
	4. Processos não especificados	Para bio sólidos destinados em lotes. Atender a >1 Ovo de helminto g <sup>1</sup> de ST (por lote)
	5. Processos de redução adicional de patógenos	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Compostagem confinada (3 dias, 55 °C);</li> <li>• Compostagem com revolvimento (15 dias, 55 °C);</li> <li>• Secagem térmica (&gt; 80 °C; umidade &lt;10%);</li> <li>• Tratamento térmico do lodo líquido (180 °C, no mínimo 30 min);</li> <li>• Digestão aeróbia (10 dias, 55 °C);</li> <li>• Irradiação, raios beta e gama (1 megarad, 20 °C);</li> <li>• Pasteurização (70°C, no mínimo 30 min).</li> </ul>
Classe “B”	Redução significativa de patógenos	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Digestão aeróbia (40 dias, 20 °C / 60 dias, 15 °C);</li> <li>• Secagem em leito, até atingir teor de sólidos mínimo de 60%;</li> <li>• Digestão anaeróbia (15 a 60 dias)</li> <li>• Compostagem (40°C por 5 dias)</li> <li>• Estabilização com cal (pH 12, por 2 h)</li> </ul>
	Processo equivalente	Lodo tratado por outro processo comprovado e aceito pelo órgão ambiental.

Fonte: Resolução CONAMA N° 498 (BRASIL, 2020)



Os processos para a redução de patógenos e de atratividade de vetores, devem ser aprovados e monitorados pelo órgão de controle ambiental responsável. Independente do processo utilizado, é exigido que o biossólido de lodo Classe A, além de atender os requisitos do processo descrito na Tabela 3, atenda ao limite máximo de  $10^3$  Escherichia coli por grama de sólidos totais ( $\text{g}^{-1}$  de ST). Enquanto para o Classe B, o limite máximo é de  $10^6$  Escherichia coli por grama de sólidos totais ( $\text{g}^{-1}$  de ST) (Resolução CONAMA Nº 498, BRASIL, 2020).

Resolução CONAMA Nº 498/2020, para o biossólido Classe A, não há restrição no que se refere ao tempo entre a aplicação do biossólido e o cultivo ou colheita nas seguintes situações:

- Produtos alimentícios que não têm contato com o solo;
- Produtos alimentícios que não são consumidos crus;
- Produtos não alimentícios

Para o cultivo de alimentos consumidos crus e cuja parte comestível tenha contato com o solo, existe a restrição de não aplicar o biossólido um mês antes do período de colheita. Para pastagens e forrageiras, não aplicar o biossólido um mês antes do período de colheita.

O biossólido Classe B poderá ser aplicado em solos, observadas as respectivas restrições:

- É proibida a utilização no cultivo de produtos alimentícios que possam ser consumidos crus (caso a área tenha recebido aplicação, deverá aguardar o prazo de seis meses para o cultivo).
- Cultivo de produtos alimentícios que não sejam consumidos crus e produtos não alimentícios, a aplicação do biossólido deverá ocorrer quatro meses antes da colheita;
- Pastagens e forrageiras: Não aplicar o biossólido dois meses antes do pastejo, ou quatro meses antes da colheita.
- Árvores frutíferas: Aplicação deve ser realizada após a colheita.

Não há restrição para aplicação de biossólidos Classe A ou B em florestas plantadas, recuperação de solos e de áreas degradadas, para fins de pesquisa em quaisquer culturas, bem como uso em solos para o cultivo de cortinas verdes, jardins e gramados em áreas de ETE, desde que cumpram os preceitos de segurança desta norma e demais legislações aplicáveis (Resolução CONAMA Nº 498, BRASIL, 2020).

Quanto as substâncias químicas, a Resolução CONAMA Nº 498/2020 determina que os biossólidos para uso em solos, serão classificados em Classe 1 ou Classe 2, de acordo com os valores máximos permitidos de substâncias químicas, os quais não poderão ser ultrapassados

em qualquer das amostras analisadas. O biossólido (lodo) que se enquadrar em resíduos Classe 2 somente poderá ser aplicado em solos mediante monitoramento da taxa máxima anual e a carga máxima acumulada, os quais não devem exceder os limites apresentados na legislação (Resolução CONAMA N° 498, BRASIL, 2020).

#### **2.3.4 Principais processos de estabilização do lodo**

A estabilização da matéria orgânica compreende a biodegradação, redução de odores e do nível de microrganismos patogênicos no solo e é um importante indicador para a utilização agrícola de materiais de composição orgânica sejam realizados de forma adequada, sem a ocorrência de efeitos adversos relevantes (HANKE; DICK, 2019; LEAL, 2020). Materiais orgânicos, quando pouco estabilizados, podem apresentar diversos problemas durante o seu transporte e armazenamento, tais como: temperaturas elevadas devido ao seu auto aquecimento, alterações das suas características originais e emissão de gases e odores desagradáveis, e quando aplicados ao solo, os materiais orgânicos instáveis podem causar anaerobiose, formação de substâncias tóxicas e imobilização de nutrientes (LEAL, 2020).

A incorporação de MO a solos agricultáveis, proveniente de resíduos, diminui a entrada de CO<sub>2</sub> na atmosfera, além de auxiliar na retenção de umidade, melhorar a textura dos solos, dificultando assim o processo de erosão e fornecendo macro e micronutrientes às plantas. No entanto, a MO contida nos resíduos deve ser devolvida ao solo com certo nível de estabilização, com macro e micronutrientes em uma forma mais assimilável pelas plantas e microrganismos presentes no solo, para tanto algum processo químico, físico ou biológico deve ser utilizado (DOLORES-SILVA, 2013).

#### **Compostagem**

A compostagem é o processo de estabilização onde ocorre a transformação biológica de materiais orgânicos, em fertilizantes e substratos orgânicos utilizáveis na agricultura (DOLORES-SILVA, 2013). Sua qualidade pode variar de acordo com os resíduos orgânicos e os processos empregados, os quais são normatizados por legislação específica.

A atividade de compostagem é passível de licenciamento ambiental pelo órgão competente e todos os resíduos inseridos no processo devem obrigatoriamente ter pré-autorização para uso. Já a qualidade do produto é estabelecida e garantida pelo MAPA, por meio dos registros de estabelecimento produtor e de produto. Como o resíduo não tem um padrão definido, a indústria da compostagem pode lançar mão do uso de insumos agrícolas que,

em pequenas quantidades, conferem padrão de qualidade agronômica ao composto orgânico, como por exemplo: calcário, gesso agrícola, remineralizadores diversos, rochas fosfáticas, etc. Normalmente o composto orgânico resultante é passível de registro no MAPA como produto de uso seguro e irrestrito na agricultura (OLIVEIRA et al., 2021).

De acordo com a Resolução CONAMA 481 (BRASIL, 2017), é vedada a adição dos resíduos perigosos ao processo de compostagem. A adição de lodos de ETE é permitida, quando não classificados como resíduo perigoso, e mediante autorização do órgão ambiental, o qual deverá estabelecer critérios de admissão e restrição de resíduos orgânicos industriais nos processos, respeitada a legislação pertinente.

### **Estabilização química**

A estabilização química do lodo, ocorre mediante à adição de substâncias químicas como cal e ferrato de potássio. No processo de estabilização alcalina, adiciona-se uma quantidade de cal para elevar o pH até 12 ou mais (Resolução CONAMA N° 498 (BRASIL, 2020). O elevado pH retarda ou mesmo interrompe as reações microbiológicas. Desta maneira o lodo não irá apodrecer ou gerar odores.

A estabilização de lodos com produtos químicos pode ter algumas vantagens sobre os métodos biológicos em termos de custos de investimento, simplicidade de operação e efeito imediato. As desvantagens incluem maiores custos operacionais, a necessidade de controle cuidadoso e um efeito estabilizante temporário no caso da cal para elevar o pH do lodo a 12 e mantê-lo próximo a este nível por alguns dias (LOTITO et al., 1991). A estabilização química de lodos com cal hidratada ou com ferrato (VI) de potássio, pode promover remoções mais elevadas de coliforme fecal e estreptococo fecal do que a digestão aeróbia, digestão anaeróbia e a compostagem mesofílica (IDE, 1994).

### **Tratamento térmico**

Existem ainda processos mais avançados para o processamento do lodo, como os tratamentos térmicos. O critério básico deste grupo é uma redução de 90% de patógenos presentes ou uma redução de 99% de *Coliformes termotolerantes* e é utilizado quando for requerido um nível de estabilização mais alto no lodo (IDE, 1994).

Os secadores térmicos são responsáveis pelo aquecimento do lodo em um ambiente controlado, permitindo altas taxas de remoção de água e ainda possibilitando a higienização do material, sem a necessidade, portanto, da incorporação de produtos químicos. De acordo como Panepinto et al. (2016), para que a destinação agrícola do lodo se consolide no Brasil, é

fundamental que novas tecnologias de desaguamento e higienização sejam estudadas, de modo que reduza os custos e melhore no gerenciamento do lodo das ETE.

Na década passada, diversas agroindústrias avícolas, investiram em sistema de secadores térmicos para os lodos primário de suas ETE. Os secadores rotativos eram movidos pela queima de combustível (cavaco ou lenha) em fornalha própria. O material, lodo seco, era relativamente estável, e utilizado para queima em caldeira devido ao seu alto poder calorífico. No entanto, com entraves no processo, o que incluem as tentativas de alteração na legislação ambiental para permitir a queima do lodo, bem como dificuldades operacionais com os secadores, os quais rotineiramente ficavam superaquecidos e desencadeavam combustão interna devido ao alto teor de óleos e graxas do lodo, mesmo após o processo de centrifugação, levaram as empresas a procurarem outras alternativas para estabilização e utilização dos lodos de ETE. Para viabilização a queima do lodo, Kunh (2022) testou a possibilidade de fabricação de briquete de biomassa de lodo e serragem, sendo que a mistura que melhor atendeu os requisitos avaliados foi de 15% de lodo e 85% de serragem.

Outra alternativa que surge no momento é o emprego da técnica de pirólise (degradação térmica com limitação de oxigênio) de resíduos. Através da pirólise o resíduo é transformado em biochar (carvão vegetal ou biocarvão), material rico em C, esse produto, se decompõe mais lentamente que a biomassa *in natura*. O principal emprego do biochar, é como condicionador do solo (PIRES, 2018) e suas características serão descritas em item específico.

### **2.3.5 Aspectos legais do uso de lodos em solos agrícolas**

Nos últimos anos, a legislação para a reciclagem agrícola dos lodos, seja como matéria-prima para fabricar fertilizantes orgânicos e condicionadores de solo ou para uso direto no solo como resíduo, avançou de forma significativa. Como matéria-prima, as regras foram atualizadas pelo MAPA, por meio da IN nº 61 - MAPA (BRASIL, 2020), e como resíduo, o seu uso direto no solo segue os critérios da Resolução CONAMA Nº 498 (BRASIL, 2020), versão atualizada da Resolução CONAMA Nº 375 (BRASIL, 2006).

No Brasil, até o ano de 2020, a Resolução CONAMA 375 (BRASIL, 2006), era a única legislação acerca da utilização agrícola de lodos, porém, conforme especificado no Art. 3º, § 1º, a mesma não se aplicava a lodo de ETE de processos industriais, estando restrita aos lodos sanitários. Já a Resolução CONAMA Nº 498 (BRASIL, 2020), veio a suprir essa necessidade, e a tempo para que novos direcionamentos fossem definidos para o trabalho em questão. De acordo com esta Resolução:

“Art. 1º - § 1º O uso em solo de lodo de estação de tratamento de efluentes de processos industriais poderá excepcionalmente ser autorizado pelo órgão ambiental competente, mediante decisão fundamentada, desde que sejam atendidos, no mínimo, os critérios e parâmetros estabelecidos nesta resolução.”

Em 2022, o Plano Nacional de Fertilizantes 2022-2050 (DECRETO Nº 10.991, Brasil, 2022), vem à fortalecer e valorizar o uso agrícola de resíduos, pois elenca entre suas principais metas: o aumento da produção e a oferta de fertilizantes orgânicos e organominerais, o estímulo a oferta de produtos e processos que promovam a eficiência de fertilizantes e a utilização de novos insumos para a nutrição de plantas, com vistas à diminuir a dependência externa por fertilizantes. Incentiva também o aumento da oferta de novos produtos oriundos das cadeias emergentes de produção e distribuição de fertilizantes e insumos para nutrição de plantas (BRASIL, 2022).

Considerando a demanda crescente por alimentos e a necessidade de produção sustentável, os órgãos ambientais e governamentais estão em constante busca por métodos e técnicas que minimizem os impactos dos sistemas produtivos, como a necessidade de regulamentar e adequar a legislação do uso e manejo de resíduos agroindustriais, sempre com o objetivo de melhorar a capacidade de utilização dos recursos disponíveis e promover a preservação do meio ambiente (MIYAZAWA; BARBOSA, 2019).

### **2.3.6 Impactos ambientais da utilização de resíduos no solo**

A utilização agrícola dos resíduos sólidos pode causar impactos ambientais negativos, quando as técnicas utilizadas forem mal executadas ou inexistentes. Entre os principais problemas estão: a geração de odores, proliferação de vetores, produção de chorume com consequente poluição dos solos e das águas.

Alguns resíduos e lodos podem conter metais pesados, organismos patogênicos, ovos de parasitas entre outros, sendo que alguns fertilizantes orgânicos mal decompostos ou de origem não controlada podem introduzir ou aumentar o número de microorganismos de solo nocivos às plantas (ex: *Verticilium*, *Fusarium*, *Rizoctonia*, etc.) e introduzir sementes de plantas daninhas (TRANI et al., 2013).

De maneira geral, alguns cuidados são necessários quanto a aplicação de resíduos no solo, sendo de extrema importância otimizar as dosagens. Os fatores que oferecem maior risco são os que resultam da movimentação dos componentes do lodo por lixiviação ou por escoamento superficial (EPA, 1979, 2002). Degradação e solubilização são os principais processos envolvidos na transferência de poluentes do solo para à água e são, respectivamente,

associados ao processo de lixiviação e à erosão (FAVARETTO, 2019). O risco de erosão está ligado ao carreamento de partículas do lodo a cursos de água ou ao contato direto com a população, e a lixiviação à contaminação do lençol freático, principalmente com nitratos resultantes da decomposição da MO (EPA, 1979, 2002).

Quando o sistema de higienização adotado é a calagem, o lodo altera a reação do solo, podendo elevar o pH a níveis acima de 7,0 desequilibrando a dinâmica dos nutrientes, causando prejuízos ao desenvolvimento das culturas (SILVA, 2016; DEENIK; COONEY, 2016).

É preciso considerar a situação ambiental das áreas agrícolas para fins de utilização do lodo. No estado do Paraná, a Resolução SEMA nº 21/2009 (PARANÁ, 2009), estabelece critérios para a classificação e aptidão do solo, quanto aos critérios mínimos para escolha dos locais para aplicação do lodo, mais adequados conforme o potencial ambiental de cada área. As qualidades ótimas do solo para a aplicação de lodo são: solos profundos, alta capacidade de infiltração, textura fina suficiente para alta capacidade de retenção de água e nutrientes, boa drenagem e aeração, reação alcalino a neutro, para reduzir a mobilidade e solubilidade de metais pesados (EPA, 1979, 2002).

A utilização agrícola de resíduos sem critérios técnicos, poderá provocar redução na produtividade agrícola e impactos negativos ao ambiente. Em todas as situações de aplicação de resíduos devem ser adotadas as práticas de manejo e conservação do solo, inclusive no sistema plantio direto - com curvas de nível ou terraços e cobertura de solo por resíduos vegetais, para evitar possível escoamento superficial de nutrientes para os corpos de água superficiais (FAVARETTO, 2019; NEPAR-SBCS, 2019).

### **2.3.7 Utilização agrícola de cinzas de caldeira**

As cinzas são frequentemente utilizadas na agricultura, apresentando características de pH alcalino e presença de minerais e nutrientes, que podem contribuir para o desenvolvimento vegetal das plantas. Além disso, as cinzas apresentaram-se como ferramenta de restituição de uma parte dos nutrientes que normalmente são removidos com as culturas agrícolas, colaborando para a redução do uso de fertilizantes comerciais (SANTOS, 2012; BONFIM-SILVA et al., 2013; ONDRASEK et al., 2020).

Apesar dos efeitos geralmente melhorados das cinzas, precauções, como a caracterização quantitativa e qualitativa prévia do material de cinzas e dos solos a serem melhorados, são essenciais para evitar consequências ambientais desfavoráveis, como a degradação da terra por salinização do solo e/ou contaminação por metais, comprometendo o

rendimento/qualidade dos alimentos, a fim de manter a produção de alimentos limpa (ONDRASEK et al., 2020). Desta forma, o uso benéfico das cinzas no solo está diretamente relacionado a necessidade de estudos locais para realização de análises sobre quantidades e maneiras adequadas de aplicação (RIBEIRO et al., 2015).

Para minimizar possíveis efeitos adversos no solo, pode-se considerar o emprego de diluição com outros resíduos, para atender a NBR 10004/2004 (ABNT, 2004), ou métodos de fermentação anaeróbica, compostagem ou processamento do material para se obter um produto com características mais desejáveis para as culturas e que não venham apresentar riscos ao meio ambiente.

### **2.3.8. Características das culturas da aveia preta, soja e milho**

#### **Aveia preta**

A aveia preta (*Avena strigosa* Schreb) caracteriza-se pela rusticidade, pelo crescimento vigoroso e tolerância à acidez nociva do solo, causada pela presença de alumínio. É a forrageira anual de inverno mais usada para pastejo no inverno, no Sul do Brasil. É uma espécie mais precoce do que a maioria dos cereais de inverno, e também que o azevém. Possui grande capacidade de perfilhamento e sementes menores, quando comparadas às da aveia branca. Os grãos não são usados na alimentação humana (FONTANELI et al., 2012).

Segundo o levantamento de setembro de 2022, feito pela Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB), a área cultivada com aveia no Brasil (estados do sul, centro-sul e centro-oeste), safra 2022, foi de 499,8 mil hectares (CONAB, 2022).

A aveia preta promove melhoria dos atributos químicos e físicos do solo e acréscimo no rendimento de culturas subsequentes. A soja em sucessão à aveia é menos afetada por *Rhizoctonia* e *Sclerotinia* (FONTANELI et al., 2012). Responde à fertilização do solo, com aumento do rendimento de biomassa. A adubação de manutenção e nitrogenada de cobertura deve seguir a recomendação para a cultura (NEPAR-SBCS, 2019). A quantidade de semente a ser usada varia de 60 a 80 kg ha<sup>-1</sup>, e a época de semeadura é de março a julho, dependendo da finalidade de uso (FONTANELI et al., 2012).

#### **Soja**

A soja (*Glycine max* (L.) Merrill) é uma cultura oleaginosa de grande importância econômica com ampla versatilidade de usos de seus grãos, os quais podem ser utilizados para produção de óleo comestível, a alimentação humana e animal, além da produção de biodiesel.

Atualmente, no cenário agrícola mundial a soja é o quarto produto entre os cereais e oleaginosas mais utilizadas no consumo humano e o mais importante em produção e comercialização (PEREIRA, 2021).

A soja hoje é considerada a cultura mais relevante à economia do país. Segundo a CONAB (2022), a área plantada triplicou nos últimos 20 anos, sendo atualmente cultivados cerca de 42,89 milhões de hectares. O Brasil é o segundo maior produtor de soja do mundo, atrás somente dos Estados Unidos.

### **Milheto**

A planta de milheto *Pennisetum glaucum*, é uma gramínea anual de verão, rústica e resistente a seca, não tolera umidade excessiva. Tem crescimento ereto e apresenta excelente produção de perfilhos e vigorosa rebrota, após corte ou pastejo. As exigências térmicas e hídricas ideais para a planta de milheto são de temperaturas noturnas médias (15-28 °C) e mínimo de 30 mm de água para germinação, podendo ser uma boa opção como planta de cobertura de outono-inverno, embora a época recomendada para o milheto seja mesmo o verão (EMBRAPA, 2016).

O milheto é o sexto cereal mais produzido no mundo, utilizado na alimentação humana na África e na Índia. É uma cultura de baixo uso de insumos, com ampla utilização em diversos sistemas de produção (EMBRAPA, 2016).

No Brasil, teve sua área plantada aumentada nos últimos tempos, sobretudo nas regiões de Cerrado, pelo enorme potencial de uso como planta de cobertura do solo oferecido para a prática do plantio direto, bem como para o uso como forrageira na pecuária de corte ou de leite. No Brasil normalmente não é usado para o consumo humano (EMBRAPA, 2016).

## **2.4 BIOCHAR**

### **2.4.1 Definição**

Biochar ou biocarvão é o material produzido através da pirólise da biomassa de diversos resíduos orgânicos, que podem ter origem animal ou vegetal. São exemplos de materiais utilizados para produção de biochar: biomassa florestal (BALDOCK; SMERNIK, 2002; TRAZZI, 2018; FOGAÇA, 2019), casca de banana e bagaço de laranja (FEITOSA, 2019), casca e borra de café (SILVA, 2016), bagaço e palha de cana-de-açúcar (PIRES, 2018),



resíduos de milho, trigo e palha de arroz (PURAKAYASTHA, 2015), lodo de esgoto (SINGH et al 2010; LOPES, 2013; FARIAS, 2018) e cama de aviário (PEREIRA, 2019).

#### 2.4.2 Processos de pirólise

A pirólise é um processo termoquímico relativamente novo para produzir biochar e outros produtos de valor agregado a partir da biomassa de forma eficaz (TRIPATHI, 2016).

O biochar pode ser produzido por dois tipos de pirólise, uma rápida e outra lenta, ambas caracterizadas pela decomposição térmica da biomassa (KIM et al., 2013), apresentando rendimentos diferentes (LEHMANN, 2009). A pirólise lenta ocorre durante um longo período de reação (no mínimo 30 minutos), a temperaturas baixas (inferiores a 400°C) e favorece o rendimento do biochar; a pirólise rápida ocorre num curto período de tempo (entre 5 a 10 segundos), a temperaturas entre os 400 e 600 °C. Ringer et al. (2006) indicam que sobre condições de pirólise lenta, cerca de 35% do C da biomassa origina biochar, 30% bio-óleo e 35% gás, e Wright et al. (2008) indicam que na pirólise rápida ocorrem rendimentos de cerca de 15% de biochar, 70% de bio-óleo e 13% de gás (Tabela 4).

**Tabela 4. Rendimentos de biochar sob diferentes condições de pirólise.**

<b>Tipo</b>	<b>Condições</b>	<b>Líquido</b>	<b>Biochar</b>	<b>Gases</b>
Pirólise rápida	Temperatura moderada ~ 500 °C, curto tempo de residência do vapor de ~ 1 s.	75%	12%	13%
Pirólise intermediária	Temperatura moderada ~ 500 °C, tempo de residência do vapor de 10 – 20 s.	50%	20%	30%
Pirólise lenta (carbonização)	Baixa temperatura ~ 400 °C, muito longo tempo de residência do sólido (> 30 min)	30%	35%	35%

**Fonte: Lehmann, 2009 (adaptado)**

Após a pirólise, o produto fica com uma coloração preta e com alto teor de C, apresentando um tempo maior para se decompor, diferente da biomassa da matéria-prima inicial, sendo que temperaturas superiores a 400 °C promovem maior estabilidade de biochar no solo (PURAKAYASTHA et al., 2015).

