

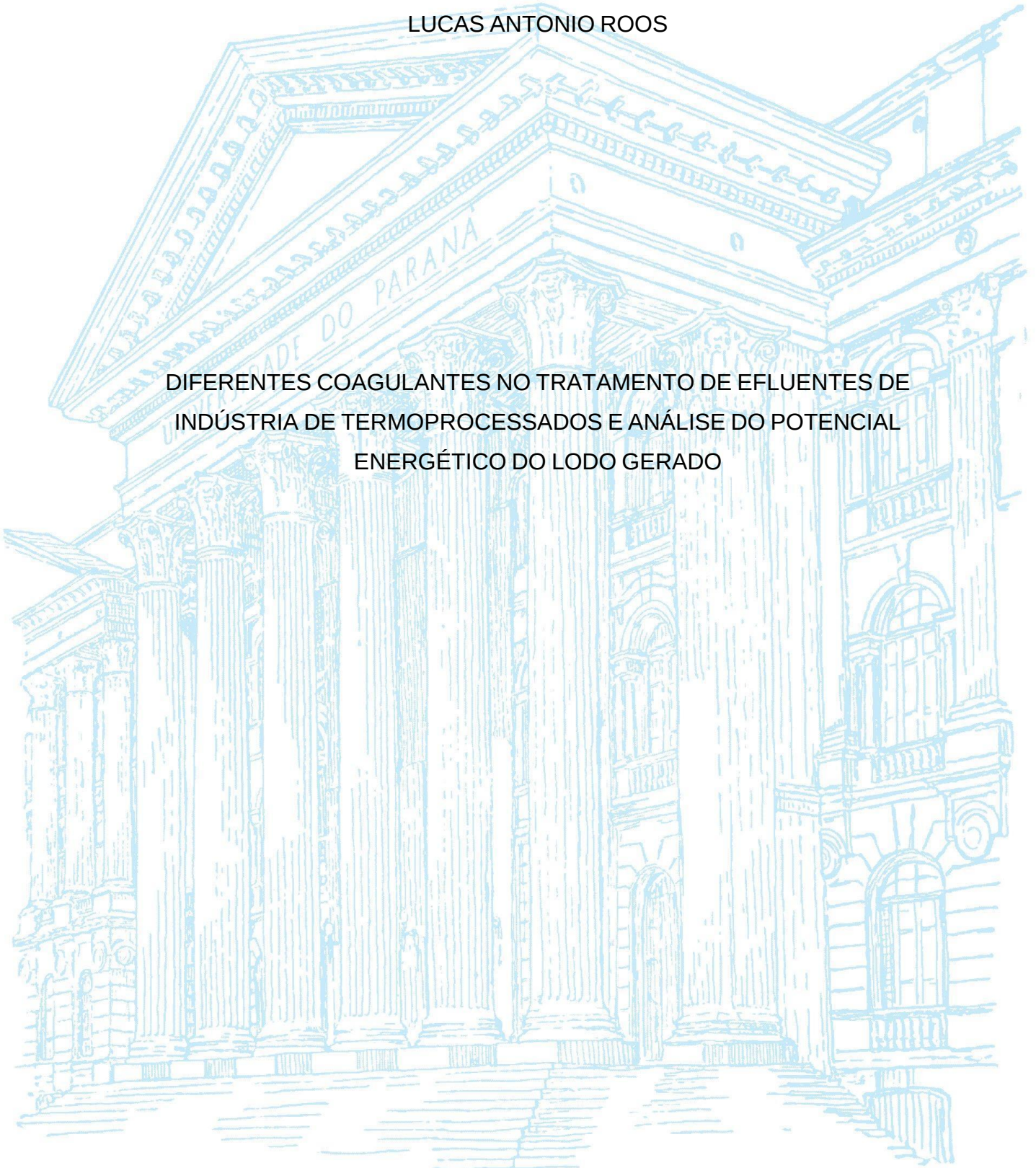
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

LUCAS ANTONIO ROOS

DIFERENTES COAGULANTES NO TRATAMENTO DE EFLUENTES DE  
INDÚSTRIA DE TERMOPROCESSADOS E ANÁLISE DO POTENCIAL  
ENERGÉTICO DO LODO GERADO

PALOTINA

2023



LUCAS ANTONIO ROOS

DIFERENTES COAGULANTES NO TRATAMENTO DE EFLUENTES DE  
INDÚSTRIA DE TERMOPROCESSADOS E ANÁLISE DO POTENCIAL  
ENERGÉTICO DO LODO GERADO

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao curso de Engenharia de Bioprocessos e Biotecnologia, Setor de Palotina, Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Bioprocessos e Biotecnologia.

Orientadora: Profa. Dra. Eliane Hermes

PALOTINA

2023

## **AGRADECIMENTOS**

Aos meus pais e irmãos, pelo apoio, cuidado e educação proporcionados durante toda minha vida para me impulsionar a alcançar meus objetivos.

À minha orientadora Eliane Hermes, por sua dedicação, compreensão e orientação ao longo do desenvolvimento deste trabalho, assim como todo conhecimento passado que me agregaram muito.

Aos meus colegas de graduação e amigos, que compartilharam comigo os desafios, as conquistas e os momentos memoráveis durante nossa jornada universitária.

Agradeço a Gabriel Kegler e Gustavo Calgari, pelo apoio na realização dos experimentos desenvolvidos no Laboratório de Química Analítica e Análises Ambientais.

Aos membros da banca, pela disponibilidade para avaliar e contribuir com este trabalho.

À UFPR Setor Palotina, que proporcionou uma educação pública de qualidade e um ambiente de aprendizado estimulante.

A todos os professores e funcionários do setor que contribuíram para minha formação acadêmica, compartilhando seu conhecimento e me incentivando durante o curso, dentro e fora de aula.

## RESUMO

A avicultura no Brasil é responsável pela terceira maior produção de frango de corte no mundo. Para o processamento dessas aves, unidades industriais utilizam de operações que aplicam altas temperaturas para converter o insumo em produtos seguros, nutritivos e convenientes, os termoprocessados. A industrialização dessa carne gera grandes volumes de efluentes com alta carga orgânica. Com o desenvolvimento de políticas econômicas de proteção ambiental, as agroindústrias buscam desempenho ambiental correto e novas alternativas para o destino desse resíduo podem ser exploradas a fim de reduzir o impacto da atividade. Nesse sentido, pode-se citar a substituição de coagulantes inorgânicos por orgânicos no tratamento primário e o emprego da biomassa residual como fonte de energia. O objetivo deste estudo foi avaliar o uso de diferentes coagulantes no tratamento de coagulação/floculação de efluente de indústria de termoprocessados e analisar o potencial energético do lodo gerado. Inicialmente, o efluente bruto foi caracterizado por parâmetros de alcalinidade, cor, pH e turbidez. Em seguida, realizou-se em Jar Test tratamentos de coagulação e floculação do resíduo empregando um coagulante inorgânico (cloreto férrico) e um coagulante orgânico (tanino SG) em três concentrações: 300, 450 e 600 mg L<sup>-1</sup>. Ao fim dos ensaios, verificou-se a resposta das variáveis do efluente tratado, sendo elas: pH e remoção de cor e turbidez. O lodo gerado por cada tratamento foi quantificado e teve seu potencial energético verificado por análise imediata. Para o pH constatou-se variação maior com o uso de cloreto férrico em relação ao tanino SG, e com o aumento das concentrações de coagulante. Para a remoção de cor, o melhor ensaio foi com tanino SG (300 mg L<sup>-1</sup>) com eficiência de 80,12%. A maior remoção de turbidez foi de 98,21% com o tanino SG (450 mg L<sup>-1</sup>). Quanto ao lodo, o uso de tanino SG (300 mg L<sup>-1</sup>) gerou menos resíduo, com produção de 1,92 g L<sup>-1</sup>. Na análise imediata do lodo, constatou-se conteúdo alto de materiais voláteis (entre 70 e 80%) e baixo de cinzas (entre 10 e 25%) e carbono fixo (entre 5 e 15%). Analisando os efeitos no pH, remoção de turbidez e a geração e caracterização de lodo, o emprego de tanino SG é uma eficiente e sustentável alternativa para coagulantes convencionais, assim como o uso da biomassa de efluente de indústria de termoprocessados é uma opção como fonte de energia renovável.