A diversidade de biomassas existentes, gera uma diversidade de biochars. A matéria prima a ser utilizada é o reflexo do biochar a ser produzido. A condição de tempo de queima e

temperatura empregada na elaboração biochar, também resulta em materiais de diferentes composições mesmo sendo feito da mesma matéria prima (BALDOCK e SMERNIK, 2002).

### **2.4.3 Utilização agrícola do biochar**

O potencial de utilização de diferentes biochar como condicionadores de solo, vem sendo estudado em diversos continentes, como Europa (VERHEIJEN, 2010; LAMASTRA et al., 2018; HOOD-NOWOTNY et al., 2018), África, (GWENZI, 2016; OBIA et al., 2018), Ásia (IBRAHIM et al., 2013; PURAKAYASTHA, 2015; ALI et al., 2018; SIKDER; JOARDAR, 2019), América do Norte (KIM et al., 2013; DEENIK; COONEY, 2016; ALVAREZ-CAMPOS et al., 2018), e mais recentemente na América do Sul, incluindo o Brasil (SILVA, 2016; FOGAÇA et al., 2019; MARCELINO et al., 2020).

O uso do biochar na agricultura vem se tornando uma técnica bastante interessante para mitigar os efeitos das mudanças climáticas, sendo uma importante ferramenta no sequestro de C que também tem potencial de proporcionar diversas melhorias nas propriedades físicas, químicas e biológicas do solo (PURAKAYASTHA, 2015; SILVA, 2016). O biocarvão pode aumentar o pH, a capacidade de troca de cátions, o teor de C orgânico e a disponibilidade de nutrientes; alterar a abundância e funcionamento de fungos micorrízicos e prover refúgio para microrganismos nos microporos do biocarvão. Todas estas características de interação com o solo fazem com que a sua utilização no meio agrícola apresente normalmente efeitos positivos para o crescimento das plantas (TRAZZI et al., 2018)

O biochar incorporado ao solo libera lentamente nutrientes com mudanças na funcionalidade e porosidade da superfície, os quais deverão aumentar a capacidade de retenção de água do solo e fornecer um habitat benéfico para a colonização microbiana (KIM et al., 2013). Apresenta elevada área superficial específica e, conseqüentemente, alta porosidade, podendo aumentar significativamente a capacidade de retenção de água e aumento na porosidade total do solo (IBRAHIM et al., 2013; FOGAÇA, 2019). Promove a melhoria nas propriedades químicas do solo, através do enriquecimento de C, N, P e K, e expressiva proliferação da biomassa microbiana (PURAKAYASTHA, 2015; SILVA, 2016).

A grande variedade de biomassa e condições utilizadas na produção do biochar resulta em produtos com características muito variáveis. Além disso, sua recente utilização na agricultura apresenta uma série de requisitos e desafios. Entretanto a especificidade na produção do biochar oferece a possibilidade de produzir e testar uma grande variedade de biomassas e

avaliar a sua adequação para aplicação em diferentes condições ambientais, cenários econômicos e agrícolas (MASEK et al., 2013).

#### **2.4.4 Biochar de lodo de ETE**

Nas últimas décadas, houve uma grande mudança na forma como o lodo é descartado. A partir de 1998, a legislação europeia proíbe a eliminação de lodos no ambiente marinho, e prevê que os depósitos de lodos em aterros serão eliminados. O uso agrícola tornou-se o principal método de disposição: 37% do lodo produzido está sendo utilizado na agricultura, 11% está sendo incinerado, 40% é aterrado enquanto 12% é usado em algumas outras áreas. As últimas tendências no campo de gerenciamento de lodo, como a combustão, oxidação úmida, pirólise, gaseificação e combustão de lodo, geraram interesse científico significativo (FYTILI; ZABANIOTOU, 2008).

A transformação térmica do lodo, além de proporcionar vantagens na redução dos custos com o volume e o transporte de resíduos, remove patógenos do lodo e viabiliza a aplicação no solo (MENDEZ et al., 2012). Assim como para biochars obtidos de outras matérias-primas, o biochar de lodo promove melhorias na estrutura e na qualidade do solo, aumento da produção agrícola e fixação de C, devido à sua maior estabilidade química (LEHMANN, 2009; LAIRD et al., 2010; PAZ-FERREIRO et al., 2012).

Deenik e Cooney (2016), demonstraram contribuições diretas de nutrientes essenciais no solo (P, Ca, Mg, K) com a utilização do biochar de lodo de esgoto, tendo efeitos prolongados para três ciclos de produção de milho, aumentos expressivos no crescimento das plantas e nenhum aumento no acúmulo de metais pesados na biomassa das culturas.

No Brasil, a produção de biochar é incipiente e os processos de pirólise para esse fim não são amplamente aplicados no mercado. Há poucos estudos que realizam uma avaliação abrangente dos custos no ciclo de vida do sistema energético baseado em biochar e que considere cada etapa do ciclo de produção e uso (MARCELINO et al., 2020).

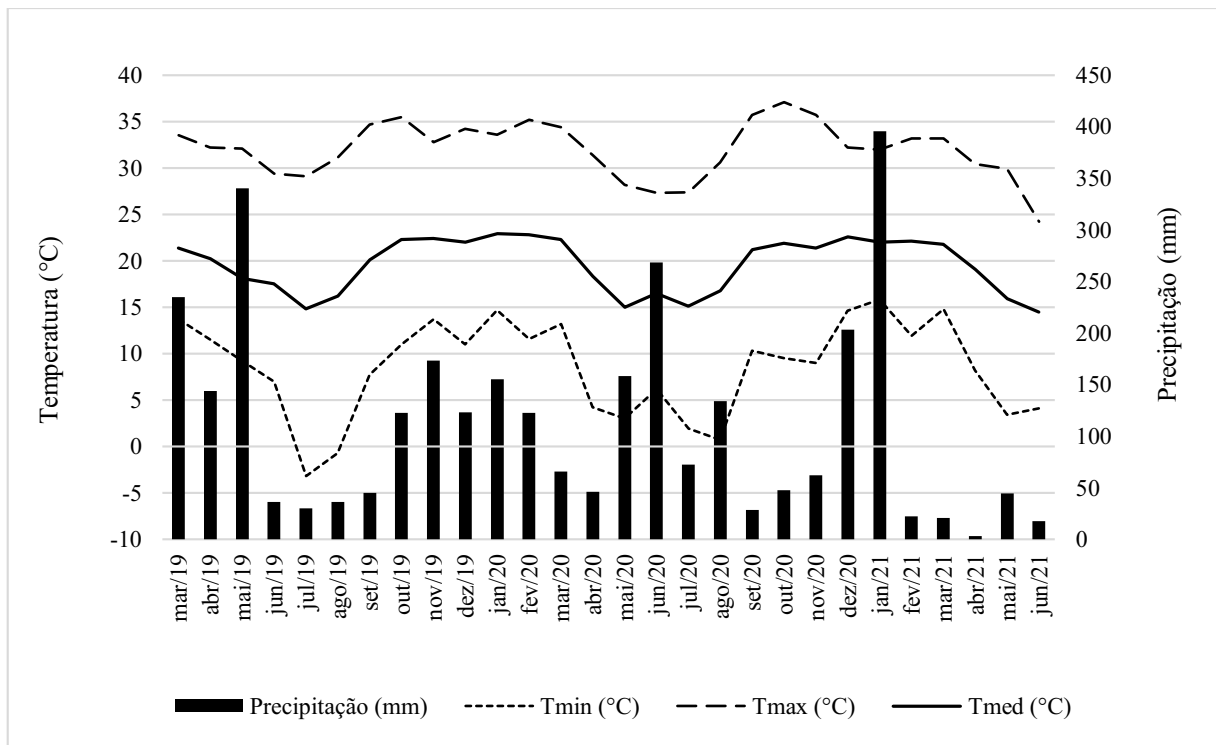
### 3. MATERIAL E MÉTODOS

#### 3.1 LOCALIZAÇÃO E CARACTERÍSTICAS DA ÁREA EXPERIMENTAL

O experimento de campo foi conduzido no período entre abril de 2019 e maio de 2021, na área experimental da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), Campus Pato Branco, localizado na Mesorregião Sudoeste Paranaense, sob coordenadas geográficas 26°10'35" S e 52°41'25" W.

O clima é classificado como subtropical úmido do tipo (Cfa), conforme classificação de Köppen, com temperatura média no mês mais frio abaixo de 18 °C e acima de 22 °C no mês mais quente, com verões relativamente quentes, geadas pouco frequentes e tendência de concentração das chuvas nos meses de verão, mas sem estação seca definida. O relevo é suave ondulado com 4% de declividade e o solo caracterizado como Latossolo Vermelho distrófico (EMBRAPA, 2013), textura muito argilosa (750 g kg<sup>-1</sup> de argila). Os dados referentes à temperatura e precipitação pluviométrica, ao longo do período de condução do experimento, estão apresentados na Figura 3.

**Figura 3. Temperatura mínima, média e máxima do ar e precipitação pluviométrica, referente ao período de condução do experimento (março 2019 a junho 2021).**



Fonte: Dados SIMEPAR (2022)

Anteriormente à implantação do experimento a área estava sendo cultivada com milho. A amostragem inicial do solo, para a caracterização química, foi realizada retirando amostras aleatórias na área do experimento, nas profundidades de 0 - 5, 5 - 10 e 10 - 20 cm, respectivamente, e homogêneas, resultando em amostras representativas para cada profundidade (Tabela 5).

**Tabela 5. Características químicas do solo da área experimental, antes do início do experimento. UTFPR, Pato Branco, 2019.**

Profundidade (cm)	MO	pH	P	Ca	Ca+Mg	K	Al	CTC	V
	(g dm <sup>-3</sup> )	(CaCl <sub>2</sub> )	(mg dm <sup>-3</sup> )			(cmolc dm <sup>-3</sup> )			(%)
0-5	41,85	5,3	3,23	5,38	8,26	0,30	0	13,52	63,31
5-10	38,11	5,3	1,55	4,9	7,59	0,18	0	13,12	44,4
10-20	37,91	5,2	1,26	4,55	7,50	0,10	0	12,95	58,69

Metodologias: MO: matéria orgânica (Walkley-Black); P e K: fósforo e potássio disponíveis (Mehlich-1); Ca, Mg e Al: cálcio, magnésio e alumínio trocáveis (KCl); CTC: capacidade de troca de cátions (pH 7,0); V%: saturação por bases; pH (CaCl<sub>2</sub> 0,01).

Não foram realizadas correções de solo ou calagem na área antes do início do experimento, uma vez que a mesma atendeu aos critérios indicados no NEPAR-SBCS (2019), para as culturas escolhidas (aveia preta, soja e milho).

### 3.2 ORIGEM DO LODO

Para o desenvolvimento desta pesquisa, o lodo foi coletado de uma ETE de um abatedouro de aves no Sudoeste do estado do Paraná, Brasil, sob coordenadas 26°10'54" S e 52°42'22" W. O abatedouro é licenciado para abater até 170 mil aves por dia (frango de corte), em dois turnos de abate. As coletas foram realizadas sempre nas terças-feiras pela manhã, e o material imediatamente utilizado, afim de minimizar os efeitos da degradação e manter suas características.

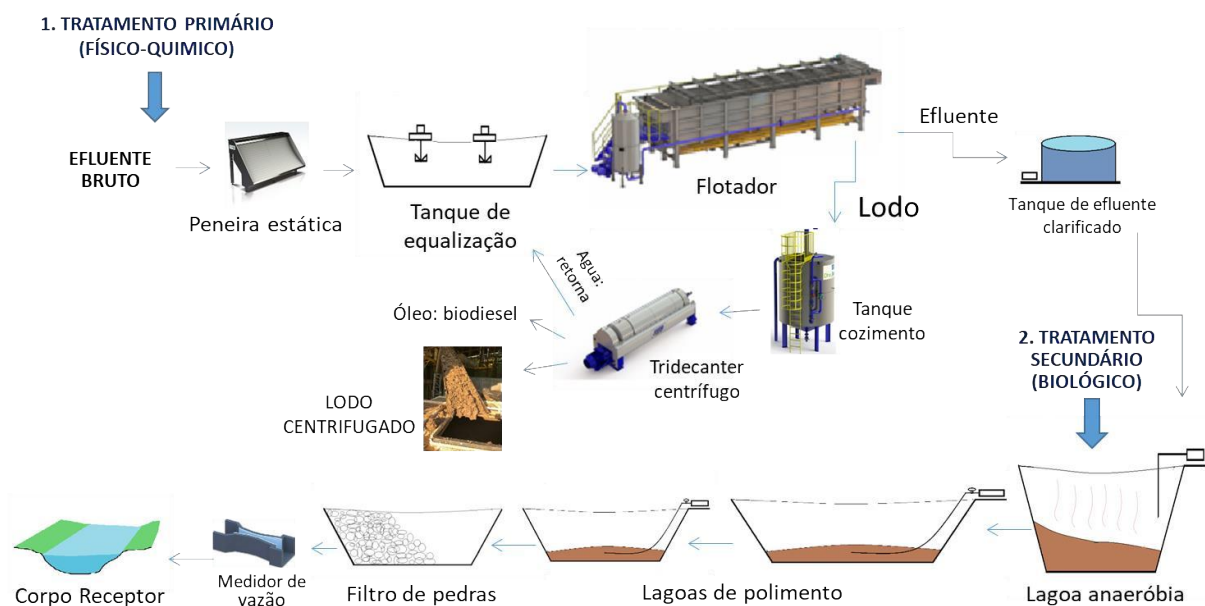
#### 3.2.1 Processo de geração, cozimento e desidratação do lodo

O tratamento primário conta com peneira estática, tanque de equalização e flotor físico-químico, e o secundário com lagoas de estabilização biológica (anaeróbia, aeração, decantação, polimento e filtro de pedras).

Os efluentes resultantes do processo industrial são recolhidos por meio de calhas e conduzidos até o setor de subprodutos, onde passam por peneiras rotativas e estáticas, que fazem a remoção do material grosseiro, o qual será utilizado na fabricação de farinhas (farinha de ossos e farinha de penas e sangue) utilizadas em ração animal. O efluente bruto segue para o tanque de equalização para homogeneização por um período de aproximadamente 4 horas e em seguida é direcionado para o flotador. O flotador é o equipamento responsável pela remoção do lodo do efluente, com capacidade para tratamento até 200 m<sup>3</sup> de efluente por hora. O lodo é o produto resultante da remoção de gorduras e sólidos suspensos do efluente por meio da coagulação e floculação com a adição de produtos químicos (cloreto férrico e polímero aniônico) e ação física das micro bolhas de ar, injetadas pelo vaso aerador.

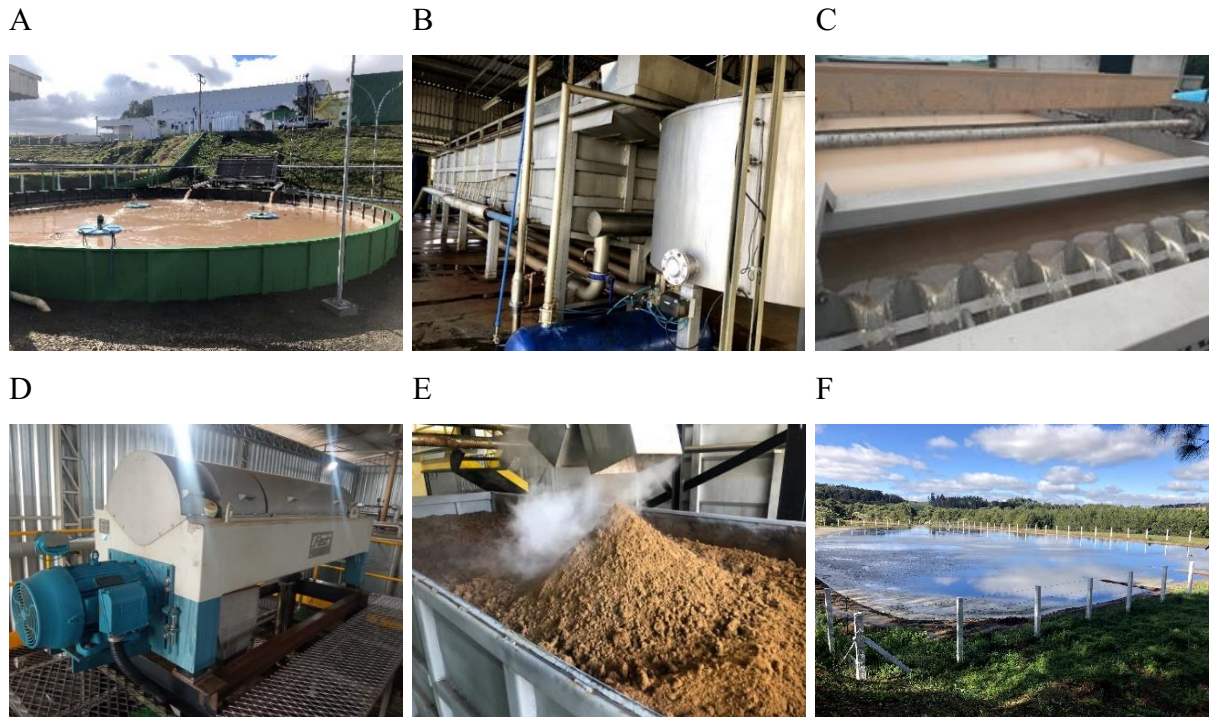
O lodo gerado no flotador segue para cozimento e desidratação e o efluente líquido, para o tratamento secundário nas lagoas de estabilização. O cozimento do lodo é realizado à 95 °C durante 1 hora, o qual promove a redução de patógenos e de atratividade de vetores, e em seguida é encaminhado para desidratação em tridecanter centrífugo, separando o material nas fases óleo, água e sólido. O óleo é vendido para indústria para transformação em biodiesel. A água clarificada retorna para o tanque de equalização e passar novamente pelo tratamento. O sólido (lodo) poderá ser descartado em aterro industrial classe II ou encaminhado para compostagem, mediante critérios específicos. Nesta fase o lodo apresenta redução no teor de umidade para 55-65%, e não apresenta odor característico (Figuras 4 e 5).

**Figura 4. Rota de produção do lodo de ETE.**



**Fonte: A autora (2022)**

**Figura 5. Etapas de tratamento do efluente: Peneira estática e tanque de equalização (A); Flotador e tanque de lodo (B); Saída do efluente líquido do flotador (C); Tridecanter centrífugo do lodo (D); Lodo armazenado após desidratação (E); Lagoas para tratamento secundário do efluente líquido (F). Pato Branco - PR.**



**Fonte: A autora (2022)**

A vazão média diária de tratamento é de aproximadamente 2800 m<sup>3</sup> de efluentes. O lodo removido no flotador corresponde apenas ao tratamento dos efluentes da indústria, e corresponde a cerca de 3 a 4% do volume tratado.

Quanto ao esgoto sanitário da unidade industrial em questão, a maior parte é incorporada diretamente ao sistema secundário (lagoas), e outra parte passa por filtro biológico e sumidouro, não passando pelo flotador. Como resultado, o lodo da indústria é isento de fração sanitária. A geração de lodo gira em torno de 70 t dia<sup>-1</sup>, sendo que a desidratação e secagem reduzem esse montante para 10 t dia<sup>-1</sup>.

### **3.2.2 Cinzas vegetais de caldeira**

Como complemento à aplicação de lodo ao solo, foram utilizados resíduos de cinzas vegetais originadas do processo de queima de cavaco de eucalipto na caldeira da agroindústria. As cinzas foram utilizadas como um produto de calagem, uma vez que auxiliam a reduzir a

acidez do solo e pode representar mais um resíduo da agroindústria com potencial para utilização agrícola. Ambos os materiais, lodo e cinzas, foram fornecidos pela mesma empresa e caracterizados antes do início do experimento, conforme metodologia descrita na sequência.

### 3.3 CARACTERIZAÇÃO E CLASSIFICAÇÃO DO LODO

#### 3.3.1 Caracterização agronômica

As análises para caracterização agronômica do lodo de ETE foram realizadas no Laboratório de Tecido Vegetal e Resíduos Orgânicos da UTFPR, campus Pato Branco, utilizando amostras de lodo centrifugado e seco (20% de umidade). As características agronômicas das cinzas vegetais também foram analisadas, sendo as amostras recolhidas da saída da caldeira na fornalha do abatedouro de aves. Foram utilizados como referência para as análises, o Manual de métodos analíticos oficiais para fertilizantes e corretivos - Edição 2017 – MAPA. Os parâmetros analisados foram: N, P, K, Ca, B, Mg, C, relação C/N, S, Fe, pH, MO e teor de umidade (%). A metodologia de referência foi o Manual de Métodos Analíticos Oficiais para Fertilizantes e Corretivos- Edição 2017 – MAPA.

#### 3.3.2 Classificação NBR 10004/2004

Para a classificação do resíduo de lodo de ETE, conforme NBR 10004 (BRASIL, 2004), amostras de lodo centrifugado foram coletados em frascos plásticos, vedados e identificados e enviadas para laboratório externo credenciado, onde foram analisados os parâmetros conforme exigido em cada legislação. Foram realizados por meio da análise dos parâmetros da Tabela 6.



**Tabela 6. Parâmetros analisados do lodo de ETE, para fins de classificação conforme NBR 10004/2004.**

<b>Lodo de ETE</b>	<b>Parâmetros</b>
Massa bruta	pH (Suspensão 1:1); Sulfeto (como H <sub>2</sub> S); Porcentagem de Sólidos; Cianeto (como HCN).
Extrato lixiviado inorgânicos	As, Ba, Cd, Pb, Cr, Hg, P, Se, Prata (Ag) e Fluoreto
Extrato lixiviado orgânico	1,1-Dicloroetano; 1,2-Dicloroetano; 1,4-Diclorobenzeno; Benzeno; Cloreto de Vinila; Clorobenzeno; Clorofórmio; Piridina; Tetracloroeto de C; Tetracloroetano; Toxafeno; Tricloroetano; Metiletilcetona; Dibromofluorometano; p-Bromofluorbenzeno
Lixiviado	Tempo de Lixiviação; Solução de Extração; pH Final
Extrato Solubilizado Inorgânico	Ag, Al, As, Ba, Cd, Pb, Cu, Cr, Fe, Mn, Hg, Se, Zn, Cloreto, Cianeto, Fluoreto, Índice de Fenóis, Nitrato (como N), Sódio (Na), Sulfato, Surfactante (como LAS)
Extrato Solubilizado Orgânico	2,4,5-T; 2,4,5-TP; 2,4-D; Aldrin + Dieldrin; Clordano (isômeros); DDT (isômeros); Endrin; Hexaclorobenzeno; Metoxicloro; Toxafeno; Heptacloro e Heptacloro Epóxido; Lindano (g-HCH).
Solubilizado	pH Final do Solubilizado; Mercúrio Total – Água; Metais Totais – Água: Ag, Al, Ar, Ba, Cd, Cr, Co, Cu, Fe, Li, Na, Mn, Se, Sr, Zn, Itrio (Y)
Contaminantes orgânicos voláteis (VOCs) - água	1,1-Dicloroetano; 1,2-Dicloroetano; 1,4-Diclorobenzeno; Benzeno; Cloreto de Vinila; Clorobenzeno; Clorofórmio; Tetracloroeto de C; Tetracloroetano; Tricloroetano; Tolueno; Clorobenzeno; Dibromofluorometano; p-Bromofluorbenzeno

As metodologias utilizadas pelo laboratório foram baseadas “SW 846 (USEPA 1986, Test Method for Evaluating Solid Waste Report Number 846, Washington, DC” e as normas de referências:

- Norma NBR 10004:2004 da ABNT - Classificação de Resíduos Sólidos
- Norma NBR 10006:2004 da ABNT - Procedimento para obtenção de extrato solubilizado de resíduos sólidos - Ensaio de Solubilização
- Norma NBR 10005:2004 da ABNT - Procedimento para obtenção de extrato lixiviado de resíduos sólido - Ensaio de Lixiviação

As determinações sobre os extratos do Solubilizado e Lixiviado foram realizadas com base nos seguintes métodos: Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater – 22th, Edition – 2012, e as análises, pelos métodos analíticos: Fluoreto: SMWW 4500 F- D; Sólidos Totais: POP PA 058 Rev.02; Cianetos: POP PA 060 / SMEWW 4500 CN F, EPA 9010 C, EPA 9013; pH: POP PA 056 / USEPA 9045 D; SVOC: USEPA 8270D e 3510C, SMEWW 6410B; Mercúrio: EPA 245.7:2005; VOC - Água: USEPA 8260C, 5021A; Ânions: EPA 300.0:1993; 300.1:1999 e POP PA 032 - Rev. 08; Surfactantes: SMEWW 5540 C; Lixiviação: POP PA 062 / ABNT NBR 10005:2004; Solubilização: POP PA 053 / ABNT NBR 10006:2004; Toxafeno: POP PA 093 / USEPA 505; Índice de Fenóis: ISO 14402:1999; Metais (ICP-OES): Determinação: SMWW 3120 B / Preparo: EPA 3010A:1992; Cianeto (CFA): ISO 14403:2012; Sulfeto: POP PA 065 / USEPA 9030, 9034.