Palavras-chave: coagulação/floculação; efluente de agroindústria, poder calorífico.

## ABSTRACT

Poultry farming in Brazil is responsible for the third largest production of broiler chicken in the world. To process that meat, industrial units use operations that apply high temperatures to convert the input into safe, nutritious and convenient products, the thermoprocessed ones. The industrialization of this meat generates large volumes of wastewater with a high organic load. With the development of simplified environmental protection policies, agroindustries seek correct environmental performance and new alternatives for the destination of this waste can be explored in order to reduce the impact of the activity. In this sense, there are examples like the substitution of inorganic coagulants for organic ones in the primary treatment and the use of residual biomass as a form of energy. The aim of this study was to evaluate the use of different coagulants in the coagulation/flocculation treatment of effluent from thermoprocessing industry and to analyze the energy potential of the generated sludge. Initially, the raw wastewater was characterized by parameters of alkalinity, color, pH and turbidity. Then, coagulation and flocculation treatments of the residue were carried out in Jar Test using an inorganic coagulant (ferric chloride) and an organic coagulant (tannin SG) in three concentrations: 300, 450 and 600 mg L<sup>-1</sup>. At the end of the tests, the response to the treated wastewater parameters are analysed, namely: pH and removal of color and turbidity. The sludge generated by each treatment was quantified and had its energy potential verified by immediate analysis. For pH, a greater variation was observed with the use of ferric chloride in relation to SG tannin, and with the increase in coagulant concentrations. For color removal, the best outcome was with SG tannin (300 mg L<sup>-1</sup>) with an efficiency of 80.12%. The highest turbidity removal was 98.21% with SG tannin (450 mg L<sup>-1</sup>). As for the sludge, the use of SG tannin (300 mg L<sup>-1</sup>) generated less residue, with a production of 1.92 g L<sup>-1</sup>. In the immediate analysis of the sludge, a high content of volatile materials (between 70 and 80%) and low content of ash (between 10 and 25%) and fixed carbon (between 5 and 15%) were verified. Analyzing the effects on pH, turbidity removal and the generation and characterization of sludge, the use of SG tannin is an efficient and sustainable alternative to conventional coagulants, as well as the use of biomass from thermoprocessing industry effluent is an option as renewable energy source.

Keywords: coagulation/flocculation; agroindustry effluent; calorific value.

## LISTA DE TABELAS

|                                                                                                                                                 |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| TABELA 1 – PARÂMETROS FÍSICO-QUÍMICOS ANALISADOS NO EFLUENTE DE INDÚSTRIA DE TERMOPROCESSADOS E METODOLOGIAS UTILIZADAS.....                    | 20 |
| TABELA 2 – EQUAÇÕES DE ALCALINIDADE.....                                                                                                        | 21 |
| TABELA 3 – TRATAMENTOS APLICADOS NOS ENSAIOS DE COAGULAÇÃO E FLOCULAÇÃO .....                                                                   | 22 |
| TABELA 4 – CARACTERIZAÇÃO DE EFLUENTE DE INDÚSTRIAS DE PROCESSAMENTO DE AVES. ....                                                              | 25 |
| TABELA 5 – pH DO EFLUENTE DE INDÚSTRIA DE TERMOPROCESSADOS APÓS O TRATAMENTO DE COAGULAÇÃO/FLOCULAÇÃO .....                                     | 26 |
| TABELA 6 – ANÁLISE DE VARIÂNCIA (ANOVA) PARA O PARÂMETRO DO pH NOS TRATAMENTOS APLICADOS. ....                                                  | 27 |
| TABELA 7 – TESTE DE TUKEY PARA O PARÂMETRO DO pH NOS TRATAMENTOS APLICADOS. ....                                                                | 28 |
| TABELA 8 – EFICIÊNCIA DE REMOÇÃO DE COR E TURBIDEZ EM EFLUENTE DE INDÚSTRIA DE TERMOPROCESSADOS APÓS O TRATAMENTO DE COAGULAÇÃO/FLOCULAÇÃO..... | 29 |
| TABELA 9 – ANÁLISE DE VARIÂNCIA (ANOVA) PARA EFICIÊNCIA DE REMOÇÃO DE COR E TURBIDEZ NOS TRATAMENTOS APLICADOS. ....                            | 30 |
| TABELA 10 – TESTE DE TUKEY PARA A REMOÇÃO DE COR E TURBIDEZ (%) NOS TRATAMENTOS APLICADOS. ....                                                 | 30 |
| TABELA 11 – PRODUÇÃO DE LODO PARA AS CONDIÇÕES TESTADAS .....                                                                                   | 32 |
| TABELA 12 – ANÁLISE DE VARIÂNCIA (ANOVA) PARA PRODUÇÃO DE LODO NOS TRATAMENTOS APLICADOS. ....                                                  | 33 |
| TABELA 13 – TESTE DE TUKEY PARA PRODUÇÃO DE LODO NOS TRATAMENTOS APLICADOS.....                                                                 | 33 |
| TABELA 14 – ANÁLISE IMEDIATA DO LODO GERADO PARA AS CONDIÇÕES TESTADAS. ....                                                                    | 34 |
| TABELA 15 – ANÁLISE DE VARIÂNCIA (ANOVA) PARA COMPOSIÇÃO QUÍMICA IMEDIATA DO LODO NOS TRATAMENTOS APLICADOS.....                                | 36 |
| TABELA 16 – TESTE DE TUKEY PARA ANÁLISE IMEDIATA NOS TRATAMENTOS APLICADOS.....                                                                 | 37 |

## SUMÁRIO

|          |                                                                        |           |
|----------|------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1</b> | <b>INTRODUÇÃO.....</b>                                                 | <b>7</b>  |
| 1.1      | JUSTIFICATIVA.....                                                     | 8         |
| 1.2      | OBJETIVO GERAL.....                                                    | 9         |
| 1.2.1    | Objetivos específicos.....                                             | 9         |
| <b>2</b> | <b>REVISÃO DE LITERATURA.....</b>                                      | <b>10</b> |
| 2.1      | CADEIA DE PROCESSAMENTO DE AVES.....                                   | 10        |
| 2.2      | TRATAMENTO DE EFLUENTE DE INDÚSTRIA DE<br>TERMOPROCESSADOS.....        | 11        |
| 2.2.1    | Processo de coagulação e floculação.....                               | 12        |
| 2.2.2    | Coagulantes.....                                                       | 14        |
| 2.3      | POTENCIAL ENERGÉTICO DO LODO GERADO NO TRATAMENTO<br>DE EFLUENTES..... | 17        |
| <b>3</b> | <b>MATERIAL E MÉTODOS.....</b>                                         | <b>19</b> |
| 3.1      | DESCRIÇÃO DO LOCAL DE ESTUDO.....                                      | 19        |
| 3.2      | COLETA DO EFLUENTE DE INDÚSTRIA DE<br>TERMOPROCESSADOS.....            | 19        |
| 3.3      | CARACTERIZAÇÃO DO EFLUENTE DE INDÚSTRIA DE<br>TERMOPROCESSADOS.....    | 19        |
| 3.3.1    | pH.....                                                                | 20        |
| 3.3.2    | Alcalinidade total.....                                                | 20        |
| 3.3.3    | Cor.....                                                               | 21        |
| 3.3.4    | Turbidez.....                                                          | 21        |
| 3.4      | ENSAIOS DE COAGULAÇÃO, FLOCULAÇÃO E SEDIMENTAÇÃO.....                  | 21        |
| 3.5      | QUANTIFICAÇÃO DO LODO PRODUZIDO.....                                   | 22        |
| 3.6      | POTENCIAL ENERGÉTICO DO LODO GERADO.....                               | 23        |
| 3.6.1    | Análise imediata.....                                                  | 23        |
| 3.7      | ANÁLISES ESTATÍSTICAS.....                                             | 24        |
| <b>4</b> | <b>RESULTADOS E DISCUSSÃO.....</b>                                     | <b>25</b> |