A observação dos parâmetros para a classificação do lodo, foi realizada conforme NBR 10004 (BRASIL, 2004): Avaliação da Corrosividade - Item "a" do tópico 4.2.1.2 (massa bruta); Avaliação da reatividade - Item "e" do tópico 4.2.1.3 (massa bruta); Avaliação da toxicidade - Item "a" do tópico 4.2.1.4 (lixiviado).

### **3.3.3. Classificação - Resolução CONAMA 498/2020**

Para atendimento da Resolução CONAMA 498 (BRASIL, 2020), foram realizadas análises químicas para os parâmetros e métodos de referência: As, Ba, Cd, Pb, Cr, Hg, Se – EPA 3050 B; Cu e Zn – Manual de Métodos Analíticos Oficiais para Fertilizantes e Corretivos- Edição 2017 – MAPA. Os parâmetros microbiológicos analisados foram contagem de *C. termotolerantes* (UFC g<sup>-1</sup>) (metodologia: ALPHA-2012), em atendimento às exigências limite de *Escherichia Coli* da Resolução CONAMA 498 (BRASIL, 2020), uma vez que este grupo está contido no grupo dos *C. Termotolerantes*, e também Ovos de Helminto (ovo g<sup>-1</sup> de ST). Os resultados foram confrontados com os limites preconizados na referida resolução. Foram realizadas também análises microbiológicas complementares com a pesquisa de *Salmonella spp* (UFC 100 mL<sup>-1</sup>) (metodologia: ISSO – 19250:2010) e Vírus Entéricos (Enterovírus), metodologia: SMWW 23ª edição, método 9510 B, C, F e G / PR-Tb MB 107.

### **3.3.4 Classificação conforme IN nº 61/2020- MAPA**

Para verificar o enquadramento do lodo, como matéria-prima ou possível fertilizantes, conforme IN nº 61- MAPA (BRASIL, 2020), foi verificado o atendimento aos teores mínimos

para macro e micronutrientes por meio das seguintes análises: N, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, K<sub>2</sub>O, Ca, Mg, S, B, Cu, Fe, Mn, Se, Zn. Os resultados foram confrontados com a referida legislação.

### 3.4 DETERMINAÇÃO DAS DOSES

As doses de lodo aplicadas foram definidas conforme a produtividade esperada da cultura de interesse principal (soja) e o resultado da análise prévia do resíduo (lodo) quanto aos teores de N, P e K, o que permitiu otimizar a aplicação para aproveitamento máximo dos nutrientes pelas culturas em sucessão, com base no NEPAR-SBCS (2019).

Para o Estado do Paraná, a recomendação de quantidade de N para as culturas utilizadas neste estudo, estão apresentadas na Tabela 7.

**Tabela 7. Recomendação de N, P e K pela produção das culturas.**

<b>Culturas</b>	<b>Produção</b> (t ha <sup>-1</sup> )	<b>N</b> (kg ha <sup>-1</sup> )	<b>P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>*</b> (kg ha <sup>-1</sup> )	<b>K<sub>2</sub>O</b> (kg ha <sup>-1</sup> )
Aveia preta	6	150	40	50
Soja	4	264**	120	90
Milheto	10	151	51	56

\*A análise de solo indicou que o P é muito baixo e K é médio apenas na média na camada de 0-20 cm, nas demais é considerado médio. \*\*Recomendação de N realizada com base na extração da cultura. Fonte: NEPAR-SBCS, 2019 (adaptado).

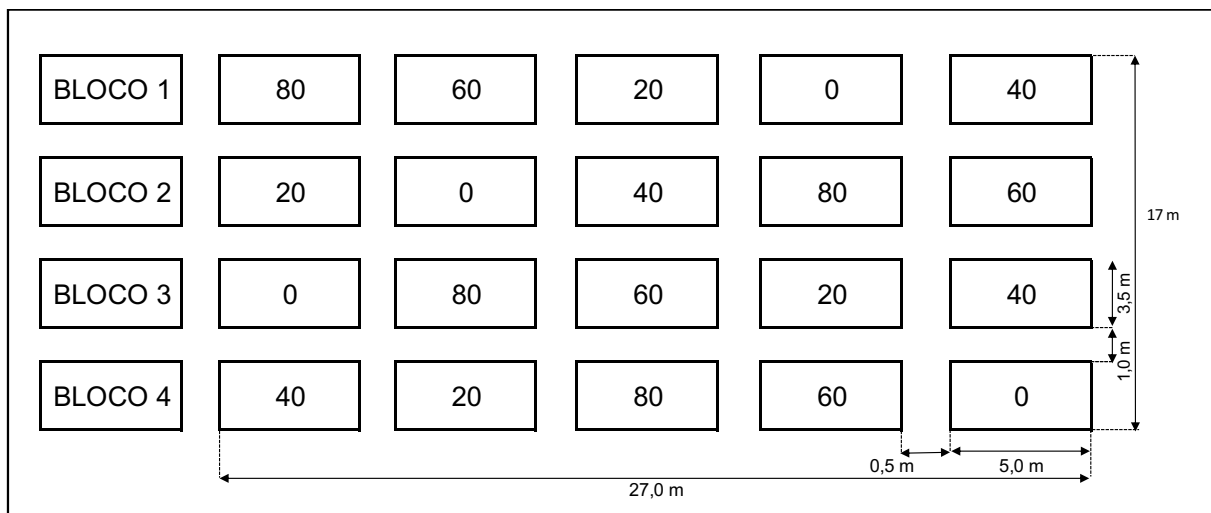
Conforme indicado na Tabela 7, para uma produção esperada em t ha<sup>-1</sup> de cada cultura, serão necessária uma quantidade determinada de N, P e K. No entanto, por tratar-se de adubação orgânica, não há como recomendar doses separadas desses elementos. O cálculo da aplicação foi calculada com base no teor de N, utilizando critérios de expectativa de produtividade e extração do elemento pela cultura, visando atender um dos princípios da conservação do solo que é a manutenção da sua fertilidade após a extração de nutrientes pelas culturas, como normalmente é utilizado.

Considerando o teor de N encontrado no lodo (6,86%), e a recomendação de N realizada com base na extração da cultura, para uma expectativa de 4 t ha<sup>-1</sup>, o que equivale a 264 kg ha<sup>-1</sup> de N, isso corresponderia a uma dose de aproximadamente 31 t ha<sup>-1</sup> de lodo, e com base nos cálculos realizados para resíduos orgânicos, conforme NEPAR-SBCS (2019), foram determinadas as seguintes doses para o experimento: 0, 20, 40, 60 e 80 t ha<sup>-1</sup>.

### 3.5 DELINEAMENTO EXPERIMENTAL, TRATAMENTOS E AVALIAÇÕES

O experimento de campo foi disposto em delineamento de blocos casualizados, com cinco tratamentos e quatro repetições. Os tratamentos foram doses de lodo de ETE centrifugado (65% de umidade), equivalentes a 0, 20, 40, 60 e 80 t ha<sup>-1</sup>. As parcelas experimentais, totalizando 20 unidades (Figura 6), foram dimensionadas cada uma com área total de 17,5 m<sup>2</sup> (5,0 x 3,5 m).

**Figura 6. Esquema de delineamento experimental para o experimento de campo para as doses 0, 20, 40, 60 e 80 t ha<sup>-1</sup>.**



Fonte: A autora (2022)

Utilizou-se um esquema de sucessão de culturas durante dois anos agrícolas, 2019/2020 e 2020/2021, com os cultivos de aveia preta (*Avena strigosa* Schreb) (Embrapa 139) solteira, soja (*Glycine max* (L) Merrill) e milheto (*Pennisetum glaucum* (L.)).

O preparo inicial do solo foi realizado com uma subsolagem. As doses de lodo foram aplicadas sobre a superfície do solo e incorporadas de forma manual na camada de 0 a 5 cm com uso da enxada e rastelo. Após 5 dias, o material foi incorporado de forma mecânica com uso do arado acoplado ao trator. No segundo ano agrícola, as doses de lodo foram aplicadas à lança nas parcelas, após o manejo da palhada de milheto.

**Figura 7. Aplicação inicial do lodo de ETE. Pato Branco - PR.**



**Fonte: A autora (2019-2020)**

Duas semanas após a aplicação dos resíduos, na data de 07/06/2019 foi realizada a primeira semeadura da aveia preta, como planta de cobertura de inverno, na densidade de 80 kg ha<sup>-1</sup>. Após 96 dias do plantio, na fase de pleno florescimento, foram realizadas as coletas das amostras de plantas.

Foram determinadas a produção de matéria seca (MS) da parte aérea das plantas. Para isso, duas amostras por parcela foram obtidas com auxílio de um quadro de 0,5 x 0,5 m, onde as plantas foram cortadas rente ao solo, condicionadas em saco plástico e pesadas para obtenção de MF. Após o material foi acondicionado em sacos de papel e, colocada em estufa de circulação forçada de ar a 60 °C, até massa constante, e em seguida pesada para a determinação da MS.

A aveia remanescente foi dessecada utilizados os seguintes produtos: Selecta, Glifosato (2,5 L ha<sup>-1</sup> de dose) + LORD – Cletodim (0,8 L ha<sup>-1</sup>) + 0,6% do volume de calda de óleo mineral. Volume da calda = 150 L ha<sup>-1</sup>. Sob a aveia dessecada para incorporação do material não coletado, foi utilizado o implemento rolo-facas da marca Agrimec®, modelo RF1300 com 16 facas e 1,3 m de largura de trabalho.

**Figura 8. Fases do ciclo da aveia preta: Plantio (A); Germinação (B); Pleno florescimento (C); Pato Branco - PR.**



Fonte: A autora (2019-2020)

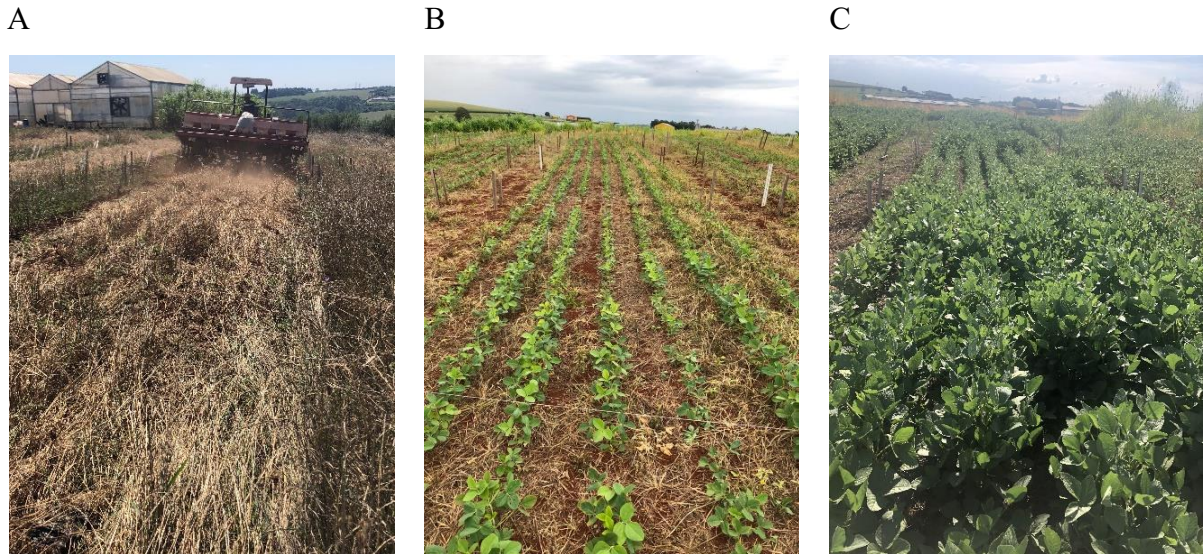
Após o manejo da aveia, em 24/10/2019, foram aplicadas as cinzas de caldeira na área total na dose de  $3 \text{ t ha}^{-1}$ , afim de promover um incremento de potássio para o enriquecimento do solo e crescimento das culturas seguintes. As cinzas foram coletadas diretamente na saída da fornalha da caldeira da agroindústria, peneiradas e pesadas. A aplicação foi realizada manualmente à lanço. Sobre a palhada da aveia, foram implantadas as culturas da soja e posteriormente o milho.

As sementes de soja, Cultivar TMG 7262, foram inoculadas com cepas de bactérias fixadores de N: *Bradyrhizobium japonicum*, estirpes: Semia 5079 e 5080, concentração de  $5,0 \times 10 \text{ UFC MI}^{-1}$ , e plantada utilizando a densidade de 11 sementes por metro, e espaçamento 0,45 m, com o implemento plantadeira acoplado ao trator. O peso médio de mil grãos da cultivar é 194 g para a região sul (TMG – Site). O plantio foi realizado em 25/10/2019 e posteriormente foram realizados os seguintes tratos culturais:

- Após 50 dias do plantio, controle químico com a aplicação de calda  $150 \text{ L ha}^{-1}$ , Connect  $1 \text{ L ha}^{-1}$  (para o percevejo da soja), Fox  $0,4 \text{ L ha}^{-1}$  (fungicida), Shadow  $2,5 \text{ L ha}^{-1}$  (herbicida sistêmico);
- Após 70 dias do plantio, aplicação de calda  $150 \text{ L ha}^{-1}$ , Connect  $1 \text{ L ha}^{-1}$ , Fox  $0,4 \text{ L ha}^{-1}$ , Adesil 0,5% (espalhante adesivo) do volume da calda;
- Após 90 dias do plantio, aplicação de inseticida para controle da vaquinha: calda volume  $150 \text{ L ha}^{-1}$ : Acefato  $1 \text{ kg ha}^{-1}$ , Grap oil 0,4% do volume da calda (Tratamento inseticida);
- Após 100 dias do plantio, aplicação de tratamento fungicida e inseticida para lagarta: calda volume  $150 \text{ L ha}^{-1}$  (Rimom  $0,25 \text{ L ha}^{-1}$ , Ampligo  $0,2 \text{ L ha}^{-1}$  e Ativum  $1,25 \text{ L ha}^{-1}$ ), um fisiológico e um de contato e ingestão;

- Após 130 dias do plantio, complementação com a aplicação de calda volume 150 L ha<sup>-1</sup>: Ativum 1,2 L ha<sup>-1</sup>, Engeo Pleno 0,2 L ha<sup>-1</sup>, Adesil 0,3% do volume da calda.

**Figura 9. Rolagem da aveia (A) e fases do plantio da soja (B e C). Pato Branco - PR.**



**Fonte: A autora (2019-2020)**

Após 134 dias do plantio da soja, foram realizadas as coletas de 10 plantas por parcela, nas 3 linhas centrais, para as avaliações agronômicas e de rendimento: altura de planta (AP), diâmetro de colmo (DC), número de vagens (NV) e produtividade de grãos (PROD). AP foi determinada em cm, adotando-se, como critério, a distância entre o colo da planta e a extremidade do broto terminal do ramo principal; DC foi determinado medindo no caule da planta a 2,5 cm acima da superfície do solo utilizando paquímetro digital graduado; NV foi avaliado contando as vagens de 10 plantas escolhidas de forma aleatória no centro da parcela e PROD foi avaliada por meio do número de grãos e peso médio de grãos.

Logo após a colheita da soja foi realizada semeadura de uma cobertura de verão com milho na data de 10/03/2020, na densidade de 35 kg ha<sup>-1</sup> de sementes, sendo utilizada a variedade de polinização aberta ‘Catarina’. As avaliações do milho foram avaliadas após 75 dias da sua semeadura, onde foi avaliada a fileira central de cada parcela desconsiderando as primeiras e as últimas plantas de cada fileira. Duas amostras por parcela foram obtidas com auxílio de um quadro de 0,5 x 0,5 m. Foram determinadas a produção de MF e MS da parte aérea das plantas, as quais foram cortadas rente ao solo, condicionadas em saco plástico e pesadas para obtenção de MF. Após o material foi acondicionado em sacos de papel e, colocada em estufa de circulação forçada a 60 °C, até massa constante, e em seguida pesada para a determinação da MS.

No segundo ano foram repetidos os procedimentos, com a reaplicação do lodo de ETE no solo, realizada na data de 20/05/2020 e iniciado novo ciclo para as 3 culturas em sucessão, sendo os plantios realizados nas datas de 03/06/2020, 25/09/2020 e 18/03/2021, para a aveia, soja e milho, respectivamente, e as coletas de plantas em 07/08/2020, 08/03/2021 e 30/06/2021, para cada cultura, conforme metodologia do ano anterior.

Ocorreu uma variação na densidade da aveia preta no segundo ano de plantio, passando de 80 kg ha<sup>-1</sup> no primeiro ano para 160 kg ha<sup>-1</sup> no segundo ano de plantio. O fato ocorreu devido a necessidade de realização de um sobre plantio, devido à baixa germinação no plantio inicial. Assim sendo, aplicou-se o dobro da densidade semeada no segundo ano em todos os tratamentos.

No final de cada ano agrícola, as coletas de solo foram realizadas em dois pontos dentro de cada parcela, nas 3 profundidades: 0 a 5 cm, 5 a 10 cm, 10 a 20 cm. Para as análises químicas, foram coletados aproximadamente 500 g de solo em cada profundidade, peneirados e transferidos para sacos plásticos identificados. As coletas de solo foram realizadas nos períodos T1= fim do primeiro ano agrícola, T2 = fim do segundo ano agrícola.

Para a caracterização e comparação dos atributos químicos dos solos após a implantação do experimento, foram realizadas análises dos seguintes parâmetros: MO, P, pH (CaCl<sub>2</sub>), Al, Mg, Ca, K, SB, V, CTC (EMBRAPA, 1997, 2009). As análises em T1 e T2, foram realizadas no Laboratório de Química e Fertilidade do Solo (LABSOLOS) da UTFPR Campus de Pato Branco.

### 3.6 PRODUÇÃO DO BIOCHAR

Foram realizados testes para verificar a possibilidade de produção de um biochar a partir do lodo de ETE. Amostras de lodo foram coletadas na ETE no abatedouro de aves, no mesmo ponto de coleta para o experimento de campo (lodo centrifugado) e encaminhadas no mesmo dia para o laboratório de Química da UTFPR, Campus Pato Branco. Os testes foram realizados no período de junho a dezembro de 2021.

A produção do biochar foi realizada em forno mufla, utilizando recipientes de alumínio com tampa. Foram realizados testes preliminares para ajuste da relação tempo/temperatura, para a obtenção de um material com as características e rendimento mais adequado. Na mufla, foi estabelecida uma taxa de aumento de temperatura de 10 °C min<sup>-1</sup>, totalizando 35, 40, 50 e 55 minutos para atingir de 350, 400, 450, 500 e 550 °C, respectivamente, e tempo de residência de 60 minutos. Os recipientes de alumínio foram adaptados ao espaço interno da mufla que contém



um sistema de saída de gases e bio-óleo, com mecanismo para evitar o fluxo de oxigênio, além de um termostato digital para o controle de temperatura (Figura 10).

**Figura 10. Produção do biochar em mufla – UTFPR Campus Pato Branco.**



**Fonte: A autora (2021)**

Após a pirólise do lodo, o biochar resultante foi deixado para resfriamento e as amostras foram pesadas para obtenção do rendimento. Em seguida foram maceradas com almofariz de ágata e passadas em peneira com malha de 0,5 mm e acondicionada em recipientes plásticos com tampa para posterior análise química.

### 3.7 CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA E CLASSIFICAÇÃO DO BIOCHAR

Para o biochar produzido sob a melhor temperatura de pirólise selecionada, foram realizadas análises químicas para verificar o atendimento à legislação e posterior classificação.

Foram analisadas características agronômicas: teores de N, P, K, Ca, B, Mg, C, relação C/N, S, Fe, pH, Mo e teor de umidade. Para atendimento à Resolução CONAMA 498 (BRASIL, 2020), foram analisados os níveis de As, Ba, Cd, Pb, Cr, Hg, Se – metodologia EPA 3050 B; Cu e Zn – Manual de Métodos Analíticos Oficiais para Fertilizantes e Corretivos- Edição 2017 – MAPA. Não foram realizadas análises microbiológicas, uma vez que o material de origem (lodo) não apresentou contaminantes desta natureza. Os resultados foram confrontados com os limites preconizados na referida resolução.

A classificação do biochar foi realizada conforme a Resolução CONAMA N° 498 (BRASIL, 2020), IN n° 61- MAPA (BRASIL, 2020), conforme parâmetros já analisados para o lodo e European Biochar Certificate (EBC, 2015) e International Biochar Initiative (IBI, 2015).

### 3.8 ANÁLISE ESTATÍSTICA

Para o experimento de campo, os dados foram analisados por meio de análise de variância (ANOVA) utilizando o programa estatístico GENES®, e após realizado o estudo de regressão polinomial. As médias foram avaliadas pelo teste F a 1% de probabilidade. Como análises complementares para os fatores isolados, foram gerados gráficos de regressão para as doses de lodo (quantitativo) e teste F de comparação de médias para o fator ano de cultivo (qualitativo).

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 CARACTERIZAÇÃO E CLASSIFICAÇÃO DO LODO

Os resultados da análise química das características agronômicas do lodo centrifugado de ETE e cinzas vegetais, foram considerados satisfatórios para utilização agrícola (Tabela 8).