|     |                                                                                                                 |           |
|-----|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 4.1 | CARACTERIZAÇÃO INICIAL DO EFLUENTE DE INDÚSTRIA DE TERMOPROCESSADOS.....                                        | 25        |
| 4.2 | ENSAIOS PRELIMINARES PARA TRATAMENTO DE COAGULAÇÃO/FLOCULAÇÃO DO EFLUENTE DE INDÚSTRIA DE TERMOPROCESSADOS..... | 26        |
| 4.3 | pH APÓS O TRATAMENTO DE COAGULAÇÃO/FLOCULAÇÃO DO EFLUENTE DE INDÚSTRIA DE TERMOPROCESSADOS.....                 | 26        |
| 4.4 | EFICIÊNCIA DA REMOÇÃO DE COR E TURBIDEZ APÓS O TRATAMENTO DO EFLUENTE DE INDÚSTRIA DE TERMOPROCESSADOS.....     | 29        |
| 4.5 | PRODUÇÃO DE LODO NO TRATAMENTO DE COAGULAÇÃO-FLOCULAÇÃO DO EFLUENTE DE INDÚSTRIA DE TERMOPROCESSADOS.....       | 32        |
| 4.6 | ANÁLISE IMEDIATA DO LODO GERADO NO TRATAMENTO DE COAGULAÇÃO-FLOCULAÇÃO.....                                     | 34        |
| 5   | <b>CONCLUSÃO.....</b>                                                                                           | <b>39</b> |
|     | <b>REFERÊNCIAS.....</b>                                                                                         | <b>40</b> |

## 1 INTRODUÇÃO

A avicultura se estabelece como uma das atividades de maior destaque no atual cenário agroindustrial brasileiro, com uma produção que deve permanecer crescente nos próximos 10 anos a uma taxa de 2,6% ao ano. Com um volume de 14,5 milhões de toneladas da carne produzida, o Brasil detém o primeiro lugar (31,2%) nas exportações mundiais do produto. Dessas exportações, 5% são na forma de produtos processados e 4% na forma salgada (BERNARDO, 2022; MAPA, 2022).

Para obter esses produtos industrializados, o termoprocessamento é um dos processos mais importantes na indústria alimentícia, envolvendo geralmente operações de assamento, torra e fritura. Eles cumprem diversas funções, como segurança alimentar contra patógenos, acréscimo no tempo de prateleira, valor nutricional e qualidade sensorial (WANG, 2019). O desenvolvimento desses produtos é estimulado também pela demanda de consumidores por conveniência e pela necessidade de serviços alimentares, que buscam o mínimo de preparo no local pelo consumidor ou pelos trabalhadores de serviços de alimentação (DAWSON; MANGALASSARY; SHELDON, 2006; BOEKEL et al., 2010; SEMAN et al., 2018).

As agroindústrias responsáveis por lidar com essa matéria-prima têm uma preocupação crescente em manifestar um desempenho ambiental correto, agindo de acordo com legislações cada vez mais rígidas e o desenvolvimento de políticas econômicas que visam à proteção ambiental (SANTOS; PIERRE, 2019; GUEDES et al., 2022). As atividades dessas indústrias geram grandes quantidades de resíduos, que, segundo a Resolução nº430/2011, do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA), só podem ser lançadas diretamente em corpos hídricos após tratamento adequado. O objetivo do tratamento é garantir que o efluente atenda às condições, padrões e requisitos estabelecidos pelo órgão ambiental competente em relação às características do corpo receptor (BRASIL, 2011).

Essas indústrias geralmente utilizam como tratamento primário dos seus efluentes a coagulação. Para alinhar esse método com os princípios da Química Verde, têm se buscado substituir os coagulantes inorgânicos tradicionais por coagulantes orgânicos, uma vez que nessa ciência existe um compromisso com a utilização de produtos com baixa ou nenhuma toxicidade para a saúde humana e o ambiente, que sejam paralelamente eficientes e não tóxicos e que, após seu uso, não persistam no ambiente. Além disso, dá-se preferência à prevenção da geração de

resíduos em vez de tratá-los posteriormente (PRADO, 2003; FARIAS; FÁVARO, 2011; MANGRICH et al., 2013).

Além da substituição dos coagulantes no tratamento dos efluentes, também é possível utilizar o lodo proveniente desse processo como matéria-prima para fins de uso energético por meio de sua combustão, tornando assim o tratamento dos efluentes das indústrias de termoprocessados mais sustentável (GALINKIN, 2009; JÚNIOR, 2013).

## 1.1 JUSTIFICATIVA

O Brasil é o terceiro maior produtor de frangos de corte do mundo, com previsão de aumento de produção de 25,6% na próxima década, chegando a 19,0 milhões de toneladas até 2032 (MAPA, 2022; USDA, 2022). No processamento e industrialização dessa carne, são consumidas grandes quantidades de água, gerando elevados volumes de efluentes (ROSA, 2019). Na fabricação de derivados, há consumo significativo de água para o processo de produção, como por exemplo, para o resfriamento de produtos após cozimentos, assim como para a limpeza de equipamentos e das plantas produtivas (PACHECO, 2006; DIAS; CASTRO, 2012).

Desse modo, o tratamento adequado dos efluentes é essencial para evitar danos ao meio ambiente e à saúde pública. A liberação excessiva de nutrientes e a presença de óleos e graxas nos efluentes reduzem os níveis de oxigênio dissolvido nos corpos d'água, prejudicando a fauna aquática, atividades relacionadas à água e sistemas de tratamento (PACHECO, 2006; STEIN, 2017; SILVESTRE, 2018).

No tratamento primário desses efluentes, em que geralmente realiza-se o processo de coagulação e floculação para remover partículas coloidais, é necessário a adição de um coagulante, que pode ser de caráter inorgânico, sintético ou orgânico (SPERLING, 1996; PAVANELLI, 2011). Os coagulantes inorgânicos têm amplo uso em sistemas de tratamento de água e efluentes industriais devido ao seu baixo custo, qualidade e facilidade de manuseio. No entanto, eles apresentam problemas, como acúmulo e contaminação de metais no solo, efeitos tóxicos em plantas e microrganismos e corrosividade (NUNES, 2001; GONÇALVES; LUDUVICE; SPERLING, 2007). Os taninos são alternativas orgânicas aos coagulantes tradicionais, sendo vantajosos por apresentarem menor geração de lodo, alta

biodegradabilidade e baixa toxicidade, além de serem mais econômicos e seguirem princípios da Química Verde (YIN, 2010; MANGRICH et al., 2013; MUNIZ, 2018).

Além disso, o lodo gerado no tratamento de efluentes pode ser usado como uma fonte de energia renovável, sendo abundante, de baixo custo e alinhado com as políticas de sustentabilidade e preservação ambiental (SANTOS et al., 2012; COUTO, 2014). No Brasil, uma parcela de 48,5% da matriz energética nacional é proveniente de energias renováveis, incluindo essa biomassa residual (EPE, 2021). A queima direta do combustível é o método mais comum para converter esse resíduo em energia (BAZZO, 1995). Para avaliar a eficácia da biomassa nesse uso, pode-se realizar a análise imediata, que determina o teor de material volátil, carbono fixo e cinzas presentes (BRAND, 2010).

A literatura não abrange estudos que investigam o tratamento de coagulação-floculação de efluentes específicos da indústria de termoprocessados, ou outros tratamentos para esse resíduo. Desse modo, analisar a eficiência de diferentes coagulantes para esse efluente e o potencial energético do lodo gerado apresenta relevância, já que é produzido em grandes volumes, exige uma destinação adequada e, como lodo, dispõe de potencial emprego como fonte de energia renovável.

## 1.2 OBJETIVO GERAL

O objetivo da pesquisa foi avaliar o uso de diferentes coagulantes no tratamento de efluente de indústria de termoprocessados por meio de coagulação/floculação e analisar o potencial energético do lodo gerado.

### 1.2.1 Objetivos específicos

- Caracterizar a água residuária de indústria de termoprocessados de acordo com os parâmetros de alcalinidade, cor, pH e turbidez;
- Executar ensaios de coagulação e floculação com coagulante inorgânico (cloreto férrico) e orgânico (tanino SG), em diferentes concentrações;
- Avaliar a eficiência de remoção de cor e turbidez no efluente de indústria de termoprocessados após o tratamento de coagulação e floculação;
- Quantificar a produção de lodo em cada tratamento estudado;
- Avaliar o potencial energético do lodo gerado através da análise imediata.

## 2 REVISÃO DE LITERATURA

### 2.1 CADEIA DE PROCESSAMENTO DE AVES

No panorama mundial, o Brasil está na terceira posição no *ranking* de produção de frangos de corte, com 14,5 milhões de toneladas em 2021, logo atrás da China, com 14,7 milhões de toneladas (USDA, 2022). Em projeções feitas pelo Ministério da Agricultura, a carne de frango deverá ter o maior aumento de produção na próxima década, em 25,6%, chegando a 19,067 milhões de toneladas até 2032 (MAPA, 2022).

Desse montante, anualmente 103,514 mil toneladas são exportadas como industrializados, 160,480 mil toneladas como salgados e 138,852 mil toneladas como embutidos. No cenário nacional, o estado do Paraná é responsável por 35,54% da produção avícola, de modo que mais de um terço dessa carne é produzida no estado (ABPA, 2022).

Dentre as etapas do processamento dessa carne, diversos métodos são empregados para converter o insumo em produtos seguros, nutritivos e convenientes. Muitos deles incluem aplicação de altas temperaturas por um período de tempo para obter produtos de qualidade, tanto para inativar enzimas ou matar patógenos e microrganismos, quanto para intensificar a palatabilidade, o sabor, qualidade nutritiva e tempo de prateleira dos produtos finalizados. Para isso, a produção de termoprocessados empregam operações de enlatamento, assamento, torra, fritura, pasteurização, fervura e cozimento (WANG, 2019).

Quantidades elevadas de água são empregadas do abate ao processamento e, como resultado disso, têm suas características modificadas pelos resíduos gerados nos processos, exigindo o seu tratamento para posterior lançamento em corpos d'água (ROSA, 2019). Para algumas empresas do setor, itens como linguiças empregam de 2 a 5 mil L/t para serem produzidas. Além disso, são consumidas também elevadas quantidades de água no processo de limpeza de equipamentos e da própria planta produtiva (PACHECO, 2006; DIAS; CASTRO, 2012).

## 2.2 TRATAMENTO DE EFLUENTE DE INDÚSTRIA DE TERMOPROCESSADOS

A maioria dos resíduos de indústria de processamento de alimentos possuem características comuns. Apresentam grandes quantidades de materiais orgânicos, como proteínas, carboidratos e lipídios, além de grandes quantidades de sólidos em suspensão, dependendo da fonte. Esses resíduos também têm alta demanda bioquímica de oxigênio (DBO) e demanda química de oxigênio (DQO), alta concentração de nitrogênio, alto teor de óleos e gorduras em suspensão e variações significativas no pH (KROYER, 1995; PACHECO, 2006).

O descarte inadequado desses efluentes em corpos d'água pode trazer diversas complicações ao meio ambiente e à saúde dos seres vivos. O excesso de nutrientes, como fósforo e nitrogênio, estimula o crescimento excessivo de algas e plantas, bloqueando a entrada de luz solar e reduzindo os níveis de oxigênio, podendo ocasionar a mortandade de organismos aquáticos. Além disso, a presença de óleos e graxas nos efluentes pode afetar as trocas de gases entre a água e a atmosfera, diminuindo ainda mais o nível de oxigênio dissolvido. Essas substâncias impactam diretamente a vida aquática, as atividades humanas relacionadas aos corpos d'água e as estações públicas de tratamento de água a jusante (PACHECO, 2006; STEIN, 2017; SILVESTRE, 2018).

Diversos fatores afetam o tipo de tratamento a ser utilizado para determinado efluente. Dentre eles, pode-se citar a qualidade da água bruta, qualidade da água tratada, confiabilidade em processos e equipamentos, condições locais, mão de obra e pessoal especializado, flexibilidade operacional em lidar com mudanças na qualidade da água, limitação de área, disposição dos resíduos, custos de operação e construção, e aspectos políticos (SPERLING, 1996; SCARASSATI et al., 2003; HOWE et al., 2012; FERREIRA FILHO, 2017). Devido a isso, geralmente estações de tratamento de efluentes tradicionais se dividem em quatro etapas, iniciando por métodos físicos, prosseguindo para processos físico-químicos e, posteriormente, biológicos (SPERLING, 1996).

O tratamento preliminar consiste nos sistemas de grades, de caixa de areia e de caixa de gordura, e compreende a remoção inicial de elementos sólidos nos efluentes, como sólidos grosseiros, areia e gorduras, facilitando o transporte do material até a etapa seguinte do processo (SPERLING, 1996; IBRAHIM et al., 2015).

O tratamento primário, por sua vez, objetiva a remoção de sólidos sedimentáveis e parte da matéria orgânica em suspensão, através de processos físico-químicos. Nessa etapa, realiza-se a sedimentação e neutralização da carga do efluente em um tanque de equalização, com o acréscimo de produtos químicos, seguida de processos de floculação e decantação, que levam a separação de sólido (lodo) e líquido (efluente bruto), clarificando o esgoto ao remover partículas que se sedimentam por peso, em flocos ou isoladas. Após essa fase, o efluente ainda apresenta pelo menos 60% da DBO do valor original, exigindo mais esforços para o nível de tratamento ser suficiente para lançamento em corpos d'água (KROYER, 1995; SPERLING, 1996; SENA, 2005; IBRAHIN et al., 2015).