**Tabela 8. Características agronômicas do resíduo orgânico de lodo de ETE e da cinza vegetal. UTFPR, Pato Branco – PR, 2019**

<b>Parâmetros</b>	<b>Lodo de ETE</b>	<b>Cinza Vegetal</b>
N (%)	6,86	0,29
P (%)	3,21	0,17
K (%)	0,06	1,68
Ca (%)	0,29	1,96
B (%)	0,01	-
Mg (%)	0,02	0,52
C (%)	40,80	-
Relação C/N	5,9	-
S (%)	0,55	-
Fe (%)	2,35	-
pH	5,8	12,18
MO (%)	70,03	-
Teor de umidade (%)	60,31	1,04

\* Métodos de referência: Manual de Métodos Analíticos Oficiais para Fertilizantes e Corretivos- Edição 2017 – MAPA. ( $n=1$ )

Os teores de N e P foram inferiores aos obtidos por Niedzialkoski et al. (2019), para lodo de ETE de abatedouro de frangos, os quais foram 49,4% e 7,8%, respectivamente, enquanto K e relação C/N tiveram valores muito próximos. Em comparação com outros resíduos analisados por estes mesmos autores (podas de árvores, resíduos de incubatório, tripas de salsichas, entre outros) o lodo de ETE foi o que apresentou o mais elevado teor de N.

Quando comparados com outros resíduos normalmente utilizados na agricultura, os teores de N e P encontrados no lodo de ETE, foram superiores aos encontrados na literatura para cama de frango de corte (1,7%), esterco bovino (2,25 %) e lodo de esgoto (1,38 %)

(NEPAR-SBCS, 2019). No entanto os teores de K, Ca e Mg, são considerados baixos, quando comparados com outros resíduos orgânicos. Já as cinzas apresentaram teores mais elevados de Ca, K e Mg, que o lodo, e portanto, sua aplicação complementar no solo, pode representar um papel importante.

As características dos lodos dependem diretamente das características do efluente tratado e desta forma podem variar bastante. Também tem interferência o tipo de tratamento, produtos utilizados e a própria operação da ETE. Assim, é esperado que haja diferença entre os resultados de caracterização de lodos de diferentes ETE, bem como diferenças entre amostras dentro da própria estação. Nos abatedouros, as características do efluente tratado variam ao longo do dia ou da semana, dependendo da dinâmica da produção, qualidade da matéria-prima, higienização entre outros fatores, o que pode explicar a variação mais expressiva em alguns parâmetros do lodo analisado.

A primeira classificação do resíduo de lodo foi realizada conforme a NBR 10004/2004 (ABNT, 2004) (Classificação dos Resíduos Sólidos), em laboratório especializado, o qual evidenciou sob base de dados de análises qualitativas e quantitativas, que o resíduo é de Classe II-A (não perigoso, não inerte). O lodo da ETE não apresentou características de inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade ou patogenicidade nas amostras analisadas, conforme critérios da NBR 10004/2004 (ABNT, 2004).

De acordo com a NBR 10004/2004 (ABNT, 2004), os resíduos são classificados como Classe I (Perigoso) quando um ou mais parâmetros do lixiviado e/ou massa bruta estiverem acima dos valores máximos permitidos. Um resíduo é classificado como Classe II A (Não Inerte) quando um ou mais parâmetros do solubilizado estiverem acima dos valores máximos permitidos e como Classe II B (Inerte) quando todos os parâmetros estiverem abaixo dos valores máximos permitidos pelo Anexo G da NBR 10004/2004 (ABNT, 2004).

A classificação do lodo de ETE como Classe II – não inerte, deve-se ao fato que apesar de todos os resultados para a massa bruta e lixiviados, atenderam os limites permitidos, o lodo possui 3 constituintes que são solubilizados em concentrações superiores aos indicados no anexo G da NBR 10004 (ABNT, 2004). Os parâmetros foram Índice de Fenóis, cujo resultado foi  $1,86 \text{ mg L}^{-1}$  e limite  $0,01 \text{ mg L}^{-1}$ ; Mn, resultado  $0,456 \text{ mg L}^{-1}$  e limite  $0,1 \text{ mg L}^{-1}$ , e principalmente Fe, com resultado de  $77,2 \text{ mg L}^{-1}$ , sendo o limite  $0,3 \text{ mg L}^{-1}$ .

O alto teor de Fe deve-se ao coagulante Cloreto Férrico, que é utilizado no tratamento primário de efluentes no flotor. O produto, juntamente com o floculante (polímero aniônico), promove a aglutinação das partículas de sólido do efluente promovendo a geração do lodo e,

portanto, fica aderido ao lodo flotado. De acordo com a norma, os teores elevados de Fe não caracterizam o material como perigoso.

O Fe é um micronutriente essencial para a manutenção da vida, porém está pouco disponível na maioria dos solos (MARSCHNER et al., 2011). Em plantas, ele está relacionado a diversas atividades metabólicas, participando da formação de algumas enzimas (catalase, peroxidase, citocromo oxidase e xantina oxidase), além de ser indispensável nos processos de respiração, fotossíntese, fixação de N<sub>2</sub> e transferência de elétrons através do ciclismo entre o Fe<sup>2+</sup> e Fe<sup>3+</sup> (MARENCO; LOPES, 2009). TSUTIYA et al (2001), sugere a aplicação de lodos de estação de tratamento de água, que utilizem sulfato de ferro como coagulante para cultivo de plantas cítricas como o limão e a laranja, onde comumente existem deficiências de Fe.

O excesso de Fe, no entanto, pode ser prejudicial às plantas. Sintomas de toxicidade foram observados por Kuki et al. (2009), onde a espécie de restinga *Sophora tomentosa* apresentou raízes cobertas por placas de Fe e tiveram o seu crescimento atrofiado além da presença de manchas avermelhadas. Porém estes sintomas de toxidez variam de planta pra planta, e geralmente estão associados à capacidade do Fe em ser translocado para a parte aérea das plantas (FOY et al., 1978). De acordo com Connolly e Guerrinot (2002), devido a necessidade de controlar esta toxicidade, as plantas desenvolveram um mecanismo onde o Fe fica alojado nas células que possuem ferritina, uma proteína especializada neste armazenamento. Subunidades de ferritina (aproximadamente 24) se unem e formam uma esfera oca capaz de armazenar até 4.500 átomos de Fe em seu núcleo.

A segunda classificação do lodo foi realizada através da análise das substâncias potencialmente tóxicas com base na Resolução CONAMA 498 (BRASIL, 2020), as quais apresentam os valores máximos permitidos de substâncias químicas no resíduo a ser destinado para uso em solos agrícolas. Todos os resultados obtidos encontram-se abaixo dos valores limite (Tabela 9).

**Tabela 9. Substâncias potencialmente tóxicas no lodo de ETE e cinzas, e limites máximos permitidos pela Resolução CONAMA 498 (BRASIL, 2020).**

Parâmetros	Lodo (mg kg <sup>-1</sup> )	Cinzas (mg kg <sup>-1</sup> )	Limites máximos CONAMA 498/2020 (mg kg <sup>-1</sup> )	
			Classe I	Classe II*
As	0,9	0,385	41	75
Ba	1,4	16,989	1300	1300
Cd	0,1	0,174	39	85
Pb	0,5	3,122	300	840
Cu	0,03	10,194	1500	4300
Cr	1,4	2,113	1000	3000
Hg	0,03	0,162	17	57
Se	0,7	0,849	36	100
Zn	574,00	458,72	2800	7500

\*Para o bioossólido Classe II, necessário monitorar no solo a taxa máxima anual e a carga máxima acumulada de substâncias químicas, conforme Resolução CONAMA 498/2020. ( $n=1$ )

Os níveis das substâncias encontradas enquadram o lodo no tipo de resíduo com menor restrição de uso conforme a Resolução CONAMA 498 (BRASIL, 2020) (Classe I), não sendo necessário monitorar no solo a taxa máxima anual e a carga máxima acumulada de substâncias químicas, uma vez que não há riscos para possíveis teores de metais acumulados no solo durante o experimento.

Apesar disso, diversos autores destacam, que o efeito de sucessivas aplicações pode gerar cumulativo dos constituintes inorgânicos no solo e, por essa razão, o monitoramento periódico deve ser sempre indicado, mesmo que a concentração desses constituintes no lodo seja considerada reduzida. De acordo com o NEPAR-SBCS (2019), concentrações de Cobre e Zinco na faixa de 200 à 400 mg Kg<sup>-1</sup> em adubos orgânicos (esterco) de animais confinados são comuns, o que pode suprir a necessidades das culturas, porém em alguns casos quando ocorre aplicações sucessivas, pode ocorrer acúmulo no solo, o que merece atenção.

Alguns metais pesados presentes no solo são essenciais para várias funções fisiológicas nos seres vivos, enquanto outros, não possuem funções biológicas conhecidas (OLIVEIRA; OLIVEIRA, 2011). Contudo, o emprego desses elementos em fungicidas,

fertilizantes, esterco de animais, lixo urbano, lodo de esgoto no solo e deposição de poeiras industriais, pode elevar suas concentrações no solo, tornando-os tóxicos (MARSOLA et al. 2005; OLIVEIRA; OLIVEIRA, 2011). Todavia, mesmo em pequenas quantidades, alguns desses metais podem ser prejudiciais aos organismos, por formarem complexos estáveis com as biomoléculas (BISINOTI et al. 2004).

Nem todos os metais pesados representam o mesmo perigo à cadeia alimentar. Alguns ( $\text{Cr}^{3+}$ , Fe, Hg, Pb), são fortemente ligados ao solo ou retidos pelas raízes das plantas, e não são translocados em quantidades prejudiciais para as partes comestíveis, mesmo quando os solos são muito enriquecidos. Outros (Cd, Mo, Ni, Se, Zn,) são rapidamente absorvidos e translocados para os tecidos da planta. Embora um metal possa ser relativamente fácil de ser absorvido e translocado, a fitotoxicidade pode manter as concentrações nas plantas, abaixo dos níveis de segurança (As, B, Cu, Mn, Zn e possivelmente Ni). Quando um ou mais desses processos, mantêm as concentrações de metais pesados em tecidos de plantas comestíveis, a níveis seguros a animais, a cadeia alimentar é dita estar protegida por uma "BARREIRA SOLO-PLANTA". Para o lodo de esgoto, a barreira solo-planta é efetiva para metais pesados problemáticos, exceto Cd, Mo, Se e possivelmente Co e Ni (OMS, 1989).

Os lodos também contém bactérias patogênicas, vírus e protozoários, juntamente com outros helmintos parasitas que podem dar origem a riscos potenciais para a saúde de humanos, animais e plantas. Um relatório da OMS (1981) sobre o risco para a saúde de micróbios em lodo de esgoto aplicado à terra identificou salmonelas e ténias como causa de maior preocupação. O número de organismos patogênicos e parasitas no lodo pode ser significativamente reduzido antes da aplicação no solo por meio de tratamento adequado do lodo e o risco potencial à saúde é reduzido ainda mais pelos efeitos do clima, microrganismos do solo e tempo após a aplicação do lodo no solo. No entanto, no caso de certas culturas, são necessárias limitações ao plantio, pastoreio e colheita.

Nas análises microbiológicas, foram registradas ausência de agentes patológicos no lodo de ETE, enquanto para as cinzas, a contagem de *C. termotolerantes* em água foi de  $<1,0 \times 10^1$  UFC  $\text{g}^{-1}$  e registrado presença de Ovos de Helmintos na proporção de  $<0,1$  ovo  $\text{g}^{-1}$  de ST (Tabela 10).

**Tabela 10. Características microbiológicas do resíduo de lodo de ETE e cinzas de caldeira e limites permitidos conforme Resolução CONAMA 498 (BRASIL, 2020).**

<b>Parâmetro</b>	<b>Lodo de ETE</b>	<b>Cinzas de Caldeira</b>	<b>Limite CONAMA 498/2020 (Classe A)</b>
Pesquisa de <i>Salmonella spp</i> (UFC 100 mL <sup>-1</sup> )	Ausente	Ausente	-
Contagem de <i>C. termotolerantes</i> (UFC g <sup>-1</sup> )	Ausente	<1,0 x 10 <sup>1</sup>	<10 <sup>3</sup>
Ovos de <i>Helmintho</i> (ovo g <sup>-1</sup> de ST)	Ausente	<0,1	<1
Vírus Entéricos (Enterovírus)	Ausente	Ausente	-

A ausência de agentes patológicos no lodo em estudo deve-se ao processo de cozimento à 95 °C durante cerca de 1 hora, pelo qual o lodo passa antes da centrifugação para extração do óleo e separação da fração líquida e sólida. As cinzas, apesar de serem provenientes de processo térmico intenso, são resfriadas e armazenadas em containers antes do descarte, o que pode ter provocado leve contaminação da amostra.

Conforme a Resolução CONAMA 498 (BRASIL, 2020), os níveis de *E. Coli* não deverão exceder à 10<sup>3</sup> e ovos viáveis de helmintos (nematoides intestinais humanos) deverá ser menor que 1 ovo g<sup>-1</sup> de ST (g<sup>1</sup> de ST). Considerando que o grupo *E. Coli*, está contido no grupo dos *C. termotolerantes*, o baixo teor deste último justifica o atendimento de ambos os materiais às exigências da referida legislação.

A terceira classificação foi realizada por meio da IN - MAPA nº 61 (BRASIL, 2020). Para ser utilizado como fertilizante, é necessário também que o material atenda as exigências do MAPA, o qual, define exigências, especificações, garantias, tolerâncias, registro, embalagem e rotulagem dos fertilizantes orgânicos e dos biofertilizantes, destinados à agricultura. Para alguns parâmetros o lodo não atingiu o mínimo necessário (Tabela 11).



**Tabela 11. Características para macro e micronutrientes no lodo de ETE e teores mínimos para fertilizantes orgânicos simples e compostos, conforme IN n° 61 (BRASIL, 2020).**

Parâmetro	Lodo de ETE (%)	Teor mínimo (%)
N	6,86	1
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	7,362	1
K <sub>2</sub> O	0,07	1
Ca	0,29	1
Mg	0,02	1
S	0,55	1
B	0,01	0,01
Cu	0,03	0,02
Fe	2,35	0,02
Mn	0,01	0,02
Se	0,7	0,003
Zn	574	0,1

\*P= P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> x 0,436; K = K<sub>2</sub>O x 0,830, IN n° 61 (BRASIL, 2020) (n=1)

Os teores de C mínimo e de N variam de acordo com o tipo de material para compostos simples fica na faixa de 15% de C e 0,5% de N, estando de acordo com o verificado para o lodo. Já os teores de macro e micronutrientes, K, Ca, Mg, S e Mn, estão abaixo dos níveis mínimos exigidos para fertilizantes, conforme IN n° 61-MAPA (BRASIL, 2020), havendo a necessidade de enriquecimento do material caso o objetivo venha a ser a comercialização com finalidade agrícola do lodo. De acordo com esta norma, os materiais secundários de natureza mineral e ou orgânica, os remineralizadores e os condicionadores de solo podem também, na condição de matéria prima, ser utilizados na fabricação de fertilizantes orgânicos mistos, compostos e organominerais, observada a compatibilidade de mistura destes materiais.

Para os fertilizantes orgânicos simples, mistos e compostos para aplicação no solo devem conter umidade máxima de 40% no caso de esterco e camas, tortas e farelos vegetais, turfa, e outros fertilizantes orgânicos simples, o que poderíamos incluir os lodos e 50% para fertilizantes mistos e compostos (IN n° 61 - MAPA, BRASIL, 2020).

A qualidade do lodo está diretamente relacionada às características do efluente tratado que o originou. No caso do presente estudo, o lodo se originou na ETE de uma indústria de abate de aves, a qual apresenta em seu efluente uma grande quantidade de sangue, gordura e outros subprodutos de frango, sendo que os componentes inorgânicos incorporados, são

advindos essencialmente dos processos de higienização e tratamento primário de efluentes. Assim, é esperado que o lodo gerado contenha concentração baixa dos constituintes inorgânicos, e que a aplicação do resíduo apresente baixo impacto em relação à concentração desses componentes no solo.

#### 4.2 DESEMPENHO AGRONÔMICO DAS CULTURAS

O desempenho agronômico das culturas de aveia e do milho foram avaliados através da MS da parte aérea das plantas, e para a soja, foram realizadas avaliações de rendimento; AP, DC, NV e PROD.

Para a aveia preta, a adição de lodo de ETE ao solo promoveu resposta significativa para a produção de MS. Observou-se variação a nível de 5% de probabilidade de erro para MS da aveia, para a interação entre os fatores avaliados (dose x ano). Quando avaliados os fatores de forma isolada, a MS da aveia apresentaram diferença significativa a 1% de probabilidade de erro. Para a MS do milho, houve diferença significativa pelo teste F a nível de 1% de probabilidade de erro para os dois fatores de forma isolada porém não significativo para a interação (Tabela 12).

**Tabela 12. Análise de variância para MS<sup>1</sup> (aveia) e MS<sup>2</sup> (milho) em função de cinco doses de lodo de ETE (0, 20, 40, 60 e 80 t ha<sup>-1</sup>) e dois anos de cultivo em um experimento conduzido em blocos ao acaso com quatro repetições. UTFPR, Pato Branco, 2022.**

Fonte de variação	GL	Quadrados médios	
		MS <sup>1</sup>	MS <sup>2</sup>
Bloco	3	5465,01	83,05
Dose	4	18394,85 <sup>**</sup>	1665,74 <sup>**</sup>
Ano	1	123351 <sup>**</sup>	8981,71 <sup>**</sup>
Dose x Ano	4	5149,25 <sup>*</sup>	409,44 <sup>ns</sup>
Erro	27	1846,25	154,99
Média Geral	-	147,16	42,93
CV (%)	-	29,20	29,00

<sup>\*\*</sup>; <sup>\*</sup> Significativo a 1 e 5% de probabilidade de erro pelo teste F, respectivamente. <sup>ns</sup> não significativo.

Na cultura da soja, para as variáveis AP, NV e PROD, foram influenciados pela aplicação do lodo, observando-se diferença significativa pelo teste F a nível de 1% de probabilidade de erro apenas para os fatores dose de lodo e ano de cultivo de forma isolada.

Para a variável DC houve diferença entre as doses aplicadas, a 5% de probabilidade de erro, porém observando-se tendência de estabilidade na regressão. Entre a menor e maior dose de lodo a variação média foi de aproximadamente 2 mm, isto significa que a resposta a aplicação das fontes de MO não influenciaram o crescimento da planta quanto a esta variável (Tabela 13).

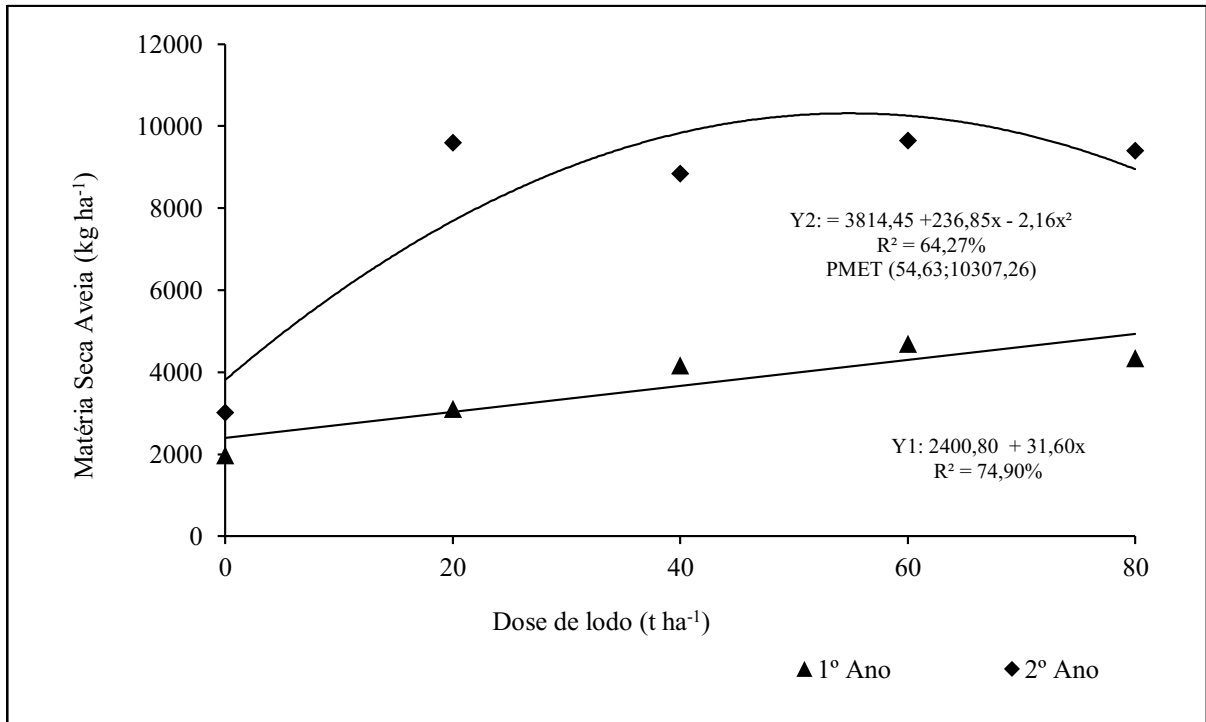
**Tabela 13. Análise de variância para AP, DC, NV e PROD em soja, em função de cinco doses de lodo de ETE (0, 20, 40, 60 e 80 t ha<sup>-1</sup>) e dois anos de cultivo em um experimento conduzido em blocos ao acaso com quatro repetições. UTFPR, Pato Branco, 2022.**

Fonte de variação	GL	Quadrados médios			
		AP	DC	NV	PROD
Bloco	3	1005,93	0,03	1253,50	461196,03
Dose	4	1306,93**	0,04*	2115,99**	19085339,61**
Ano	1	4270,42**	0,00 <sup>ns</sup>	14728,71**	10103455,38**
Dose x Ano	4	82,05 <sup>ns</sup>	0,01 <sup>ns</sup>	392,77 <sup>ns</sup>	380811,86 <sup>ns</sup>
Erro	27	165,82	0,01	298,62	660291,32
Média Geral	-	104,15	0,98	86,26	5179,93
CV (%)	-	12,36	10,69	20,03	15,68

\*\* ;\* Significativo a 1 e 5% de probabilidade de erro pelo teste F, respectivamente. <sup>ns</sup> não significativo.

De maneira geral, as doses de lodo afetaram positivamente a produtividade das culturas. Para a aveia, a MS, no primeiro ano, a aplicação das doses de lodo proporcionaram incremento gradual resultando na produção de 1985 kg ha<sup>-1</sup>, na dose 0, e 4705 kg ha<sup>-1</sup> na dose 60 t ha<sup>-1</sup>. Para o segundo ano de cultivo o ponto de máxima produção de MS ocorreu com a aplicação de 54,63 t ha<sup>-1</sup> de lodo, resultando na produção de 10307 kg ha<sup>-1</sup> (Figura 11).

**Figura 11. Matéria seca de aveia, em função de cinco doses de lodo de ETE (0, 20, 40, 60 e 80 t ha<sup>-1</sup>) e dois anos de cultivo, conduzido em delineamento de blocos ao acaso com quatro repetições. UTFPR, Pato Branco, 2022.**



Obs: Y1: ano 1; Y2: ano 2, PMET= Ponto de máxima eficiência técnica. R<sup>2</sup>= coeficiente de determinação.

A produtividade da aveia foi maior na segunda safra em todos os tratamentos avaliados. Esse acréscimo é explicado pela diferença de densidade de plantio, bem como pelo maior volume de chuvas e presença de veranicos no mês de junho de 2020, fase inicial do ciclo da cultura na segunda safra. Conforme indicado na metodologia, utilizou-se o dobro da densidade no segundo ano para essa cultura, devido a necessidade de um sobre plantio ocasionado pela baixa germinação da cultura no plantio inicial. Importante destacar também que, a partir do segundo ano de cultivo, as parcelas contaram com cobertura do solo, proporcionada pela aveia no inverno e milho no verão, proporcional ao que havia sido produzido nas parcelas para cada dose de lodo aplicada no ano anterior.

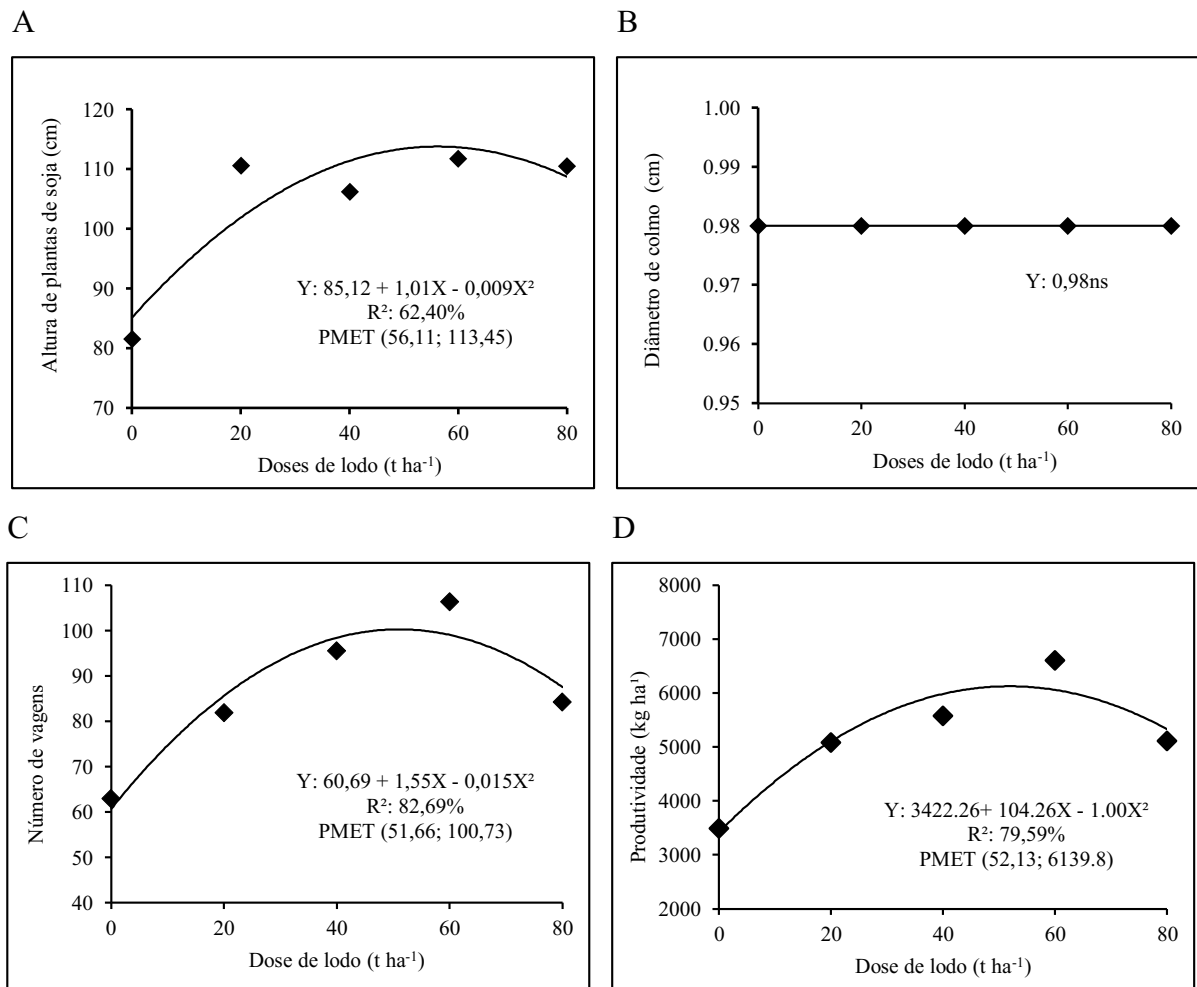
De maneira geral, a aplicação da dose 20 t ha<sup>-1</sup> de lodo de ETE promoveu forte incremento na produtividade, que corresponde a um aumento em MS de 317% da aveia em relação à produção observada na área que não recebeu o lodo, no segundo ano de produção. Este comportamento da curva de resposta é explicado pela lei dos incrementos decrescentes, proposta por Mitscherlich, a qual diz que a aplicação de doses crescentes de determinado nutriente ao solo, cuja produtividade da cultura seja limitada por ele, proporcionará o maior aumento de produção com a aplicação da primeira dose (CEFSPE, 1998). Neste ensaio, os

elementos que limitavam a produtividade eram, provavelmente, o N e o P, uma vez que os níveis de K no solo antes da aplicação de lodo se encontravam em níveis alto.

A partir da dose 60 t ha<sup>-1</sup> de lodo, observa-se decréscimo da produtividade com o aumento das doses de lodo. Este comportamento em curvas de resposta pode ser explicado considerando-se que o nutriente que estava em deficiência passa a ficar em excesso com o aumento das doses, de tal forma a causar toxicidade as plantas.

Quanto a soja, a aplicação das doses de lodo afetaram positivamente as variáveis AP, NV e PROD. O ponto de máxima para AP ocorreu com a aplicação de 56,11 t ha<sup>-1</sup> de lodo de ETE, resultando na altura de 113,45 cm. Para NV, o pico de produção ocorreu com a aplicação de 51,66 t ha<sup>-1</sup> de lodo, obtendo 100,73 vagens por planta e PROD 52,13 t ha<sup>-1</sup> de lodo, resultando na produção de 6139.8 kg ha<sup>-1</sup> de soja (Figura 12).

**Figura 12. Altura de planta (A), diâmetro de colmo (B), número de vagens (C) e produtividade de soja (D) em função de cinco doses de lodo de ETE (0, 20, 40, 60 e 80 t ha<sup>-1</sup>) e dois anos de cultivo, conduzido em delineamento de blocos ao acaso com quatro repetições. UTFPR, Pato Branco, 2022.**



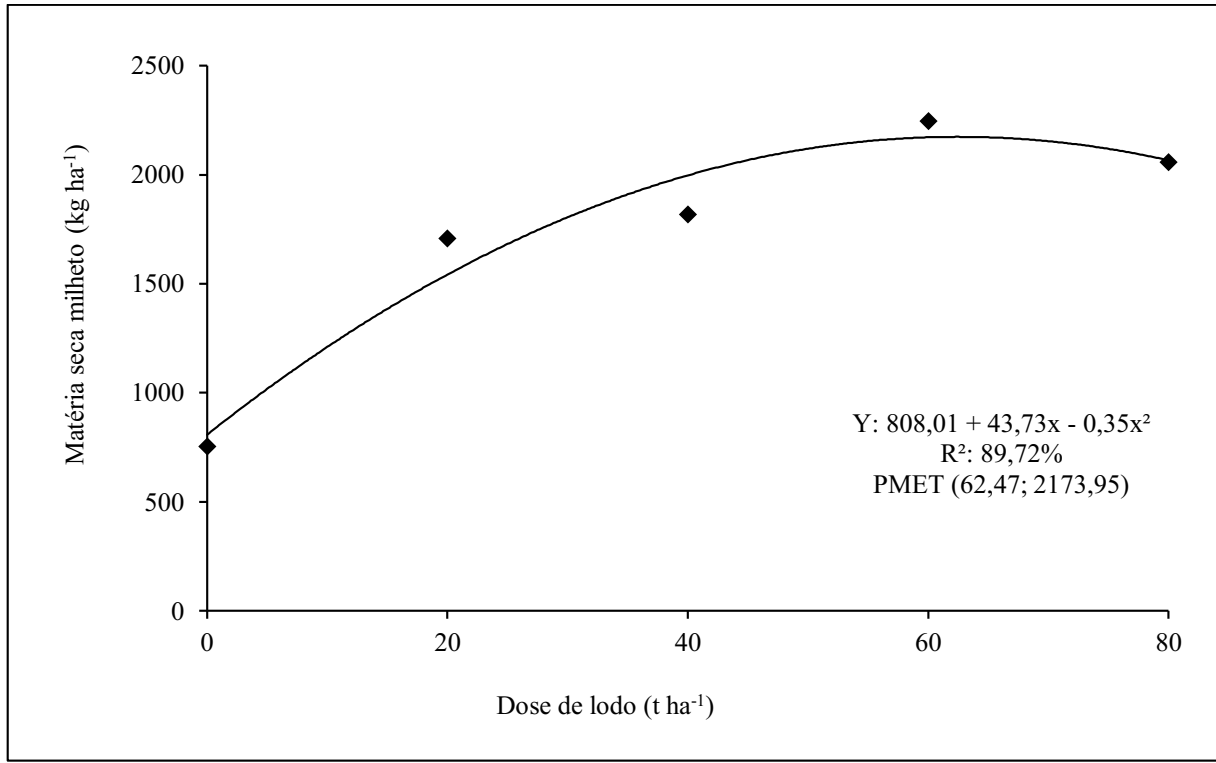
PMET= Ponto de máxima eficiência técnica. R<sup>2</sup>= coeficiente de determinação.

A elevada disponibilidade de N presente no lodo de ETE, pode ter favorecido o crescimento das plantas em altura uma vez que o N participa diretamente na construção de novos tecidos e expansão celular. Em geral os lodos orgânicos são ricos em N, o que significa que possuem alto potencial para serem utilizados como fertilizantes nitrogenados. De acordo com MELO et al. (2001), o N no lodo está presente em várias formas orgânicas e inorgânicas e nem todas são disponíveis para a nutrição da planta. Neste sentido, a recomendação de adubação, com o lodo a ser aplicada depende dos teores de N em sua composição e das necessidades da cultura.

De acordo com Ciriello et al. (2014), as plantas de modo geral, respondem bem à adubação rica em N, sendo que o efeito externo do N mais visível é a vegetação verde e abundante. O N é um elemento de alta mobilidade no floema que participa da estrutura das moléculas de clorofila e conseqüentemente dos processos fotossintéticos, o que resultaria em crescimento de toda a estrutura da planta (NEPAR-SBCS, 2019). Porém, o excesso de N é prejudicial; sendo assim, a dose fornecida à cultura deve ser bem equilibrada em relação à quantidade de outros nutrientes. A soja demonstrou que o incremento de N e nutrientes proporcionados pelo lodo no solo, nesta etapa do seu crescimento, foi essencial para os ganhos na produção. Quanto à altura de plantas, mesmo a menor dose fornecida ( $20 \text{ t ha}^{-1}$ ) foi suficiente para um bom crescimento da cultura quando comparada à dose  $0 \text{ t ha}^{-1}$ .

Os resultados obtidos com a MS do milho, submetidos as doses crescentes de lodo, tiveram como resposta um aumento não linear, onde o pico de produção ocorreu com a aplicação de  $62,47 \text{ t ha}^{-1}$  de lodo de ETE, resultando na produção de  $2173,95 \text{ kg ha}^{-1}$  de MS (Figura 13).

**Figura 13. Matéria seca do milho, em função de cinco doses de lodo (0, 20, 40, 60 e 80 t ha<sup>-1</sup>) e dois anos de cultivo, conduzido em delineamento de blocos ao acaso com quatro repetições. UTFPR, Pato Branco, 2022.**



PMET= Ponto de máxima eficiência técnica. R<sup>2</sup>= coeficiente de determinação.

A aplicação da dose inicial (20 t ha<sup>-1</sup>) de lodo de ETE promoveu um incremento na produtividade do milho, em relação à produção observada na área que não recebeu o lodo, na ordem de 226% em MS. A partir da dose 60 t ha<sup>-1</sup> de lodo, houve decréscimo da produtividade com o aumento das doses de lodo, apresentando comportamento semelhante ao ocorrido com as culturas da aveia e da soja.

No teste de comparação de médias realizado para todas as variáveis agrônômicas das 3 culturas, foi observado que após o segundo ano de aplicação do lodo ocorreu um incremento significativo na produção de aveia (MS) e soja (AP, DC, NV e PROD). A produção de milho, no entanto, apresentou médias menores de produção de MS (Tabela 14).

**Tabela 14. Médias dos dois anos de cultivo para as variáveis: matéria seca de aveia (MS<sup>1</sup>) e matéria seca de milho (MS<sup>2</sup>) em kg ha<sup>-1</sup>, altura de planta (AP) diâmetro de colmo (DC) em cm, número de vagens (NV) e produtividade de grãos (PROD) em kg ha<sup>-1</sup> da soja, de um experimento conduzido em delineamento experimental de blocos ao acaso com quatro repetições. UTFPR, Pato Branco, 2022.**

Ano de Cultivo	Médias*					
	MS <sup>1</sup>	MS <sup>2</sup>	AP	DC	NV	PROD
Ano 1	3664,86 b	2316,62 a	93,81 b	0,97 a	67,07 b	4489,18 b
Ano 2	8107,5 a	1117,82 b	114,48 a	0,98 a	105,45 a	5870,68 a

\* Médias seguidas pelas mesmas letras na coluna não diferem estatisticamente pelo teste F a 5% de probabilidade de erro.

A produção de milho foi afetada pelas condições meteorológicas no segundo ano de cultivo. Entre os meses de março e abril, época de plantio e desenvolvimento inicial da cultura, ocorreu forte estiagem que dificultou o desenvolvimento das sementes. Nas parcelas com dose 0, não ocorreu germinação, provavelmente pelo baixo teor de P. Verificou-se que nestas parcelas além de não receber o substrato e nutrientes por meio da aplicação do lodo e das cinzas, também foram afetadas pelo pouco desenvolvimento das plantas de cobertura, principalmente da aveia. Desta forma, as médias de produção foram significativamente afetadas no segundo ciclo.

Outros estudos também indicam que a aplicação de lodo ao solo aumenta o rendimento das culturas. Para Gomes et al (2007), a produção de grãos aumentou em função das doses de lodo de esgoto, até a aplicação de 26 t ha<sup>-1</sup>, com incremento na ordem de 74,5% da primeira dose em relação ao tratamento controle (sem lodo). Para Gwenz et al. (2016), a aplicação de biochar de lodo ao solo melhora as propriedades químicas e eleva o crescimento e produção de biomassa do milho. Vasconcelos et al. (2017) obtiveram aumento da MF de alfaca sob adubação com resíduos de esterco de ovino em diferentes doses, com destaque para a dose de 60 t ha<sup>-1</sup>, a menor média se apresentou no tratamento que não recebeu adubação.

A diferença de produção entre os tratamentos era esperada, visto que a adição de quantidades expressivas de lodo resultaria em incremento de nutrientes e principalmente de N, de modo a promover melhor desenvolvimento das plantas. Neste estudo, optou-se pela aplicação direta do lodo centrifugado (a 65% de umidade) no solo, devido à dificuldade de secar uma grande quantidade de lodo. A umidade é um parâmetro importante em se tratando de adubos, sendo que a composição típica de um adubo orgânico consoante a Pereira Neto (2007) é em média de 54,76 %. A alta concentração de água pode ocasionar atração de vetores, lixiviação e mau cheiro. Entretanto, conforme preconiza a Resolução CONAMA 498 (BRASIL,



2020) no caso de biossólidos classe A, devem ser aplicados e incorporados decorridas, no máximo, oito horas após sua descarga do processo de redução de patógenos. Também, a umidade pode ser vantajosa em períodos não chuvosos, tendo o bom manejo e preparo adequados para cada caso. Nos dias subsequentes a emissão de odores não foi significativa.

### 4.3 EFEITOS DA DISPOSIÇÃO DE LODO DE ETE NAS PROPRIEDADES QUÍMICAS DO SOLO

Para as amostras de solo coletadas no final de cada ano agrícola (2020 e 2021), nas 3 profundidades (0-5, 5-10, 10-20 cm), foram avaliados os atributos químicos: MO, P, pH, Al, Mg, Ca, K, V% e CTC. De maneira geral, observa-se que houve aumento relativo nos teores de P e MO, e redução nos teores de K, Mg e V% nos tratamentos com as maiores doses do lodo. O pH também sofreu redução acentuada, nas camadas inferiores do solo. Os efeitos da aplicação do lodo foram realizados para cada profundidade, conforme segue:

#### 4.3.1 Camada de 0-5 cm

A interação entre os fatores resultou em diferença significativa nas propriedades químicas do solo, apenas para os teores de K. Os efeitos mais destacados para o fator isolado das doses de lodo, nesta profundidade, foram observados apenas nos teores de P, com ascensão proporcional às doses de lodo aplicadas nos dois anos de cultivo. Para o fator ano de produção, as variáveis MO, P e K diferiram pelo teste F à 1% de probabilidade de erro, bem como os elementos Mg e Ca a 5% de probabilidade.

O pH, V% e CTC do solo não sofreu alteração significativa. A interação entre os fatores (dose e ano) não gerou efeito adicional sobre as variáveis estudadas, com exceção do K (Tabela 15).

**Tabela 15. Análise de variância para nove parâmetros químicos de análise do solo na profundidade 0-5 cm, de um experimento bifatorial (5 doses de lodo de ETE x 2 anos de cultivo) em delineamento de blocos ao acaso com quatro repetições. UTFPR, Pato Branco, 2022.**

Fonte de Variação	GL	Quadrados médios								
		MO	P	pH	Al	Mg	Ca	K	V%	CTC
<b>Blocos</b>	3	90,51	752,24	1,02	0,11	0,05	2,45	0,01	222,82	9,08
<b>Doses</b>	4	26,28 <sup>ns</sup>	4058,53 <sup>**</sup>	0,21 <sup>ns</sup>	0,02 <sup>ns</sup>	0,19 <sup>ns</sup>	1,87 <sup>ns</sup>	0,02 <sup>ns</sup>	113,16 <sup>ns</sup>	1,83 <sup>ns</sup>
<b>Ano</b>	1	871,65 <sup>**</sup>	19705,68 <sup>**</sup>	0,02 <sup>ns</sup>	0,02 <sup>ns</sup>	0,57 <sup>*</sup>	10,97 <sup>*</sup>	0,25 <sup>**</sup>	73,96 <sup>ns</sup>	5,49 <sup>ns</sup>
<b>Ano x Dose</b>	4	13,69 <sup>ns</sup>	1326,32 <sup>ns</sup>	0,08 <sup>ns</sup>	0,02 <sup>ns</sup>	0,10 <sup>ns</sup>	2,61 <sup>ns</sup>	0,08 <sup>*</sup>	63,82 <sup>ns</sup>	4,40 <sup>ns</sup>
<b>Resíduo</b>	27	50,75	906,35	0,20	0,02	0,08	2,28	0,02	125,83	3,77
<b>Média</b>										
<b>Geral</b>	-	45,17	49,58	5,05	0,105	1,69	3,94	0,40	48,17	12,60
<b>CV (%)</b>	-	15,77	60,71	8,82	145,03	16,59	38,29	36,36	23,29	15,42

\* P<0,05; \*\* P<0,01; ns = Não significativo.

Observou-se incremento de MO, P e Mg, no solo, após o segundo ano de aplicação do lodo, em relação ao primeiro ano. Quanto a MO, a média dos resultados obtidos aumentaram de 40,5 g dm<sup>-3</sup> (81000 kg ha<sup>-1</sup>) para 49,84 g dm<sup>-3</sup> (99680 kg ha<sup>-1</sup>) do primeiro para o segundo ano, enquanto o P quase triplicou o valor, passando de 27,39 g dm<sup>-3</sup> no primeiro ano para 71,78 g dm<sup>-3</sup>, após o segundo ciclo agrícola, sendo ambos estatisticamente diferentes (p≤0,05) (Tabela 16).

Houve um decréscimo significativo nos teores de Ca no solo, do primeiro para o segundo ano de produção, provocado possivelmente pela absorção das plantas, e reposição insuficiente pelos materiais empregados, cujos teores levantados haviam sido 0,38% e 1,96% para lodo (65% de umidade) e cinzas, respectivamente. O teor de Ca obtido em experimentos com o lodo de esgoto foi de 1,64% (EMBRAPA, 2004), enquanto os teores médios de Ca no lodo de esgoto alcalinizado (seco) empregado na agricultura ficam na ordem de 14,9% e nas cinzas de caldeira 4,49% (NEPAR-SBCS, 2019). Desta forma, a adição de alcalinizantes, além da estabilização do material entre outros benefícios pode suprir a carência de Ca.

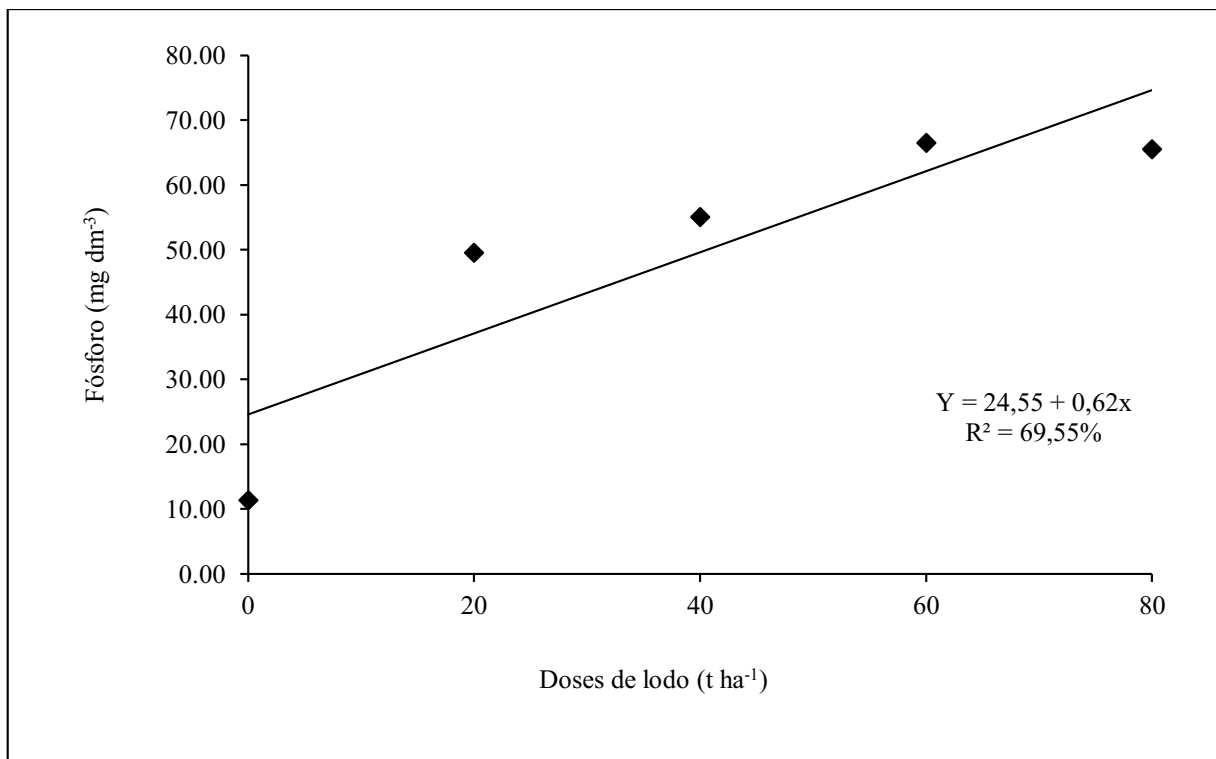
**Tabela 16. Valores médios de MO, P, Mg, Ca e K em função do ano de cultivo, na profundidade 0-5 cm.**

Ano de Cultivo	Médias*				
	MO	P	Mg	Ca	K
	(g dm <sup>-3</sup> )	(mg dm <sup>-3</sup> )	(cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	(cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	(cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )
Ano 1	40,5 b	27,39 b	1,57 b	4,46 a	0,32 b
Ano 2	49,84 a	71,78 a	1,81 a	3,42 b	0,48 a

\* Médias seguidas pelas mesmas letras na coluna não diferem estatisticamente pelo teste F a 5% de probabilidade de erro.