Em seguida, no tratamento secundário, mecanismos biológicos são empregados para remover a matéria orgânica em suspensão fina e como sólidos dissolvidos. Através de reações bioquímicas, microrganismos convertem a matéria orgânica do efluente em gás carbônico e água, retirando também alguns nutrientes como nitrogênio e fósforo. Para isso, utiliza-se de métodos como filtração biológica, lodos ativados, decantação intermediária e lagoas de estabilização (SPERLING, 1996; JORDÃO et al., 1997; PACHECO, 2006; IBRAHIN et al., 2015).

Já o tratamento terciário busca remover complementarmente matéria orgânica, poluentes que as outras etapas não conseguiram remover de modo satisfatório ou ainda poluentes específicos, como compostos não biodegradáveis, patógenos, metais e sólidos inorgânicos dissolvidos (SPERLING, 1996; PACHECO, 2006; IBRAHIN et al., 2015).

### 2.2.1 Processo de coagulação e floculação.

O processo de coagulação consiste em desestabilizar a dispersão de partículas coloidais através da redução das forças de repulsão entre as partículas carregadas negativamente. Isso é alcançado pela adição de um produto inorgânico apropriado, geralmente um sal de ferro ou alumínio, um polímero sintético ou um produto natural, seguido de agitação para garantir a homogeneização da mistura (CORTEZ; LORA; GÓMEZ, 2008; PAVANELLI, 2011; WIMMER, 2007). O processo provoca a coagulação de partículas que causam turbidez e cor ao efluente, de tamanho de 1 nm ( $10^{-9}$  m) a 1000 nm ( $10^{-6}$  m), incapazes de serem sedimentadas

espontaneamente ou removidas por tratamentos físicos convencionais (WIMMER, 2007).

Há diferentes mecanismos que atuam para desestabilizar as partículas coloidais, concomitantemente ou não, sendo os principais adsorção e neutralização; adsorção e formação de pontes; compressão de camada difusa; e varredura.

A adsorção e neutralização ocorre quando a carga elétrica do coagulante é tão diferente do colóide que as interações coagulantes-colóide obtêm uma carga líquida aproximadamente neutra. A adsorção e formação de pontes aproveita de sítios ionizáveis ao longo de coagulantes poliméricos para formar pontes entre as partículas coloidais (PAVANELLI, 2011; HOWE et al., 2012). A compressão de massa difusa desestabiliza as partículas ao adicionar íons de carga contrária a elas, atraindo colóides negativos. A varredura consiste na formação de precipitados de acordo com a quantidade de coagulante, que permite a formação de flocos sem neutralizar as cargas das partículas. Dessa forma, ocorre a formação de flocos maiores e com maior velocidade de sedimentação (WIMMER, 2007; PAVANELLI, 2011).

Diferentes fatores podem afetar a coagulação, como por exemplo o pH - parâmetro crítico para o processo que é diretamente influenciado pelo tipo de coagulante utilizado, pela dose aplicada e pela alcalinidade do meio. A temperatura também pode interferir, alterando a constante de equilíbrio e, conseqüentemente, o pOH para um pH de coagulação específico, além de modificar a viscosidade do efluente e afetar o gradiente de velocidade aplicado na mistura. A natureza, concentração e tamanho das partículas coloidais também são fatores relevantes a considerar (SANTOS et al., 2007; RICHTER, 2009).

A coagulação tem como objetivo intervir diretamente em dois parâmetros físicos: cor e turbidez. O primeiro parâmetro se refere a capacidade da amostra absorver determinadas radiações no espectro visível, e seu aspecto se deve pela presença de substâncias de origem orgânica ou mineral, que podem ser partículas coloidais ou em suspensão (SPERLING, 1996; PAVANELLI, 2001; RICHTER, 2009). Embora a cor da água geralmente não seja um indicador direto de sua qualidade sanitária, ela pode fornecer informações sobre o nível de poluição presente. Quando a cor compromete a limpidez da água, isso pode demonstrar a eutrofização de corpos de água. Além disso, esse parâmetro exige a distinção entre cor aparente, que inclui a turbidez causada por matéria em suspensão, e cor verdadeira, determinada após centrifugação ou filtração prévia (SPERLING, 1996; RICHTER, 2009).

Já a turbidez é uma propriedade ótica baseada no grau de perturbação da passagem de luz por uma amostra, causada por fenômenos óticos de dispersão e absorção (SPERLING, 1996; RICHTER, 2009).

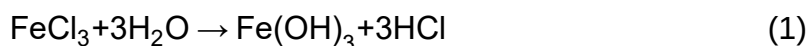
O processo de floculação é essencialmente físico e depende da agregação de partículas desestabilizadas, que perderam sua carga elétrica superficial, bem como dos produtos de precipitação que se formam após a adição do coagulante (HOWE et al., 2007). As partículas presentes no efluente se aglomeram devido a choques entre elas, causados pela introdução ou dissipação de energia cinética, potencial ou térmica às moléculas. Esse processo gera unidades chamadas flocos, que podem ser removidos por etapas subsequentes de sedimentação por gravidade e/ou filtração (MENDES, 1990; RICHTER, 2009).

Existem dois tipos principais de floculação: pericinética e ortocinética. A primeira agrega as partículas transferindo a energia cinética das moléculas do efluente para as partículas coloidais, através do bombardeamento contínuo dessas mesmas moléculas providas de energia térmica. Já a floculação ortocinética estimula o choque entre as espécies através da injeção de gradientes de velocidade sobre o efluente, aumentando a frequência de contato das partículas entre si (MENDES, 1990; RICHTER, 2009).

As dimensões, características e qualidade dos flocos depende de fatores que incluem a quantidade e características das partículas primárias, o tipo e a dosagem de coagulantes e auxiliares de coagulação, o pH durante a coagulação, a temperatura do resíduo líquido, as características do reator, os equipamentos e a intensidade de agitação empregada no processo, e o período de floculação (MENDES, 1990).

### 2.2.2 Coagulantes

Entre os coagulantes inorgânicos, o cloreto férrico ( $\text{FeCl}_3$ ) é um dos mais empregados no tratamento de efluentes, na remoção de fósforo e no condicionamento de lodos (NUNES, 2001). Disponível de forma líquida e sólida, este composto é hidrolisado em contato com a água, gerando hidróxido de ferro, que possui então ação coagulante sobre as partículas (SCHATZMANN, 2009), conforme a equação (1).

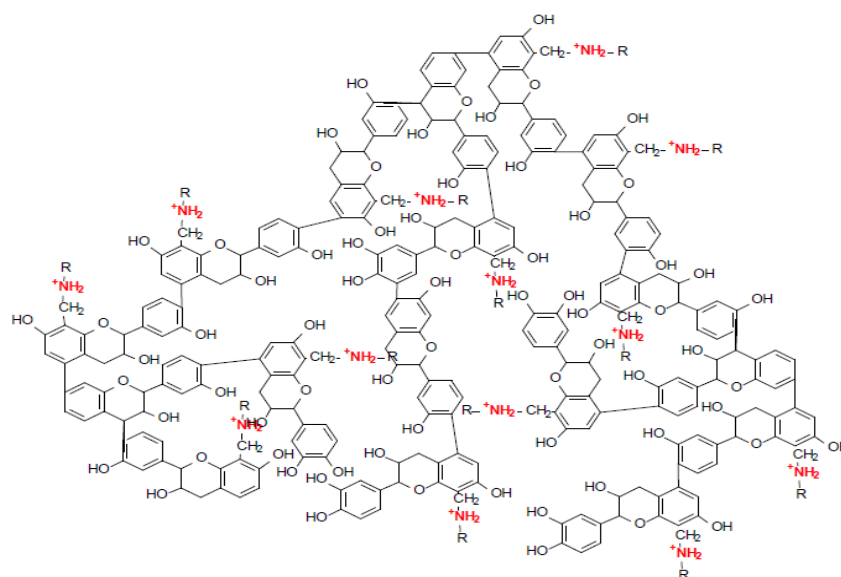


As principais vantagens desse coagulante são sua grande disponibilidade, custo relativamente baixo e eficiência. Ele é capaz de reduzir significativamente a turbidez, a DBO e o teor de óleos e graxas do efluente, bem como remover fosfatos do resíduo líquido (PAVANELLI, 2001; FAGNANI, 2017). Além disso, possui uma ampla faixa de pH (de 5 a 11) em que há formação de bons flocos, superando outros coagulantes químicos à base de alumínio. No entanto, o cloreto férrico é significativamente corrosivo, o que levanta preocupações quanto à sua disposição final e pode causar problemas operacionais, aumentando os custos de manutenção em bombas, tubulações e outras instalações da estação de tratamento (GONÇALVES; LUDUVICE; SPERLING, 2007; OLDONI et al., 2022).