Para o teor de P, foi possível visualizar o aumento progressivo na concentração do elemento em função das doses aplicadas, sendo que o maior grau da equação de regressão significativa foi a de primeiro grau (linear) (Figura 14).

**Figura 14. Valores médios de P na profundidade de 0-5 cm do solo em função de doses de lodo de ETE.**

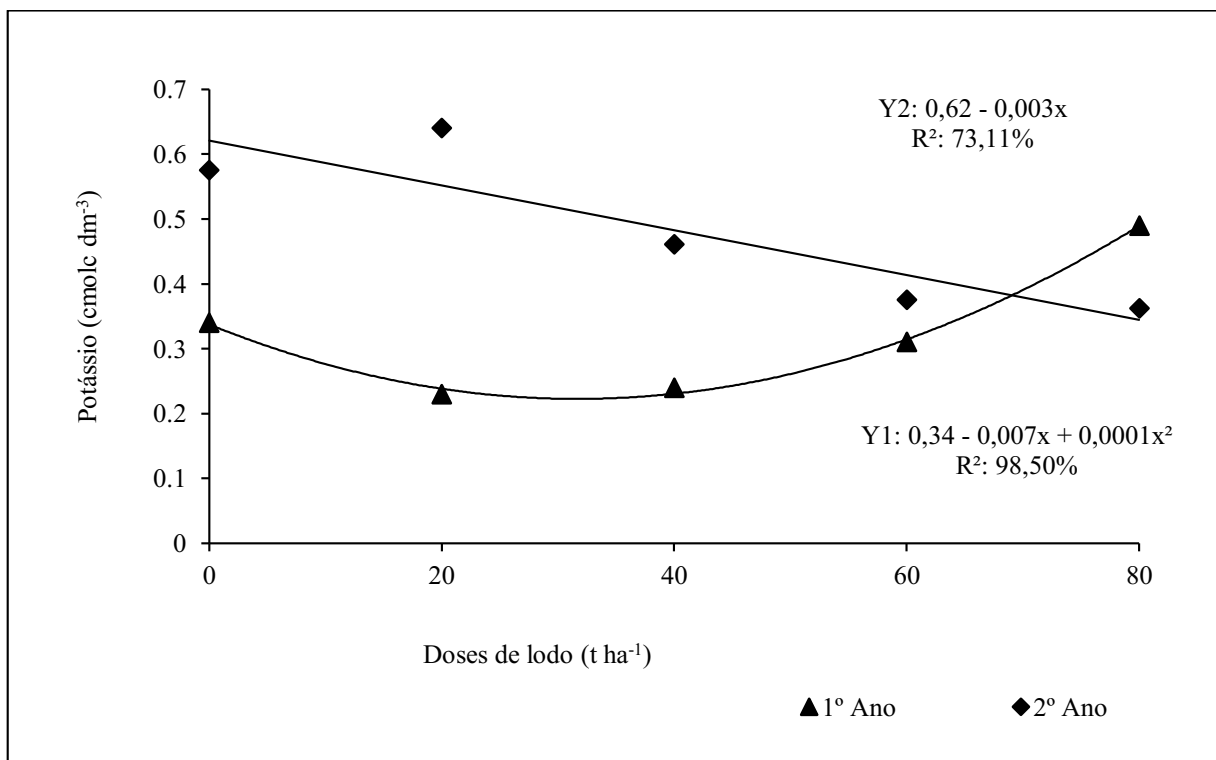


Para as doses de lodo 60 e 80 t ha<sup>-1</sup>, o incremento nos teores de P foram de quase 3 vezes em relação à dose 0 t ha<sup>-1</sup>. Os valores variaram de 24,55 para 74,15 mg dm<sup>3</sup> de P, da dose 0 para a dose 80 t ha<sup>-1</sup> de lodo aplicado. Esse aumento é decorrente da elevada concentração desse nutriente no lodo (41,1 g kg<sup>-1</sup>) e complementado pelo manejo da palhada (aveia e milho) no solo. Práticas que propiciem o acúmulo de resíduos orgânicos na superfície do solo,

como o plantio direto, elevam a atividade de fosfatase ácida e as formas lábeis orgânicas e inorgânicas de P, além da formação de agregados maiores, os quais apresentam teores mais elevados de C, N, P total e P orgânico lábil (CASALI, 2012), reduz a taxa de decomposição, aumentando o conteúdo de MO e beneficia a atividade microbiana e o estoque de P orgânico na biomassa microbiana e camada superficial do solo (CALEGARI, 2006; TIECHER et al., 2012).

O comportamento do elemento K, cuja interação deu significativa, pode ser representado por uma função quadrática (equação de segundo grau) para o primeiro ano agrícola, a qual explica 98,50% da variabilidade no teor deste elemento. Para o segundo ano da produção, houve um decréscimo no teor de K, com o aumento da dose de aplicação do lodo, o qual foi representado por uma função linear, que explica 73,11% da variabilidade no comportamento deste elemento (Figura 15).

**Figura 15.** Valores médios de K na profundidade de 0-5 cm do solo em função de doses de lodo de ETE.



Obs: Y1: ano 1; Y2: ano 2.

Os teores de K encontrados no lodo em estudo (0,06%), foram muito próximos aos encontrados em lodos de esgoto (0,07%) mas ambos são considerados baixos se comparados com outros adubos orgânicos, como a cama de perus (1,4%) e esterco bovino (4,8%) (NEPAR-SBCS, 2019).

A extração dos nutrientes pelas culturas principalmente nas parcelas com lodo, decorrentes da alta produtividade nestas parcelas, e sua baixa reposição, mesmo com a aplicação das cinzas (1,68%), resultou em decréscimo dos teores deste elemento no solo, principalmente após o segundo ano de cultivo, com resultados similares ou até menores do que na testemunha. Cogger et al. (2006) também relataram a baixa concentração de K no lodo de esgoto, geralmente de 0,1 a 0,6%, o que requer aplicação de altas doses de material para promover aumento deste nutriente no solo. Pesquisas que promovam o enriquecimento dos lodos com K, utilizando preferencialmente fontes alternativas, como cinzas de madeira, resíduos de café ou pó de rochas, entre outras fontes, podem suprir essa necessidade.

#### 4.3.2 Camada de 5-10 cm

Na camada de 5-10 cm, a interação entre os fatores não gerou diferença significativa sobre as propriedades químicas analisadas. No entanto, houve efeito significativo de forma isolada para o fator ano de produção, sobre os valores de MO, P e Ca ( $p \leq 0,01$ ), Al, V e CTC ( $p \leq 0,05$ ). Para o efeito dose de lodo, houve diferença significativa para as variáveis pH e Mg ( $p \leq 0,01$ ), bem como P, Al e V ( $p \leq 0,05$ ).

**Tabela 17. Análise de variância para nove parâmetros químicos de análise do solo na profundidade 5-10 cm, de um experimento bifatorial (5 doses de lodo de ETE x 2 anos de cultivo) em delineamento de blocos ao acaso com quatro repetições. UTFPR, Pato Branco, 2022.**

Fonte de Variação	GL	Quadrados médios								
		MO	P	pH	Al	Mg	Ca	K	V%	CTC
Blocos	3	29,90	888,67	0,12	0,14	0,01	0,27	0,00	13,18	4,80
Doses	4	16,96 <sup>ns</sup>	1352,12*	0,46**	0,34*	0,58**	1,79 <sup>ns</sup>	0,02 <sup>ns</sup>	271,73*	0,24 <sup>ns</sup>
Ano	1	233,87**	3505,54**	0,23 <sup>ns</sup>	0,46*	0,00 <sup>ns</sup>	14,30**	0,02 <sup>ns</sup>	388,00*	13,44*
Ano x Dose	4	3,56 <sup>ns</sup>	750,20 <sup>ns</sup>	0,11 <sup>ns</sup>	0,14 <sup>ns</sup>	0,07 <sup>ns</sup>	0,36 <sup>ns</sup>	0,01 <sup>ns</sup>	22,09 <sup>ns</sup>	0,59 <sup>ns</sup>
Resíduo	27	20,61	332,38	0,10	0,09	0,10	0,93	0,01	79,70	2,69
Média Geral	-	40,5	23,51	4,73	0,31	1,44	3,02	0,19	38,98	11,94
CV (%)	-	11,2	77,52	6,52	94,91	22,06	31,93	52,93	22,90	13,75

\*  $P < 0,05$ ; \*\*  $P < 0,01$ ; ns = Não significativo.

No teste de comparação de médias para as variáveis que diferiram para o fator ano, observou-se o incremento de MO, P e Al, após o segundo ano de aplicação do lodo de ETE. A média dos resultados da MO apresentou um acréscimo de 38,08 mg dm<sup>-3</sup> para 42,92 mg dm<sup>-3</sup> do

primeiro para o segundo ano, enquanto o P aumentou 2,3 vezes, passando de 14,15 mg dm<sup>-3</sup> no primeiro ano para 32,88 mg dm<sup>-3</sup>, após o segundo ciclo agrícola, sendo ambos estatisticamente diferentes ( $p \leq 0,05$ ) (Tabela 18).

**Tabela 18. Valores médios de MO, P, pH, Al, Ca e V% em função do ano de cultivo, na profundidade 0-5 cm.**

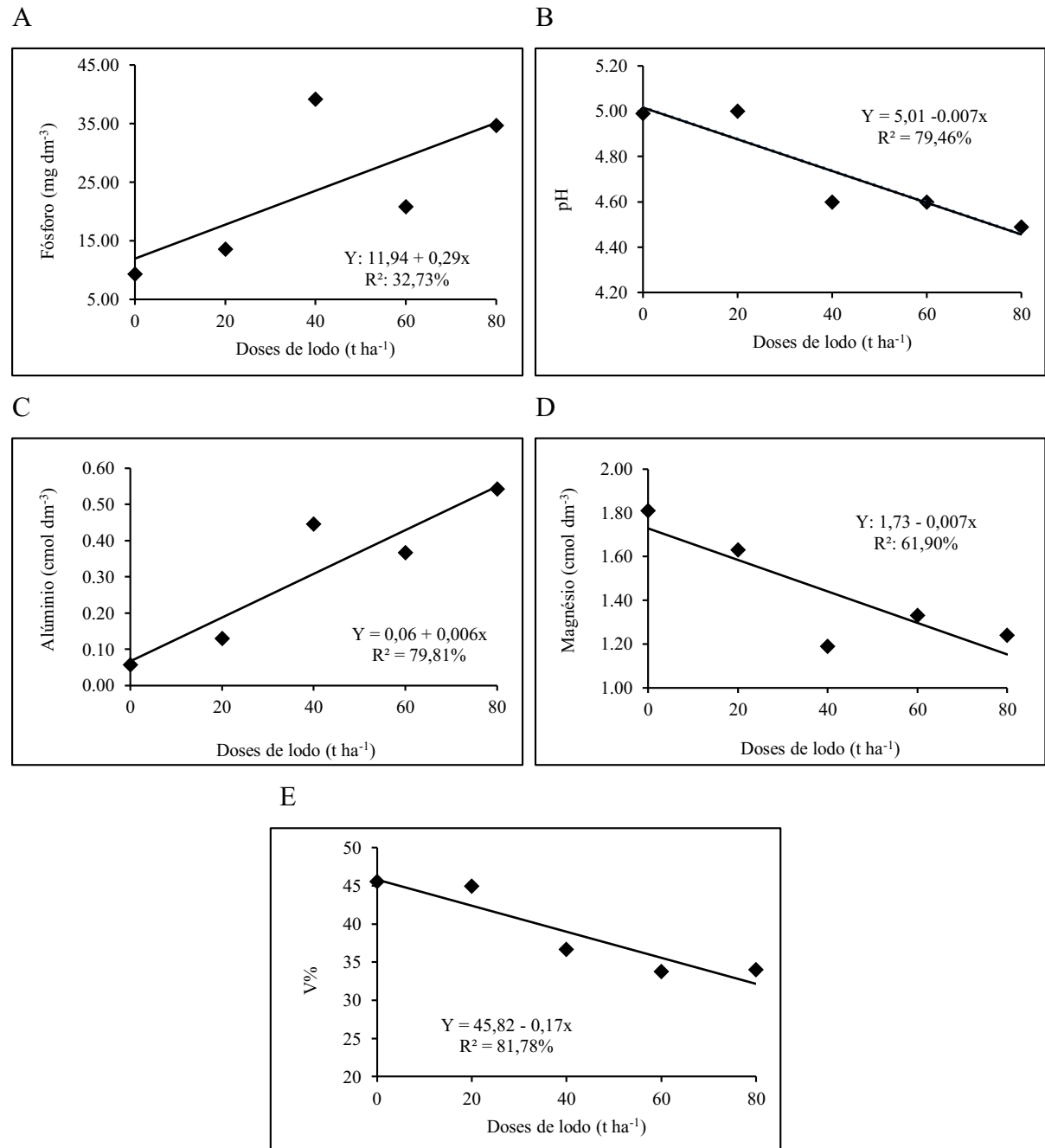
Ano de Cultivo	Médias*					
	MO (g dm <sup>-3</sup> )	P (mg dm <sup>-3</sup> )	pH	Al (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	Ca (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	V %
Ano 1	38,08 b	14,15 b	4,81 a	0,2 b	3,62 a	42,09 a
Ano 2	42,92 a	32,88 a	4,66 b	0,41 a	2,42 b	35,86 b

\* Médias seguidas pelas mesmas letras na coluna não diferem estatisticamente pelo teste F a 5% de probabilidade de erro.

O comportamento do elemento P, considerando a aplicação das diferentes doses de lodo resultaram em um incremento, sendo que na dose de lodo 80 t ha<sup>-1</sup>, o solo apresentou 35,14 mg dm<sup>-3</sup> de P, a qual foi 3 vezes superior à dose de lodo 0, com 11,94 mg dm<sup>-3</sup>. O fósforo é um elemento essencial a plantas e animais, mas quando aplicado ao solo em demasia têm potencial poluidor. O acúmulo de P na superfície do solo, predominantemente na forma orgânica, pode aumentar o potencial de perdas por escoamento superficial, impactando a qualidade de águas superficiais pelo excesso do nutriente (eutrofização). Medidas de controle como práticas conservacionistas, dimensionamento de adubações e uso de plantas extratoras (pastagens) podem ser adotadas (KLEIN; AGNE, 2012)

Também foram elevados os teores de Al no solo, proporcionalmente a dose aplicada, resultando em um incremento de Al de quase 10 vezes na dose de lodo 80 t ha<sup>-1</sup> (0,54 cmol dm<sup>-3</sup>) em relação à testemunha (0,06 cmol dm<sup>-3</sup>). Os resultados corroboram com Pereira e Garcia (2017), os quais observaram uma tendência de aumento da concentração de Al e demais constituintes inorgânicos após a aplicação de lodo de ETE de indústria alimentícia, sem que isso no entanto, provocasse aumento das substâncias orgânicas potencialmente tóxicas no solo da área de aplicação de lodo em relação à testemunha (Figura 16).

**Figura 16. Valores médios de P (A), pH (B), Al (C), Mg (D) e V% (E), na profundidade de 5-10 cm do solo em função de doses de lodo de ETE.**



Em relação ao pH, as doses de lodo de ETE produziram um efeito acidificante no solo, significativo a partir desta profundidade, sendo que o menor pH foi registrado na dose  $80 \text{ t ha}^{-1}$ , com 4,45 enquanto a testemunha se manteve com 5,01 para a camada de 5-10 cm. Observa-se que no momento da aplicação, o lodo apresentava pH adequado, na faixa de 5,8, porém por se tratar de um material recém produzido e não estabilizado, pode ter provocado maior acidez no solo.

Diversos trabalhos de pesquisa demonstram que a aplicação do lodo de esgoto, além de proporcionar aumento dos teores de nutrientes, C orgânico e na CTC, reduziram a acidez do solo (SILVA, 2001), embora provavelmente o motivo sejam os processos de estabilização realizados antes de sua aplicação. De acordo RICC et al. (2010), para o composto de lodo de esgoto, ocorre aumento da basicidade à medida que aumenta a estabilização do mesmo, pois ocorre a formação de ácidos que contribuem para que no início o composto apresente caráter ácido.

Houve também uma redução significativa nos teores de Mg e saturação por bases (V%) nesta profundidade e aumento na concentração de Al. Os maiores valores de Al de modo geral foram observados nas doses 40, 60 e 80 t ha<sup>-1</sup> de lodo, com diferenças expressivas após o segundo ano de aplicação do lodo. Lopes et al. (2007), estudando a aplicação do lodo de esgoto no crescimento da gramínea *Digitaria ciliares*, em um argissolo, constataram que o resíduo orgânico proporcionou maior altura e acúmulo de biomassa seca nas plantas. No entanto, os autores também alertaram para o fato de a aplicação do lodo de esgoto utilizado no experimento ter aumentado a acidez do solo. Garcia et al. (2009), ao avaliar as características químicas de um solo degradado após a aplicação de lodo de esgoto doméstico, observaram que aplicação de doses crescentes de lodo de esgoto tratado com cal promoveram o aumento do pH e nos teores de MO, P, K, Na, Ca, CTC, S e diminuição dos valores de Mg e Al no solo. O que demonstra mais uma vez que a estabilização do lodo através da adição de cal pode representar uma grande vantagem para a utilização deste material.

#### **4.3.3 Camada de 10-20 cm**

Nesta camada, o solo apresentou comportamento muito semelhante à camada de 5-10 cm, para todas as variáveis, exceto para o MO, que não apresentou variação significativa e o elemento Al, o qual foi afetado apenas pelo efeito isolado do fator ano ( $p \leq 0,05$ ). A interação entre os fatores dose e ano não apresentou diferença significativa sobre nenhuma das variáveis.



**Tabela 19. Análise de variância para nove parâmetros químicos de análise do solo na profundidade 10-20 cm, de um experimento bifatorial (5 doses de lodo de ETE x 2 anos de cultivo) em delineamento de blocos ao acaso com quatro repetições. UTFPR, Pato Branco, 2022.**

Fonte de Variação	GL	Quadrados médios								
		MO	P	pH	Al	Mg	Ca	K	V%	CTC
Blocos	3	31,20	44,91	0,14	0,11	0,06	0,12	0,007	70,19	1,64
Doses	4	10,11 <sup>ns</sup>	48,50*	0,46**	0,27 <sup>ns</sup>	0,41**	1,24 <sup>ns</sup>	0,002 <sup>ns</sup>	292,35**	3,78 <sup>ns</sup>
Ano	1	32,89 <sup>ns</sup>	62,90*	0,32 <sup>ns</sup>	0,68*	0,05 <sup>ns</sup>	16,87**	0,002 <sup>ns</sup>	559,26**	19,10**
Ano x Dose	4	11,23 <sup>ns</sup>	25,32 <sup>ns</sup>	0,12 <sup>ns</sup>	0,08 <sup>ns</sup>	0,10 <sup>ns</sup>	0,29 <sup>ns</sup>	0,001 <sup>ns</sup>	6,95 <sup>ns</sup>	0,31 <sup>ns</sup>
Resíduo	27	22,82	13,52	0,10	0,12	0,09	0,99	0,001	66,93	1,86
Média Geral	-	37,71	6,69	4,82	0,26	1,56	3,11	0,098	41,91	11,34
CV (%)	-	12,67	54,99	6,40	135,44	19,69	31,97	36,856	19,52	12,01

\* P<0,05; \*\* P<0,01; <sup>ns</sup> = Não significativo.

No teste de comparação de médias foi observado que, apesar de ter uma diferença mais sutil, em relação as camadas mais superficiais do solo, a aplicação do lodo resultou em incremento significativo no teor de P do primeiro para o segundo ano. Houve um acúmulo de Al no solo, o qual aumentou três vezes após o segundo ano de cultivo em relação ao primeiro. Os teores de Ca e V% sofreram uma redução significativa (Tabela 20).

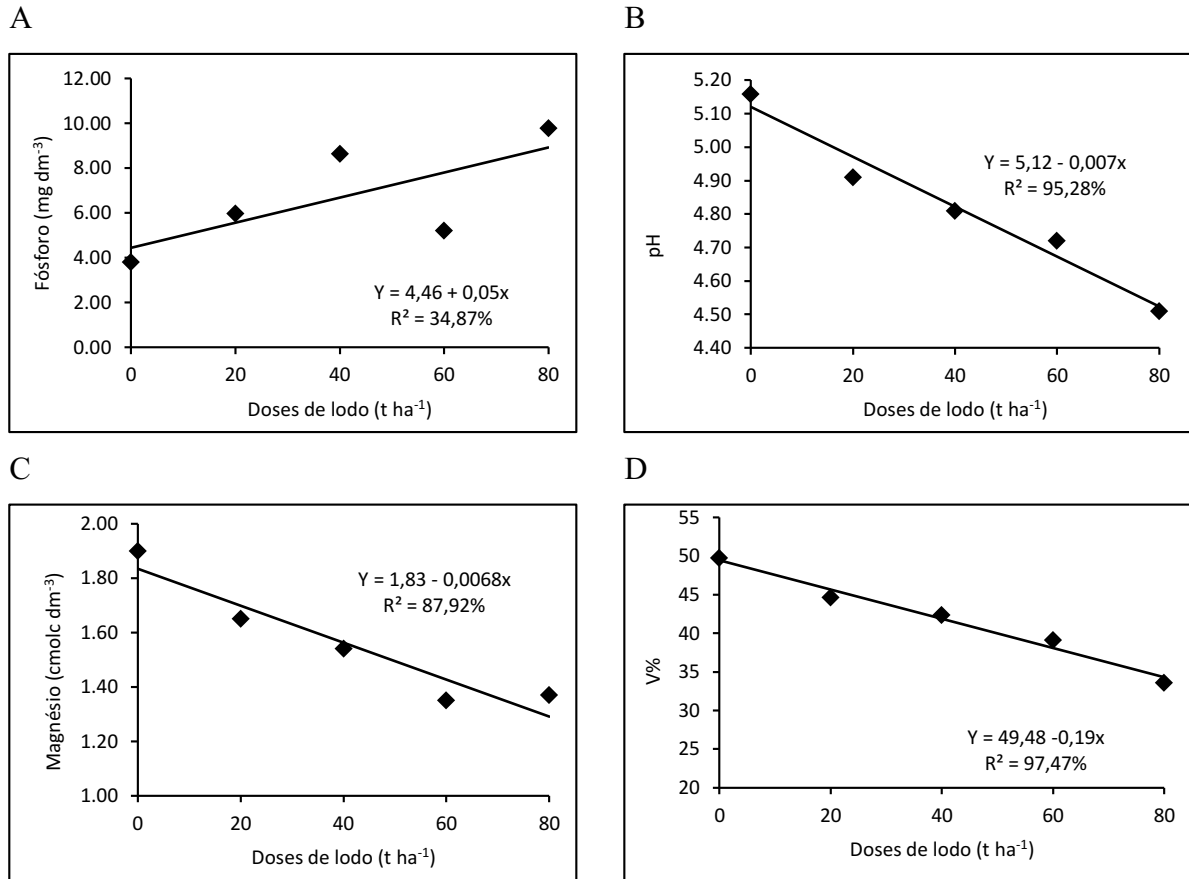
**Tabela 20. Valores médios de P, Al, Ca, V% e CTC em função do ano de cultivo, na profundidade 10-20 cm.**

Ano de Cultivo	Médias*				
	P (mg dm <sup>-3</sup> )	Al (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	Ca (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	V%	CTC (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )
Ano 1	5,43 b	0,13 b	3,76 a	45,64 a	12,03 a
Ano 2	7,94 a	0,39 a	2,46 b	38,17 b	10,65 b

\* Médias seguidas pelas mesmas letras na coluna não diferem estatisticamente pelo teste F a 5% de probabilidade de erro.

Na análise de regressão, o comportamento das variáveis com diferença significativa para o fator dose de lodo, foram representadas por funções lineares. Foram registradas quedas acentuadas no pH, Mg, V% e CTC com a aplicação das doses de lodo, e tendência de acúmulo de P no solo (Figura 17).

**Figura 17. Valores médios de P (A), pH (B), Mg (C), e V% (D), na profundidade de 10-20 cm do solo em função de doses de lodo de ETE.**



O resultado para V% foi significativamente menor nas parcelas receptoras de lodo, e teve uma redução ainda maior após a segunda aplicação do produto. A CTC embora não tenha sido alterada significativamente com a aplicação do lodo, apresentou queda acentuada após o segundo ano. Quando comparados aos resultados obtidos em pesquisas com lodo de esgoto, os resultados não corroboram com diversos autores. Nascimento et al. (2004) observaram aumento dos teores de Ca, Mg, K e CTC em solos tratados com diferentes doses de lodo de esgoto. Harrison et al. (1994) também verificaram, mesmo após 15 anos da aplicação de 500 t ha<sup>-1</sup>, que o solo tratado com lodo de esgoto apresentava maiores teores de cálcio e maior CTC do que o solo das parcelas testemunha.

Para Pereira e Garcia (2017), a aplicação de lodo de ETE de indústria alimentícia contribuiu para o aumento da fertilidade do solo, indicado pelo aumento da V%, CTC e MO, além da redução do Al trocável e da saturação por alumínio. Os autores constataram ainda que o lodo utilizado apresentou características adequadas à aplicação no solo de acordo com a Resolução CONAMA nº 375/2006 em relação aos constituintes inorgânicos, bem como não

houve diferença entre as áreas receptoras de lodo e testemunha quanto às substâncias orgânicas potencialmente tóxicas.

Tsutiya et al (2001) cita em seu trabalho que a experiência mundial tem mostrado que, quando os lodos são aplicados na agricultura obedecendo-se às diretrizes fixadas para seu uso, não foram constatados quaisquer efeitos adversos à saúde humana ou ao meio ambiente, decorrentes da aplicação deste ao solo, apesar da variação considerável entre as diretrizes nos países que o utilizam na agricultura. Segundo Salles e Deschamps (1999), a utilização do lodo como fertilizante orgânico em algumas culturas é uma das alternativas mais prováveis para o lodo de esgoto produzido nas áreas urbanas. Para o lodo agroindustrial, isento da fração sanitária, as restrições para utilização agrícola conforme Resolução CONAMA Nº 498/2020 (BRASIL, 2020), são ainda menores, o que pode representar uma solução racional, relativamente de baixo custo e de pequeno risco de impacto ambiental, comparados com as demais alternativas.

#### 4.4 PRODUÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DO BIOCHAR

##### 4.4.1 Rendimento do biochar sob diferentes temperaturas

No processo de pirólise de materiais orgânicos, a temperatura é um dos parâmetros mais importantes e, conseqüentemente, influencia grandemente as propriedades químicas e físicas do biochar (MENDEZ et al., 2013; KIM et al., 2012; TRIPATHI, 2016).

Os melhores resultados foram obtidos com a pirolise do lodo na temperatura de preparo de 400 °C, durante 1 hora. Utilizando temperaturas abaixo de 400 °C, o material não completou o processo de combustão, não sendo possível obtenção do Biochar, assim como acima de 550°C, quando o material entrou em total combustão, não obtendo assim as características desejáveis de biochar. O rendimento do processo foi muito variável: entre 8 e 38% em relação a massa inicial, em base seca (Tabela 21).

**Tabela 21. Rendimento do Biochar de lodo de ETE, conforme a temperatura aplicada e tempo de 1 hora. UTFPR, Pato Branco, 2022.**

<b>Nº lote</b>	<b>Temperatura (°C)</b>	<b>Rendimento Médio (%)</b>
1	400	32,543 ± 3,942
2	450	9,439 ± 0,163
3	500	9,150 ± 0,289
4	550	8,632 ± 0,242

*n* = 3

O resultado está abaixo do rendimento obtido com outros materiais pirolisados. O rendimento do biochar geralmente fica entre 35 e 80% em relação a massa inicial, em base seca (FONTES et al. 2012). LOPES (2013), obteve rendimento variável dependendo da origem do lodo, sendo 44, 52 e 64% de rendimento obtido com lodo de origem industrial, esgoto comercial e residencial, respectivamente. Mantendo o lodo de mesma origem, mas variando a temperatura, a produção do biocarvão reduziu com aumento da temperatura, sendo obtido rendimento de 72,3; 63,7; 57,9 e 52,4% a 300, 400, 500 e 700 °C, respectivamente (HOUSSAIN et al., 2011). Para outros tratamentos, Agrafioti et al. (2013) usando três temperaturas, 300, 400 e 500 °C; juntamente com três tempos de residência, 30, 60 e 90 minutos, o rendimento mínimo foi de 27,3 % a 500 °C, com 90 minutos de pirólise, e a máxima aos 300 °C com rendimento de 62,5 %, com o menor tempo de residência.

Em partes, o rendimento baixo obtido com o biochar foi consequência da umidade do material inicial. A umidade presente na biomassa não só aumenta a energia necessária para atingir a temperatura de pirólise, mas também inibe a formação de carvão. A análise geral desses parâmetros sugere que, para a produção de biocarvão, biomassa com teor de umidade baixo deve ser usada na pirólise (TRIPATHI, 2016). Para o lodo de esgoto, o teor de umidade das amostras, não são considerados críticos para o sistema de produção, porém, a secagem prévia do material deve ser realizadas para melhores resultados (LAIRD et al., 2009).

Quando a temperatura de pirólise é aumentada, o rendimento de biocarvão diminui, pois em baixa temperatura ocorre decomposição e carbonização gradual enquanto em temperatura alta ocorre uma rápida volatilização. Desta forma, para melhor rendimento, é aconselhado o uso de biomassa seca (DEMIRBAS, 2004).

O biochar pirolisado a temperaturas mais altas (até 700 °C), possuem maior estabilidade, maior capacidade de retenção de cátions, bem como maior potencial de redução de gases de efeito estufa se comparados aos pirolisados em temperaturas mais baixas. Estes por

sua vez, são mais semelhantes ao material original, apresentando assim maior capacidade de disponibilizar nutrientes, o que os caracteriza como fertilizantes (BIBAR et al., 2013).

#### 4.4.2 Características químicas e classificação do biochar

A pirólise do lodo de ETE, à temperatura de 400 °C, promoveu aumento nos valores de pH, passando de 5,8 para 7,02. Também foram elevados os teores de nutrientes importantes como P, K, Ca, Mg, e reduzidos os teores de C, S e Fe (Tabela 22).

**Tabela 22. Características agrônômicas do Biochar e do lodo de ETE. Pato Branco, 2022.**

<b>Parâmetros</b>	<b>Biochar de lodo</b>	<b>Lodo de ETE</b>
N (%)	6,72	6,86
P (%)	3,97	3,21
K (%)	0,09	0,06
Ca (%)	1,33	0,29
B (%)	<0,01	0,01
Mg (%)	0,09	0,02
C (%)	16,83	40,80
Relação C/N	2,5	4,10
S (%)	0,03	0,55
Fe (%)	1,02	2,35
pH	7,02	5,8
MO (%)	35,41	76,09
Teor de Umidade (%)	5,4	60

\* Métodos de referência: Manual de Métodos Analíticos Oficiais para Fertilizantes e Corretivos- Edição 2017 – MAPA. ( $n=1$ )

A elevação dos valores de pH no biochar pode ser resultado das maiores concentrações de elementos alcalinos, tais como Ca e Mg, concentração essa favorecida pela crescente volatilização dos elementos C, H, O e N (LOPES, 2013; SINGH et al., 2010). Biocarvões com pH neutro possuem capacidade de restringir a lixiviação de metais tóxicos e melhorar a fertilidade do solo (AGRAFIOTI et al. 2013).

Ocorreu a redução nos teores de C, enquanto o N se manteve. Desta forma a relação C/N do lodo foi reduzida após a pirólise. No entanto, o biochar atendeu ao valores mínimos de

C e N, exigido pela IN 61 – MAPA (Brasil, 2020), para fertilizantes orgânicos simples, que é de 15% e 0,5%, respectivamente.

Lopes (2013), produzindo biochar de lodo de esgoto a 300 °C observou que a pirólise promoveu maior concentração dos teores de C e N, em relação ao lodo de esgoto centrifugado. No entanto, a 400°C, não ocorreram alterações significativas em ambos os elementos, e após 500°C, a pirólise promoveu diminuição de C e N. Esse padrão de alteração do N também foi verificado por outros autores, com maior concentração desse elemento no biocarvão pirolisado a 300 °C e diminuição dos teores com o aumento da temperatura (YUAN et al., 2013; AGRAFIOTI et al., 2013).

Quanto aos teores mínimos exigidos pela IN 61 – MAPA (Brasil, 2020), para utilização agrícola, a pirólise favoreceu na concentração de Ca, o qual aumentou de 0,29% para 1,33%, passando a atender o teor mínimo (1%). Os demais parâmetros não tiveram variação significativa quando comparado com o lodo de origem, sendo mantido o atendimento mínimo para os parâmetros N, P, Cu, Se e Zn, e permanecendo abaixo dos níveis mínimos exigidos para fertilizantes: K, Mg, S e B. Desta forma, reforça-se a necessidade de enriquecimento do material caso o objetivo venha a ser a comercialização com finalidade agrícola do lodo ou do biochar.

A pirólise é um processo flexível, o que significa que, alterando os parâmetros operacionais, a distribuição dos produtos da pirólise pode ser alterada (TRIPATHI, 2016). A temperatura da pirólise afeta as propriedades agrônômicas do biochar, sendo que a quantidade de matéria volátil do resíduo diminui e o pH aumentam com o aumento de temperatura (HOSSAIN et al. 2011). A composição química e estrutural do biocarvões em geral são altamente heterogêneas e dependentes da combinação da matéria-prima e das condições de pirólise, mas o pH é normalmente maior que 7 (TRAZZI, 2018). Considerando a predominância de solos ácidos no Brasil, a característica de pH próximos à neutralidade do biochar eleva o seu potencial para uso agrícola.

As características do biochar variam muito dependendo do seu material de origem e processo de pirólise utilizado. Materiais de origem animal, como dejetos, tendem a ter maior pH em comparação àqueles advindos de material vegetal, assim como maior quantidade de nutrientes, como N, P, K, S, Ca, Mg, devido à sua constituição química inicial, porém com menor quantidade de C (SINGH et al., 2010).

Quanto aos elementos com limites estabelecidos pela Resolução CONAMA 498 (BRASIL, 2020), a pirólise do lodo resultou em maior concentração para: Ba, Cd, Pb, Cu e Cr, e redução nos teores de As, Se e Zn em comparação com o lodo centrifugado. No entanto,

ambos os materiais (lodo centrifugado e biochar) não ultrapassaram os limites permitidos (Tabela 23).

**Tabela 23. Características do Biochar de lodo de ETE e limites permitidos para aplicação no solo, conforme Resolução CONAMA 498 (BRASIL, 2020).**

<b>Parâmetros</b>	<b>Biochar de lodo (mg kg<sup>-1</sup>)</b>	<b>Limites - CONAMA 498/2020 (mg kg<sup>-1</sup>) (Classe 1)</b>
As	<0,01	41
Ba	58,8	1300
Cd	0,47	39
Pb	13,9	300
Cu	0,07	1500
Cr	85,63	1000
Hg	<0,03	17
Se	<0,1	36
Zn	0,21	2800

\*Métodos de referência: As, Ba, Cd, Pb, Cr, Hg, Se – EPA 3050 B; Cu e Zn – Manual de Métodos Analíticos Oficiais para Fertilizantes e Corretivos- Edição 2017 – MAPA.

A alta afinidade do Cu com a MO pode fazer com que este nutriente se eleve durante o processo de pirólise. Isso ocorre através do processo de desidratação e despolimerização do material, que altera as estruturas orgânicas deixando o elemento em forma mais disponível para as plantas. O mesmo comportamento pode ocorrer com o Zn, que além de metal potencialmente tóxico é um micronutriente essencial ao desenvolvimento das plantas, sendo sua disponibilidade, portanto, desejada, desde que não seja em quantidades excessivas causando toxicidade (BIBAR et al., 2013). Quando aplicados ao solo, A maioria dos metais pesados, como Cu e Zn, se acumulam na camada superficial, devido a elevada camada de adsorção, principalmente nas partículas orgânicas do solo (FAVRETTO, 2019).

Os teores de Ca, Fe, Mg, S, Cu e Zn, variam com a temperatura devido à sua volatilidade (NÓBREGA, 2011). O aumento da temperatura também proporciona o aumento de elementos-traço que estejam presentes, Cd, Cu, Fe, Mn e Zn, mas a sua biodisponibilidade

para a planta é muito baixa, diminuindo com o aumento da temperatura. Isto deve-se à mudança das suas formas químicas durante o processo (NÓBREGA, 2011).

Considerando os resultados das amostras analisadas, a classificação do biochar do lodo, enquadrou-se na mesma classificação do lodo de origem:

- NBR 10004/2004 (ABNT, 2004): Classe II – A (não perigoso, não inerte);
- Resolução CONAMA Nº 498 (BRASIL, 2020): bio sólido Classe I (análise química), bio sólido Classe A (análise microbiológica);
- IN nº 61- MAPA (BRASIL, 2020): Classe A (Matéria-prima isenta de contaminantes sanitários). Necessário enriquecimento (K, Mg, S e B) para que seja considerado um fertilizante.

A nível internacional, a proposta de certificação de biochars para países europeus e descritas no European Biochar Certificate - EBC (EBC, 2015), recomenda teores de C  $\geq 50\%$  e as normas propostas pelo International Biochar Initiative (IBI) (IBI, 2015) classifica os biochars em classes, sendo a classe 2 aqueles que apresentam teores de C  $\geq 30\% < 60\%$  e classe 1 com teores de C  $\geq 60\%$ . Seguindo estes critérios, o biochar de lodo não atende os requisitos mínimos. Desta forma, o material obtido não seria passível de certificação, pelo IBI (2015).

Biochars com teores de C abaixo de 50% já foram descritos pela literatura científica quando utilizados biomassa de casca de eucalipto e palha de café (BARBOSA, 2016), de casca de arroz (JIDO, 2014) e biomassa de eucalipto (TRAZZI, 2018). Teores elevados de C, indicam que provavelmente o biochar possui maior recalcitrância, ou seja, maior resistência a degradação comparativamente aos demais.

Para compensar o baixo teor de C do biochar produzido, sugere-se realizar o do enriquecimento do lodo de ETE com outros materiais ricos em C, como palha, serragem ou podas de árvores, entre outros. Também seria favorável, reduzir o teor de umidade da massa de lodo, através de pré-secagem ou a transformação do lodo em pellets, impedindo assim a compactação do material durante antes e durante a pirólise, objetivando melhor rendimento do biochar e relação C/N.

Importante destacar que apesar de todos os pontos positivos, a produção de biochar em temperaturas elevadas, demanda quantidade de energia significativa, além da necessidade de inserção no mercado nacional, de equipamento adequados para a conversão de biomassas em biochar. A análise do custo para produção de biochar está em estágio de desenvolvimento, uma vez que sua produção no país é incipiente e os processos de pirólise para esse fim não são amplamente aplicados no mercado. Há poucos estudos que realizam uma avaliação abrangente



dos custos no ciclo de vida do sistema energético baseado em biochar e que considere cada etapa do ciclo de produção e uso (MARCELINO et al., 2020).

Outra restrição ao processo seriam as possíveis emissões atmosféricas nocivas. No entanto, em comparação com os processos de incineração e combustão, que são altamente exotérmico, a pirólise é bastante endotérmica, o que é menos poluente, pois concentra os metais pesados em um resíduo sólido carbonáceo (FYTILI; ZABANIOTOU, 2008). Além disso, a introdução de novas tecnologias de controle de emissões gasosas pode minimizar os efeitos adversos (FYTILI; ZABANIOTOU, 2008; MARCELINO et al., 2020).

A tecnologia do biochar traz benefícios não só no tratamento de resíduos, mas também no uso como matéria-prima com valor agregado. Em um sistema de gestão de resíduos orgânicos, ele ajudaria nas questões ambientais e sanitárias relacionadas ao processamento, armazenamento, transporte e uso dos resíduos para fins agronômicos. Ao submeter a pirolise os resíduos os nutrientes ficam concentrados, há imobilização de metais tóxicos na forma de óxidos e silicatos, não são mais gerados odores desagradáveis no armazenamento, são sanitariamente seguros, facilitando assim o seu transporte e manuseio (PHAM et al., 2013). Desta forma, e considerando os resultados obtidos com o biochar de lodo, considera-se que esta é uma alternativa que atende as exigências legais para melhor aproveitamento deste material.

## 5. CONCLUSÕES

O lodo utilizado no presente estudo apresenta características aceitáveis à disposição agrícola, quanto a concentração dos constituintes orgânicos e inorgânicos. O lodo foi classificado como Classe II - A (não perigoso, não inerte), conforme a classificação dos resíduos, NBR 10004/2004. Como bio sólido Classe I (análise química) e bio sólido Classe A (análise microbiológica), para a Resolução CONAMA N° 498 (BRASIL, 2020) e como matéria-prima Classe A para fertilizantes, para a IN n° 61- MAPA (BRASIL, 2020).

As análises do lodo, das cinzas e do solo, permitiram definir das doses do experimento de campo para as culturas selecionadas, em 0, 20, 40, 60, 80 t ha<sup>-1</sup>.

A aplicação de lodo, teve efeito positivo sobre a fertilidade do solo e produção das culturas, promovendo resposta significativa para MS das culturas da aveia e milho e NV, AP, DC e PROD, na cultura da soja, para os dois anos agrícolas, 2019-2020 e 2020-2021, principalmente na dose 60 t ha<sup>-1</sup> nos dois anos agrícolas.

No solo, de maneira geral, ocorreu aumento nos valores de P e redução nos teores de K, Mg, V e pH, nos tratamentos com as maiores doses do lodo aplicadas (40, 60 e 80 t ha<sup>-1</sup>), os quais foram demandados pelas culturas. P e MO se elevaram após o segundo ciclo agrícola, sobretudo nas camadas mais superficiais do solo, enquanto o Ca reduziu após o segundo ciclo agrícola. O fato demonstra a necessidade de incremento adicional de nutrientes ao lodo, para seu melhor desempenho como fertilizante agrícola.

A produção do Biochar a partir do lodo de ETE mostrou-se possível, sendo o melhor rendimento obtido na temperatura de 400°C durante 1 hora.

A pirólise do lodo resultando em maior concentração dos elementos: Ca, Cd, Pb, Cu e Cr, e redução nos teores de As, Se e Zn em comparação com o lodo centrifugado. O biochar apresentou qualidade requerida para possível utilização agrícola, apresentando a mesma classificação do lodo de origem, porém apresentou baixo teor de C, não sendo passível de certificação internacional. Sugere-se o enriquecimento do lodo de ETE com outros materiais ricos em C, afim de obter um biochar de melhor qualidade.

O aproveitamento dos lodos industriais na agricultura crescerá nos próximos anos, essencialmente devido aos avanços da legislação aplicável e ao aumento da sua geração dado pelo crescimento do setor e melhoria nos sistemas de tratamento. O conhecimento das suas potencialidades, certamente trará benefícios à agricultura e à economia circular, e será uma alternativa importante à gestão dos resíduos gerados nas agroindústrias.

## 6. REFERÊNCIAS

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR-10004/2004 - Resíduos sólidos – Classificação**. Segunda edição. Rio de Janeiro, RJ, 2004.

AGRAFIOTI, E. et al., **Biochar production by sewage sludge pyrolysis**. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, 2013. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jaap.2013.02.010>.

ALVAREZ-CAMPOS, et al. **Biochar and mill ash improve yields of sugarcane on a sand soil in Florida**. Agriculture, Ecosystems and Environment 253, 2018, pg. 122–130. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2017.11.006>.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE PROTEÍNA ANIMAL (ABPA). **Relatório Anual 2021**. Disponível em: <https://abpa-br.org/wp-content/uploads/2022/05/Relatorio-Anual-ABPA-2022-vf.pdf>>. Acesso: Ago. 2022.

AVISITE – Portal da Avicultura. **Projeção do MAPA: em uma década, produção de carne de frango pode crescer perto de 4% ao ano**. Campinas, SP- 2021. Disponível em: <https://www.avisite.com.br/projecao-do-mapa-em-uma-decada-producao-de-carne-de-frango-pode-crescer-perto-de-4-ao-ano/>. Acesso: Mai. 2022.

BARBOSA, C. F. **Caracterização de biocarvões de palha de café e casca de eucalipto produzidos a 350 e 600 °C**. 2016. 77 f. Dissertação (Mestrado em Produção Vegetal) - Universidade Federal do Espírito Santo, Alegre. 2016.

BALDOCK, J.A.; SMERNIK, R.J. **Chemical composition and bioavailability of thermally altered *Pinus resinosa* (Red pine) wood**. Organic Geochemistry, v. 33, p. 1093-1109, 2002. [https://doi.org/10.1016/S0146-6380\(02\)00062-1](https://doi.org/10.1016/S0146-6380(02)00062-1)

BRASIL, 2009. **Resolução CONAMA N° 420/2009**. Dispõe sobre critérios e valores orientadores de qualidade do solo quanto à presença de substâncias químicas e estabelece diretrizes para o gerenciamento ambiental de áreas contaminadas por essas substâncias em decorrência de atividades antrópicas. Conselho Nacional do Meio Ambiente - CONAMA Brasília, DF, 2009.

BRASIL, 2010. **LEI FEDERAL 12.305/2010 - Política Nacional de Resíduos Sólidos**. Diário Oficial da República Federativa do Brasil, Brasília, DF, 02/08/2010.

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

BRASIL, 2020. **INSTRUÇÃO NORMATIVA Nº 61 , de 08 de julho de 2020**. Estabelece as regras sobre definições, exigências, especificações, garantias, tolerâncias, registro, embalagem e rotulagem dos fertilizantes orgânicos e dos biofertilizantes, destinados à agricultura. MAPA - Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento - Secretaria de Defesa Agropecuária.