Quanto às alternativas orgânicas a esse produto, destacam-se os taninos. Eles são uma classe de metabólitos secundários de plantas, amplamente difundida pela natureza, estando presente nas folhas, frutos, raízes e cascas. Além disso, são polímeros polihidroxifenólicos, com solubilidade em água e massa molecular entre 500 a 3000 Da. Podem ser classificados em condensados, unidades monoméricas flavonoídicas como flavan-3-ol ou flavan-3,4-diois, e hidrolisáveis, poliésteres que têm ácido gálico como unidade básica (MANGRICH et al., 2013).

A empresa Tanac S.A. é responsável por produzir esse tipo de coagulante, comercializando produtos como TANFLOC SG® e TANFLOC SL®. Esse produto pode ser definido como um polímero orgânico-catiônico de baixo peso molecular, de composição essencialmente vegetal, cujo ingrediente ativo recebe o nome de tanato quaternário de amônio. Ele é eficiente em uma faixa de pH entre 4,5 a 8, mantendo ainda o pH aproximadamente constante. O tanino nesse produto é utilizado na forma condensada, como unidades monoméricas flavonoídicas que formam um polímero catiônico (TANAC, 2016). A Figura 1 demonstra a estrutura polimérica do Tanfloc.

FIGURA 1 – ESTRUTURA POLIMÉRICA DO TANFLOC



FONTE: MANGRICH et al., 2014.

No Brasil, eles podem ser extraídos da casca da acácia negra (*Acacia mearnsii*) e passam por uma preparação por meio da reação de Mannich, transformando o tanino sem carga em um polímero catiônico, que pode então ser empregado como coagulante (MANGRICH et al., 2014; JÚNIOR; ABREU, 2018).

O tanino é comumente utilizado na indústria de curtimento de couro (BELTRÁN-HEREDIA; SÁNCHEZ-MARTÍN, 2009) e, mais recentemente, também passou a ser considerado no tratamento de efluentes (CORAL; BERGAMASCO; BASSETTI, 2009; SOUZA et al., 2016; FRANCIOZI, 2020; OLDONI et al., 2022), uma vez que é capaz de neutralizar cargas e formar ligações entre partículas de sistemas coloidais, levando à formação de flocos e, em seguida, sua sedimentação (CORAL; BERGAMASCO; BASSETTI, 2009).

Os coagulantes orgânicos, como os taninos, representam uma alternativa interessante para o processo de coagulação, visto que oferecem vantagens em relação aos coagulantes inorgânicos, como melhor relação custo-benefício, menor volume de lodo, alta biodegradabilidade e baixa toxicidade, o que facilita o uso do lodo como fertilizante e condicionador de solo (YIN, 2010; MUNIZ, 2018; JÚNIOR; ABREU, 2018). Além disso, segue os princípios defendidos pela Química Verde, ao procurar a síntese de produtos mais seguros e que não persistem no ambiente (MANGRICH et al., 2013).

## 2.3 POTENCIAL ENERGÉTICO DO LODO GERADO NO TRATAMENTO DE EFLUENTES

A biomassa é uma forma indireta de energia solar, convertida em energia química através de processos biológicos. Em termos energéticos, ela consiste em toda matéria orgânica que pode ser utilizada para obter energia (VIRMOND, 2007). Fontes renováveis, como a biomassa, perfazem aproximadamente 15% da matriz energética mundial, segundo dados de 2020, enquanto, no cenário nacional, a participação dessas fontes chega a 48,5% da matriz energética (EPE, 2021).

A geração de energia através de biomassa residual, como o lodo de efluentes, tem a capacidade de promover melhoras na qualidade ambiental e atender a políticas de promoção à sustentabilidade ligadas ao reaproveitamento de resíduos (COUTO, 2014), além do aspecto econômico, visto a abundância e baixo custo dessa fonte de energia (SANTOS et al., 2012).

Variados processos são capazes de aproveitar o conteúdo energético da biomassa, podendo eles ser de caráter bioquímico, como digestão anaeróbia e fermentação, físico-químicos, como transesterificação, ou termoquímicos, como pirólise, liquefação e combustão. O processo de conversão escolhido deve levar em conta as características da fonte de biomassa, razão pela qual é importante conhecer as propriedades físico-químicas da mesma para seu emprego como fonte de energia (VIRMOND, 2007; MÂNICA, 2015).

A combustão direta é a forma mais antiga de utilização da biomassa, consistindo em transferências simultâneas de calor e massa associadas a reações químicas e fluxo de fluidos, que acaba liberando energia através de reações entre carbono, hidrogênio e enxofre na queima de combustíveis sólidos e líquidos (BAZZO, 1995).

Para esse fim, é importante levar em conta algumas características da biomassa, tais como suas propriedades físicas e químicas, incluindo a umidade e o teor de material volátil, carbono fixo e cinzas. Esses atributos podem ser determinados através da análise imediata e, dependendo de sua amplitude, podem afetar significativamente a eficiência energética da biomassa (BRAND, 2010). Uma boa combustão ocorre utilizando um combustível com baixos teores de umidade e cinzas e elevada quantidade de carbono fixo e de material volátil (SENA, 2005; CORTEZ; LORA; GÓMEZ, 2008). Os parâmetros da análise imediata são determinados pelas

normas ASTM Standard Methods for the Ultimate Analysis of Coal and Coke, D3172-73 e D3175-73 (ASTM, 1983).

As cinzas são uma fração residual resultante da combustão da biomassa e da oxidação de componentes inorgânicos (VIEIRA, 2012). Um teor superior de cinzas é capaz de diminuir a eficiência da combustão, pois é consumido mais oxigênio para derreter as cinzas e perde-se calor com a saída de cinzas do reator; dessa forma, a formação de cinzas não contribui para o calor total liberado, diminuindo o valor de poder calorífico superior (PCS) (VIRMOND, 2007; VIEIRA, 2012). Além disso, o teor de cinzas pode gerar problemas operacionais, como a formação de depósitos e incrustações nas caldeiras, além de dificuldades no armazenamento, uso e disposição das cinzas (OBERNBERGER; BRUNNER; BARNTHALER, 2006; VIRMOND, 2007). Portanto, é um parâmetro indicativo importante para a escolha do combustível e a eficiência do processo.

O material volátil consiste nos componentes que são liberados como gás, incluindo a umidade, durante o início da combustão. É composto principalmente de hidrogênio, hidrocarbonetos, monóxido de carbono e dióxido de carbono (MCKENDRY, 2006; SANTOS, 2012). O conteúdo volátil é um parâmetro para medida da reatividade do combustível, visto que, quanto mais volátil o combustível, mais reativo e mais fácil de realizar a ignição (LEWANDOWSKI; KICHERER, 1997). Os voláteis contemplam cerca de 70% do calor na combustão de biomassa; por comparação, o teor de voláteis na combustão do carvão é de apenas 36% (WILLIAMS; JONES; POURKASHIAN, 2012).