BRASIL, 2022. **DECRETO Nº 10.991, DE 11 DE MARÇO DE 2022**. Institui o Plano Nacional de Fertilizantes 2022-2050 e o Conselho Nacional de Fertilizantes e Nutrição de Plantas. Ato: Decreto 10991/2022. Brasília, 11 de março de 2022.

BIBAR, M.P.S.; COSCIONE, A.R.; ANDRADE, C.A. **Disponibilidade de Cu, Zn, Cr e Cd em resíduos orgânicos e biocarvões pirolisados a 400 °C e 700 °C**. In: Congresso Brasileiro de Ciências do Solo, Florianópolis-SC, 2013.

BONFIM-SILVA, E.M; et al. **Características produtivas e eficiência no uso de água em rúcula adubada com cinza vegetal**. Enciclopédia Biosfera, Centro Científico Conhecer - Goiânia, v.7, n.13, 2011.

BONFIM-SILVA, E. M., et al.. **Cinza vegetal: características produtivas e teor de clorofila do capim-marandu**. Bioscience Journal, Uberlândia, v. 29, n. 5, p. 1215-1225, 2013.

CAFFAGNI, L.C. **Um olhar sobre o mercado de fertilizantes**. Rev. AGROANALYSIS. Pg. 27-30. Abr. 2022

CALIGARIS, B. S. A., et al. **A importância do Plano Nacional de Fertilizantes para o futuro do agronegócio e do Brasil**. Carta da Agricultura. Revista de Política Agrícola. Nº 1 – Jan./Fev./Mar. 2022

CALEGARI, A. **Sequestro de carbono, atributos físicos e químicos em diferentes sistemas de manejo em um Latossolo Argiloso do Sul do Brasil**. 2006. 191 f. Tese (Doutorado em Agronomia) – Universidade Estadual de Londrina, Londrina, 2006.

CASALI, Carlos Alberto. **Sistemas de culturas sob diferentes manejos por longa duração alteram as formas de fósforo do solo?** Universidade Federal de Santa Maria. Tese (doutorado). Programa de Pós-Graduação em Ciências do Solo. Santa Maria, RS, 2012.

CEFSPE – Comissão Estadual de Fertilidade do Solo de Pernambuco. **Recomendação de adubação para o estado de Pernambuco: 2ª Aproximação**. Recife: IPA, 1998. 198p.

CEPEA - Centro de Estudos Avançados em Economia Aplicada. **Evolução da avicultura no Brasil**. Informativo – Análise trimestral. Universidade de São Paulo – USP; Escola Superior de Agricultura Luiz Queiroz. Ano 1 – Edição 1- 4º trimestre, 2014.

CHIARELOTTO, M. et al. **Composting organic waste from the broiler production chain: A perspective for the circular economy.** Journal of Cleaner Production. Volume 329, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.129717>.

COGGER, S.G.; FORGE, T.A.; NEILSEN, G.H. **Biosolid recycling: nitrogen management and soil ecology.** Canadian Journal of Soil Science. 86, 613- 620, 2006.

CONAB – Companhia Nacional de Desenvolvimento. Boletim da safra de grãos. Set-out, 2022.

CONNOLLY, E. L.; GUERINOT, M. L. **Iron stress in plants.** Genome Biology 1024.1–1024.4. 2002.

DEENIK, J.L.; COONEY, M.J. **The potential benefits and limitations of corn cob and sewage sludge biochars in an infertile Oxisol.** Sustainability, 2016. <https://doi.org/10.3390/su8020131>.

DEMIRBAS A. **Effects of temperature and particle size on biochar yield from pyrolysis of agricultural residues.** Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, 2004; V.72(2): Pg. 243-248. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2004.07.003>.

DOLORES-SILVA, et al. **Processo de estabilização de resíduos orgânicos: vermicompostagem versus compostagem.** Química Nova. Universidade de São Paulo, vol.36 no.5, São Paulo, 2013. <https://doi.org/10.1590/S0100-40422013000500005>

EBC - EUROPEAN BIOCHAR CERTIFICATE. **Guidelines for a sustainable production of biochar.** Version 6.3E, 2015.

EMBRAPA - EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA . **Manual de métodos de análises de solo.** 2.ed. Rio de Janeiro, Ministério da Agricultura e do Abastecimento, 1997. 212p.

EMBRAPA - EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes.** 2.ed. rev. ampl. Brasília - DF, Ministério da Agricultura e do Abastecimento, 2009. 627p.

EMBRAPA - EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Sistema brasileiro de classificação de solos.** 3.ed. Brasília, 2013. 353p.

EMBRAPA - EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Sistema de produção 3: cultivo do milho.** 5ª edição. EMBRAPA MILHO E SORGO. Abril de 2016

FAVARETTO, NERILDE. **Aplicação de resíduo orgânicos na agricultura: cuidados com a qualidade da água e do solo.** In: Manual de manejo e conservação do solo e da água para o

estado do Paraná BERTOL, O.J. et al. (editores) 1. Ed.. . Curitiba: Núcleo Estadual do Paraná da Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2019. 325p.

FEITOSA, A. A., et al. **Caracterização química de amostras de biocarvão de casca de banana e bagaço de laranja carbonizados a 400 e 600°C**. Rev. Virtual Química, 2020, 12 (4), 901-912. 2020 <http://rvq.sbq.org.br>

FYTILI, D.; ZABANIOTOU, A. **Utilization of sewage sludge in EU application of old and new methods: a review**. Renewable and Sustainable Energy Reviews, Oxford, v. 12, n. 1, p. 116-140, 2008.

FOGAÇA, A. M. et al. **Influência do biochar na disponibilidade de água de um latossolo**. VI Reunião Paranaense de Ciência do Solo – RPCS. Ponta Grossa – PR, 2019.

FONTES, I.; et al. **Sewage sludge pyrolysis for liquid production: A review**. Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 16, p. 2781– 2805, 2012.

FONTANELI, R.S. et al. **FORAGEIRAS PARA INTEGRAÇÃO LAVOURA-PECUÁRIA-FLORESTA NA REGIÃO SUL-BRASILEIRA**. 2. ed. – Brasília, DF : EMBRAPA, 2012. 544 p.

FOY,C.D.; CHANEY, R.L.; WHITE, M.C.. **The physiology of metal toxicity in plants**. *Annual Review of Plant Physiology*, p. 511-566, 1978.

GARCIA, G. O.; et al. **Características químicas de um solo degradado após aplicação de lodo de esgoto doméstico**. Revista verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável, v. 4, p. 1-12.

GOMES, Samuel B. V. et al, **Produtividade e composição mineral de plantas de milho em solo adubado com lodo de esgoto**. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental. v.11, n.5, p.459–465, 2007. <https://doi.org/10.1590/S1415-43662007000500002>.

GWENZI, W.; et al. **Comparative short-term effects of sewage sludge and its biochar on soil properties, maize growth and uptake of nutrients on a tropical clay soil in Zimbabwe**. Journal of Integrative Zimbabwe, 2016.

HANKE, D.; DICK, D.P. **Estoque de carbono e mecanismos de estabilização da matéria Orgânica do solo: uma revisão**. Revista Agropampa, v.2, n.2, julho–dezembro / 2019 - ISSN: 2525-877X2019.

HOSSAIN, M.K.; et al. **Influence of pyrolysis temperature on production and nutrient properties of wastewater sludge biochar**. Journal Environment Management. 92, 223-228, 2011.

IBI - INTERNATIONAL BIOCHAR INITIATIVE: **Standardized product definition and product testing guidelines for biochar that is used in soil.** IBI biochar standards, 2015.

IBRAHIM, H. M., et al. **Effect of Conocarpus biochar application on the hydraulic properties of a sandy loam soil.** Soil Science. v.178: p 165-173, 2013. doi: 10.1097 / SS.0b013e3182979eac

IDE, CARLOS NOBUYOSHI. **Eficiência da estabilização de lodos de ETEs com cal e ferrato(vi) de potássio.** Tese (doutorado). Universidade federal do rio Grande do Sul. Porto Alegre, 1994.

IPC - International Poultry Council (Conselho Internacional de Aves). Meio ambiente e sustentabilidade. Tucker, EUA. Disponível em: <https://internationalpoultrycouncil.org/>. Acesso em: dez de 2022.

JINDO, K.; MIZUMOTO, H.; SAWADA, Y.; SANCHEZ; MONEDERO, M. A.; SONOKI, T. **Physical and chemical characterization of biochars derived from different agricultural residues.** Biogeosciences, 2014.

KIM, P. et al. **Effect of pH on surface characteristics of switchgrass-derived biochar produced by fast pyrolysis.** Chemosphere, 2013, Pág. 2623-2630 <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2012.11.021>.

KIM, H.S.; et al. **Effect of biochar on reclaimed tidal land soil properties and maize (*Zea mays* L.) response.** Chemosphere. 142:153–159, 2016.

KLEIN, C.; AGNE, S.A.A. **Fósforo: de nutriente à poluente!** Rev. Elet. em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental. v(8), nº 8, p. 1713-1721, set-dez, 2012. <http://dx.doi.org/10.5902/223611706430>

Kuki KN, et al. **The simulated effects of iron dust and acidity during the early stages of establishment of two coastal plant Species.** Water Air Soil Pollution 196: 287–295, 2009.

KUNH, Sheila Simone. **Viabilidade técnica e econômica da produção de briquetes de lodo do tratamento primário de efluente avícola e serragem.** Tese (Doutorado), UNIVERSIDADE ESTADUAL DO OESTE DO PARANÁ – UNIOESTE. Cascavel – PR, 2022.

LAIRD, D.; et al. **Biochar impact on nutrient leaching from a midwestern agricultural soil.** Geoderma. 158, 436-442, 2010.

LAMASTRA, Lucrezia; et al. **Sewage sludge for sustainable agriculture: contaminants' contents and potential use as fertilizer.** Chemical and Biological Technologies in Agriculture. Piacenza, Italy, 2018.

LEAL, M. A. A. **Método de avaliação da estabilidade de materiais orgânicos por meio de emissões potenciais de CO<sub>2</sub> e de NH<sub>3</sub>**. Seropédica: Embrapa Agrobiologia, 2020.46 p.

LOPES, J. C.; et al. **Crescimento de *Digitaria ciliaris* em solo tratado com lodo de esgoto bruto e corrigido**. Magistra, Cruz das Almas, v. 19, n. 2, p. 127-134, 2007.

LOPES, H.M. **Caracterização química e física de biocarvão de lodo de esgoto sob diferentes temperaturas de pirólise**. Monografia.. Brasília: Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária, Universidade de Brasília, 2013.

LOTITO, V., SPINOSA, L., SANTORY, M. **Influence of digestion on sludge characteristics**. In: COLIN, F., NEWMAN, P. J., PUOLANNE, Y. J. eds. Recent developments in sewage sludge processing. Brussels: Commission of the European Communities. p.32-40, 1991.

NEPAR-SBCS. **Manual de adubação e calagem para o estado do Paraná**. 2. ed. Curitiba: Núcleo Estadual Paraná da Sociedade Brasileira de Ciência do Solo – NEPAR-SBCS, 2019. 289 p.

MACHADO, G. B. **Planos de gerenciamento de resíduos sólidos para matadouros frigoríficos**. Portal Resíduos Sólidos, 2014.

MARENCO R.A., LOPES N.F. **Fisiologia vegetal: fotossíntese, respiração, relações hídricas e nutrição mineral**. UFV, p.267-297, 2009.

MARSOLA T, et al. **Acumulação de cobre e zinco em tecidos do feijoeiro em relação com o extraído do solo**. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental 9: 92-98, 2005.

MASEK, O.; et al. **Microwave and slow pyrolysis biochar—Comparison of physical and functional properties**. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis. v. 100, p. 41–48, 2013.

MENDEZ, A.; et al. **Effects of sewage sludge biochar on plant metal availability after application to a Mediterranean soil**. Chemosphere, v. 89, p. 1354-1359, 2012.

MENDEZ, A.; TERRADILLOS, M.; GASCÓ, G. **Physicochemical and agronomic properties of biochar from sewage sludge pyrolysed at different temperatures**. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, v. 102, p. 124-130, 2013.

MÉNDEZ-CONTRERAS, J.M.; et al. **Inactivation of high concentration of pathogens in land-applied food industry sludge**. Water SA, v. 35, n. 4; 2009.

MILIEU Ltd, WRc, Risk and Policy Analysts Ltd (RPA). **Environmental, economic and social impacts of the use of sewage sludge on land**. Final Report, Part III: Project Interim Reports; 2010.



MIYAZAWA, M. BARBOSA, G. M. C. **Uso agrícola de resíduos agroindustriais no estado do Paraná.** In: Manual de manejo e conservação do solo e da água para o estado do Paraná BERTOL, O.J. et al. (editores) 1. Ed.. . Curitiba: Núcleo Estadual do Paraná da Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2019. 325p.

MMA – Ministério do Meio Ambiente. [Caderno temático Valorização de Resíduos Orgânicos.](#) 2020.

NIEDZIALKOSKI, R. K., et al. **Combining pre-treatment strategies for broilers industry waste valorization.** journal homepage Heliyon 5, Elsevier Ltd. 2019. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2019.e02351>

OBIA, A. et al. **Biochar application to soil for increased resilience of agroecosystems to climate change in Eastern and Southern Africa.** Springer Nature Switzerland AG 2019. Y. Bamutaze et al. (eds.), Agriculture and Ecosystem Resilience in Sub Saharan Africa, Climate Change Management, [https://doi.org/10.1007/978-3-030-12974-3\\_6](https://doi.org/10.1007/978-3-030-12974-3_6).

O'KELLY, C. B. Geotechnical properties of municipal sewage sludge. Geotechnical and Geological Engineering, Dordrecht, v. 24, n. 4, p. 833-850, 2006. <https://doi.org/10.1007/s10706-005-6611-8>

OLIVEIRA, E.M.; QUEIROZ, S.B. e SILVA, V.F. **Microorganismos em diferentes substratos: composto, vermicomposto e solo.** Revista de Biologia e Farmácia, vol. 5, n. 2, p. 101-106. 2011.

OLIVEIRA, F. C. et al. **Lodo de esgoto: de resíduo a fertilizante orgânico.** Revista Citricultura Atual. N° 129. Pg 28-30,2021

OLIVEIRA I.P., OLIVEIRA L.C. **Metais pesados.** Revista Eletrônica Faculdade de Iporá 1: 59-86, 2011.

OMS – Organização Mundial da Saúde (WHO - World Health Organization). **Health guidelines for the use of wastewater in agriculture and aquaculture.** Technical Report No. 778. WHO, Geneva 1989, 74 p.

OMS – Organização Mundial da Saúde (WHO - World Health Organization). **The risk to health of microbes in sewage sludge applied to land.** EURO Reports and Studies No. 54. Regional Office for Europe, WHO, Copenhagen, 1981.

ONDRASEK, G. et al. **Wood biomass fly ash ameliorates acidic, low-nutrient hydromorphic soil & reduces metal accumulation in maize.** Journal of Cleaner Production, v. 283, 2020.

PACHECO, J. W. **Guia técnico ambiental de frigoríficos - industrialização de carnes**. São Paulo: CETESB. 2008.

PARANÁ – BRASIL, 2006. **Manual técnico de outorgas**. Superintendência de Desenvolvimento de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental – SUDERHSA, 2006.

PARANÁ – BRASIL, 2009. RESOLUÇÃO SEMA Nº 021/09. Dispõe sobre licenciamento ambiental, estabelece condições e padrões ambientais e dá outras providências, para empreendimentos de saneamento. Secretário de Estado de Meio Ambiente e Recursos Hídricos, 2009.

PAZ-FERREIRO, J.; et al. **Soil biochemical activities and the geometric mean of enzyme activities after application of sewage sludge and sewage sludge biochar to soil**. *Biology and Fertility of Soils*. 48, 511–517, 2012.

PEREIRA, A.C.A.; GARCIA M.L. **Efeitos da disposição de lodo de estações de tratamento de efluentes (ETE) de indústria alimentícia no solo: estudo de caso**. *Revista Engenharia Sanitária e Ambiental*, v.22, n.3, p. 531-538.2017.

PEREIRA NETO, J. T. P. **Manual da compostagem: processo de baixo custo**. Viçosa, MG. Ed. UFV, 2007. 81p.

PEREIRA, M.E., et al. **Caracterização da biomassa de cama de frango para fabricação de biochar**. *Rev. Virtual Química*, 2019, 11 (4), no prelo. Data de publicação na Web: 2 de setembro de 2019 <http://rvq.s bq.org.br>

PEREIRA, G. E. et al. **Propriedades físicas de solos sob diferentes sistemas de cultivo de soja em Vacaria, Rio Grande do Sul**. *Brazilian Journal of Development*, Curitiba, v.7, n.6, p. 55838-55850 jun. 2021. DOI:10.34117/bjdv7n6-137

PIRES, I. C. S. A.; et al. **Biochar de Palha de Cana-de-Açúcar: Caracterização e Estudo do Processo**. *Rev. Virtual de Química*, 2018.

PURAKAYASTHA, T. J.; KUMARI, S.; PATHAK, H. **Characterization, stability, and microbial effects of four biochars produced from crop residues**. *Geoderma* (2015) pág.293–303.

Resolução CONAMA Nº 357/2005. Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências.. Data da legislação: 17/03/2005 - Publicação DOU nº 053, de 18/03/2005, pág. 58-63.

Resolução CONAMA Nº 375/2006. Define critérios e procedimentos, para o uso agrícola de lodos de esgoto gerados em estações de tratamento de esgoto sanitário e seus produtos

derivados, e dá outras providência. Data da legislação: 29/08/2006 - Publicação DOU nº 167, de 30/08/2006

SAITO, M.L. **O uso do lodo de esgoto na agricultura: precauções com os contaminantes orgânicos.** Jaguariúna: Embrapa, 2007.

SALLES, R. F. M., DESCHAMPS, C. **Efeito dos teores de metais pesados nos frutos de macieira (*Malus domestica*) submetida à aplicação de lodo de esgotos como fertilizante orgânico.** Sanare, Vol. 11, n. 11, 1999.

SANTOS, C. C. **Cinza vegetal como corretivo e fertilizante para os capins Marandu e Xaraés.** 2012. 127f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Instituto de Ciências Agrárias e Tecnológicas, Universidade Federal de Mato Grosso, Rondonópolis, 2012.

SANTOS, J.T. et al. **Resíduos sólidos orgânicos: uma análise cienciométrica acerca da utilização da compostagem para a geração de adubo.** Research, Society and Development, v. 7, 2018.

SILVA, F.C. et al. **Efeito de lodo de esgoto na fertilidade de um Argissolo Vermelhoamarelo cultivado com cana-de-açúcar.** Pesquisa Agropecuária Brasileira, Brasília, v.36, n. 5, p. 831-840, 2001.

SILVA, W. M.; **Aplicação de biochar de resíduos de café em neossolo regolítico: efeitos nas características químicas e biológicas e na produção de milho.** Dissertação (Mestrado). Garanhuns, Pernambuco, 2016.

SILVA, S.M.C.P; et al. **Principais contaminantes do lodo.** In: ANDREOLI, C.V.; SPERLING, M.; FERNANDES, F. (Eds.). (2001) Lodo de esgotos: Tratamento e disposição final. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental - UFMG, Companhia de Saneamento do Paraná. Cap. 3. 69-122p. (Princípios do tratamento biológico de águas residuárias).

SILVA, C.A.; et al. **Dinâmica de metais pesados em latossolo adubado com lodo de esgoto e em plantas de milho.** In: BETTIOL, W. & CAMARGO, O. (Eds.). (2006) Lodo de esgoto: Impactos ambientais na agricultura. 1ª ed. Jaguariúna: Embrapa. cap. 4, 45-77p.

SILVA, P.H.M.; et al. **Crescimento de *Eucalyptus grandis* tratado com diferentes doses de lodos de esgoto úmido e seco, condicionados com polímeros.** Scientia Forestalis, v. 36, n. 77, p. 79-88, 2008.

SINGH, B.; SINGH, B. P.; COWIE, A. L. **Characterisation and evaluation of biochars for their application as a soil amendment.** Soil Research, v. 48, n. 7, p. 516-525, 2010.

SIKDER S.; JOARDAR J. C. **Biochar production from poultry litter as management approach and effects on plant growth.** International Journal of Recycling of Organic Waste in Agriculture (2019) 8:47–58. <https://doi.org/10.1007/s40093-018-0227-5>

SMITH, S. **Organic contaminants in sewage sludge (biosolids) and their significance for agricultural recycling.** Philosophical Transactions of the Royal Society, v. 367, n. 1904, p. 4005-4041, 2009.

SOUZA, M. L. P.; et al. **Desenvolvimento de um sistema de classificação de terras para disposição final do lodo de esgoto.** In: SIMPÓSIO LUSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL (4: 1994: Florianópolis). Anais... Florianópolis: ABES/APRH, 1994. V. 1, p. 403 - 419.

SOUSA, A.A.T.C.; FIGUEIREDO, C.C. **Sewage sludge biochar: effects on soil fertility and growth of radish.** Biological Agriculture and Horticulture. 12 p., 2015.

PANEPINTO, D., et al. **Thermal valorization of sewer sludge: perspectives for large wastewater treatment plants.** Journal of Cleaner Production, v. 137, p. 1323 – 1329, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.08.014>

TIECHER, T.; RHEINHEIMER, D.S.; CALEGARI, A. **Soil organic phosphorus forms under different soil management systems and winter crops, in a long term experiment.** Soil and Tillage Research, v. 124, p. 57-67, 2012.

TRAZZI, P. A., et al. **Biocarvão: realidade e potencial de uso no meio florestal.** Ciência Florestal. Santa Maria, v. 28, n. 2, p. 875-887, abr.- jun., 2018. DOI: <http://dx.doi.org/10.5902/1980509832128>

TRIPATHI, M., SAHU, J.N., GANESAN, P. **Effect of process parameters on production of biochar from biomass waste through pyrolysis: A review.** Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 55, pp. 467-481, Mar. 2016. » <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.10.122>

TSUTIYA, M.T.; et al.; **Biossólidos na agricultura.** São Paulo: SABESP, p. 468, 2001.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. **Sludge treatment and disposal.** Cincinnati, EPA, 1979. v. 1-2.

VIANA, L.G.; CRUZ, P.S. **Reaproveitamento de resíduos agroindustriais.** IV Congresso Baiano de Engenharia Sanitária e Ambiental. Anais. Cruz das Almas, Bahia, 2016.

VERHEIJEN, F. et al., **Biochar application to soils: a critical scientific review of effects on soil properties, processes and functions.** JRC Scientific and Technical Reports. EUR 24099 EN, 2010.

VON SPERLING, M.; GONÇALVES, R. F. **Lodo de esgoto: características e produção.** In: ANDREOLI, C. V.; VON SPERLING, M.; FERNANDES, F. (Org.) Lodo de esgotos: tratamento e disposição final. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, UFMG; Curitiba: SANEPAR, 2001. 484 p. (Princípios do tratamento biológico de águas residuárias, v. 6). cap. 2, p. 17-67.

VON SPERLING, M. **Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos.** 3 ed. Belo Horizonte: Departamento de engenharia sanitária e ambiental; Universidade Federal de Minas Gerais, UFMG, 2005.