O carbono fixo representa a massa amorfa e não volátil que permanece após a eliminação dos componentes voláteis pelo aumento da temperatura, excluindo tanto o teor de cinzas quanto a umidade. Ele, portanto, demonstra a diferença entre esses componentes e a massa total da biomassa (MCKENDRY, 2006; GOMES; OLIVEIRA, 1980). Ele é responsável pela continuidade e estabilidade da combustão, além de servir como parâmetro para a duração da queima da biomassa, já que altos teores de carbono fixo levam a combustões mais demoradas (BRAND, 2010; FAGNANI, 2019).

### 3 MATERIAL E MÉTODOS

#### 3.1 DESCRIÇÃO DO LOCAL DE ESTUDO

O estudo foi conduzido utilizando efluente produzido por uma indústria de termoprocessamento de aves, localizada em um município na região oeste do estado do Paraná, localizado na latitude -24.33708 sul e longitude -53.85680 oeste. A região na qual a cidade está inserida possui clima que varia entre subtropical e subtemperado, com uma temperatura média anual que fica entre 19 °C e 23 °C. Durante o mês mais quente (janeiro), a temperatura varia entre 23 °C a 26 °C, enquanto no mês mais frio (junho) fica entre 14 °C e 18 °C. A precipitação média anual na região é de 1700 mm a 2200 mm (GOMES; WREGE, 2020).

A indústria é responsável por produzir cortes cozidos, fritos e assados de frango em suas três linhas de produção. São produzidos filés grelhados, filés empanados, coxinha de asas empanada, nuggets, entre outros. A produção já alcançou um pico de mais de 50 toneladas de carne de frango industrializadas em um ano.

#### 3.2 COLETA DO EFLUENTE DE INDÚSTRIA DE TERMOPROCESSADOS

O efluente líquido, em estado bruto, foi coletado no dia 10 de abril de 2022, obtendo-se cerca de 40 L do resíduo, dispostos em um galão de 50 L. O frasco foi então conduzido ao Laboratório de Química Analítica e Análises Ambientais da Universidade Federal do Paraná (UFPR) – Setor Palotina e, no mesmo dia, foi realizada a caracterização inicial. Posteriormente, esse resíduo foi distribuído em garrafas PET, que foram armazenadas e refrigeradas para os ensaios.

#### 3.3 CARACTERIZAÇÃO DO EFLUENTE DE INDÚSTRIA DE TERMOPROCESSADOS

Os parâmetros físico-químicos analisados, todos em triplicata ( $n = 3$ ) e suas respectivas metodologias estão dispostos na Tabela 1.

TABELA 1 – PARÂMETROS FÍSICO-QUÍMICOS ANALISADOS NO EFLUENTE DE INDÚSTRIA DE TERMOPROCESSADOS E METODOLOGIAS UTILIZADAS.

| Parâmetro*   | Metodologia**      |
|--------------|--------------------|
| pH           | Potenciometria     |
| Cor          | Espectrofotometria |
| Turbidez     | Turbidimetria      |
| Alcalinidade | Potenciometria     |

\* n = 3

\*\* APHA (2012)

FONTE: O autor (2023).

### 3.3.1 pH

O pH das amostras foi determinado com um pHmetro da marca NS TECNOPON, modelo mPA 110, devidamente calibrado.

### 3.3.2 Alcalinidade total

Para a determinação da alcalinidade total utilizou-se o seguinte procedimento:

- Centrifugou-se a amostra por 3 min a 1500 rpm, e posteriormente transferiu-se 50 mL da amostra centrifugada para um béquer no qual foi medido o pH;
- Titulou-se a amostra, sob agitação magnética, através da adição de solução padronizada de 0,01N de  $\text{H}_2\text{SO}_4$  até pH 5,75. Anotou-se o volume  $V_1$ ; que é utilizado para calcular a alcalinidade parcial, podendo ser aproximada à alcalinidade a bicarbonato, uma vez que compreende 80% de bicarbonato e 20% de sais de ácidos orgânicos voláteis;
- Em seguida, continuou-se a titulação até pH 4,3 e anotou-se o volume  $V_2$ . Essa alcalinidade é denominada intermediária, podendo ser aproximada àquela devida a sais de ácidos voláteis;
- A alcalinidade total foi expressa como  $V_3 = V_1 + V_2$ ;
- Calculou-se as alcalinidades conforme equações da Tabela 2.

TABELA 2 – EQUAÇÕES DE ALCALINIDADE.

| Tipo de alcalinidade | Equação (mg L <sup>-1</sup> , como CaCO <sub>3</sub> )                          |
|----------------------|---------------------------------------------------------------------------------|
| Parcial              | $A_{\text{parcial}} = \frac{V_1 * [H_2SO_4] * 50000}{V_{\text{amostra}}}$       |
| Intermediária        | $A_{\text{intermediária}} = \frac{V_2 * [H_2SO_4] * 50000}{V_{\text{amostra}}}$ |
| Total                | $A_{\text{total}} = \frac{V_3 * [H_2SO_4] * 50000}{V_{\text{amostra}}}$         |

O valor 50.000 é o equivalente-grama do CaCO<sub>3</sub> em mg L<sup>-1</sup>, cujo mol é de 100 g.

A<sub>parcial</sub> = Alcalinidade parcial

A<sub>intermediária</sub> = Alcalinidade intermediária.

A<sub>total</sub> = Alcalinidade total.

V<sub>1</sub> = Volume do ácido utilizado para titular a amostra até pH 5,75 (mL).

V<sub>2</sub> = Volume do ácido utilizado para titular a amostra do pH 5,75 a 4,3 (mL).

V<sub>3</sub> = Volume total utilizado na titulação (mL)

V<sub>amostra</sub> = Volume da amostra.

[H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>] = Concentração padronizada do ácido utilizado na titulação.

### 3.3.3 Cor

Para determinação da cor foi colocada a amostra do efluente, após centrifugação por 3 min a 1500 rpm, em uma cubeta de quartzo para posterior leitura no espectrofotômetro da marca Femto modelo 600s, com o comprimento de onda fixado em 400 nm. Após obtenção do valor da absorbância, este foi utilizado para o cálculo da cor utilizando-se o método de calibração baseado em padrões externos.

### 3.3.4 Turbidez

O turbidímetro da marca Del Lab, modelo DLT-WV, foi calibrado com quatro padrões. Cada amostra foi inserida em uma cubeta de rosca hermeticamente fechada, que foi utilizada para medir o valor da turbidez em unidades nefelométricas (UNT).

## 3.4 ENSAIOS DE COAGULAÇÃO, FLOCULAÇÃO E SEDIMENTAÇÃO

Foram realizados testes prévios de coagulação e floculação em Jar Test utilizando coagulantes inorgânicos, como cloreto férrico e sulfato de alumínio, e orgânicos, como tanino SG e tanino SL. Verificou-se concentrações e tempo de sedimentação comuns a esses tratamentos. Os coagulantes de cada classe com melhor resposta aos tratamentos em diferentes concentrações foram selecionados para os ensaios do presente estudo

As condições adotadas previamente nos ensaios foram: tempo de mistura rápida de 2 min e velocidade de agitação de 120 rpm (coagulação), tempo de mistura

lenta de 15 min e velocidade de agitação de 30 rpm (floculação) e tempo de sedimentação de 20 min. Os ensaios foram executados no equipamento Jar Test, marca Milan 203 M, utilizando-se um volume de 1 L de efluente para cada ensaio.

Nos ensaios, dois coagulantes foram empregados: o cloreto férrico da marca Anidrol (coagulante inorgânico) e o tanino SG Tanfloc SG® (coagulante orgânico). Foram preparados volumes de 50 mL de soluções estoque de 40 g L<sup>-1</sup> de cada coagulante, que foram testados em três concentrações distintas cada um, resultando em 6 tratamentos (Tabela 3), todos realizados em triplicata.

TABELA 3 – TRATAMENTOS APLICADOS NOS ENSAIOS DE COAGULAÇÃO E FLOCULAÇÃO

| Nº do tratamento | Tipo de coagulante | Concentração do coagulante (mg L <sup>-1</sup> ) |
|------------------|--------------------|--------------------------------------------------|
| 1                | Cloreto Férrico    | 300                                              |
| 2                | Cloreto Férrico    | 450                                              |
| 3                | Cloreto Férrico    | 600                                              |
| 4                | Tanino SG          | 300                                              |
| 5                | Tanino SG          | 450                                              |
| 6                | Tanino SG          | 600                                              |

FONTE: O autor (2023).

Após a realização dos ensaios, foram coletadas amostras do sobrenadante clarificado de cada ensaio para a análise dos parâmetros de pH, cor (UC) e turbidez (UNT), utilizando as metodologias descritas na Tabela 1. Em seguida, calculou-se a eficiência de remoção de cor e turbidez utilizando-se a equação (2).

$$\text{Eficiência (\%)} = \left( \frac{X_{\text{inicial}} - X_{\text{final}}}{X_{\text{final}}} \right) \times 100 \quad (2)$$

Em que:

$X_{\text{inicial}}$  = Cor ou turbidez do efluente bruto

$X_{\text{final}}$  = Cor ou turbidez do efluente após o tratamento de coagulação e floculação.

### 3.5 QUANTIFICAÇÃO DO LODO PRODUZIDO

Após os tratamentos de coagulação e floculação, o sobrenadante do efluente clarificado foi retirado com o auxílio de pipetas de 25 mL e, posteriormente, descartado. Já o lodo gerado foi despejado em frascos de poliestireno de 200 mL e armazenado em ambiente refrigerado para secagem, devido ao alto teor de umidade.

Utilizando béqueres de 250 mL, o lodo foi levado para secagem em estufa de circulação de ar, da marca SOLAB e modelo SG-102, onde foi mantido por 24 h a 65 °C, e, em seguida, pesado em balança analítica, da marca SHIMADZU, modelo AY220. A massa da amostra após secagem em estufa é a massa de lodo gerada em 1 L de efluente. Finalizada essa etapa, o lodo seco foi armazenado novamente em frascos de poliestireno de 250 mL e guardado em ambiente refrigerado para análises posteriores.

### 3.6 POTENCIAL ENERGÉTICO DO LODO GERADO

#### 3.6.1 Análise imediata

Para a análise imediata, foi empregada a metodologia de Sánchez (2010). A composição química imediata de cada amostra se refere ao teor de carbono fixo, cinzas e material volátil.

O teor de material volátil foi realizado utilizando uma mufla da marca LABOR e modelo SP-1200, pré-aquecida a uma temperatura de  $850 \pm 20$  °C. Uma amostra de 1 g de lodo seco foi inserido em um cadinho tampado e levado para a mufla. Após 6 min na mufla, cada cadinho foi disposto em um dessecador e, depois de frio, pesado em balança analítica para determinar a massa da amostra, representado pela equação 3.

$$MV (\%) = \left( \frac{M_2 - M_1}{M_2} \right) \times 100 \quad (3)$$

Em que:

$M_2$  = massa inicial do cadinho + amostra, g

$M_1$  = massa final do cadinho + amostra, g

MV (%) = teor de materiais voláteis

O teor de cinzas foi determinado com auxílio da mufla já descrita para medição do teor de material volátil. O processo utilizou uma rampa de aquecimento de 8 °C min<sup>-1</sup> para alcançar 500 °C em 1 h, seguida de uma rampa de aquecimento de 4 °C min<sup>-1</sup>, quando foram introduzidos os cadinhos, sem tampa, com amostra de lodo seco, para atingir 750 °C em 1 h. A essa temperatura, os cadinhos foram mantidos por 2 h

e então foram retirados da mufla para esfriar no dessecador, sendo pesados em balança analítica. A equação (4) foi empregada para determinar o teor de cinzas.

$$CZ (\%) = \frac{Mr}{Ms} \times 100 \quad (4)$$

Em que:

Mr = massa do resíduo, g

Ms = massa seca da amostra, g

CZ (%) = teor de cinzas

Por último, o teor de carbono fixo pode ser determinado de modo indireto, segundo a equação 5.

$$CF (\%) = 100 - (Mv + CZ) \quad (5)$$

Em que:

CF (%) = teor de carbono fixo

Mv (%) = teor de material volátil

CZ (%) = teor de cinzas

### 3.7 ANÁLISES ESTATÍSTICAS

Os dados foram submetidos a análise de variância (ANOVA). Quando verificada diferença estatística, através de probabilidade inferior a 0,05, foi aplicado o Teste de Tukey com 5% de significância, do modo a determinar a influência do coagulante e das concentrações de cada tratamento. Utilizou-se do software Sisvar versão 5.6 para realizar essas análises.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 CARACTERIZAÇÃO INICIAL DO EFLUENTE DE INDÚSTRIA DE TERMOPROCESSADOS

Efluentes de plantas que industrializam carnes geralmente apresentam alta carga orgânica, incluindo teores elevados de proteínas, carboidratos e lipídios, bem como cloretos, nitratos e nitritos, provenientes de soluções de cura, e ainda resíduos detergentes e sanitizantes empregados na limpeza e higienização (PACHECO, 2006). Esses constituintes do efluente correspondem diretamente a sua carga poluidora, cuja concentração depende do tipo de unidade, das práticas operacionais, do *layout* da planta e do tipo de equipamentos e tecnologias em uso (PACHECO, 2006; KRIEGER, 2007).

Os parâmetros da caracterização inicial do efluente bruto podem ser verificados na Tabela 4, assim como os dados de outros efluentes para indústrias de processamento de aves, como abatedouros e frigoríficos, visto que a literatura é escassa quanto a efluente de indústria de termoprocessados.

TABELA 4 – CARACTERIZAÇÃO DE EFLUENTE DE INDÚSTRIAS DE PROCESSAMENTO DE AVES.

| Autores                            | pH      | Cor (UC) | Turbidez (UNT) | Alcalinidade (mg L <sup>-1</sup> ) |
|------------------------------------|---------|----------|----------------|------------------------------------|
| Presente estudo                    | 6,02    | 346,37   | 527,0          | 143,16                             |
| Thirugnanasambandham et al. (2015) | 5,40    | –        | 750,0          | –                                  |
| Bashir et al. (2023)               | 6,90    | 225,50   | 27,0           | –                                  |
| Qasim e Mane (2013)                | 7,30    | 130,00   | 49,5           | –                                  |
| Gomes et al. (2018)                | 6,70    | –        | 600,0–550,0    | –                                  |
| Foucault (2011)                    | 7,91    | –        | –              | 878,00                             |
| Myra et al. (2015)                 | 7,60    | 1885,00  | 233,0          | –                                  |
| Ferrari (2015)                     | 6,58    | 4050,00  | 309,0          | –                                  |
| Rajakumar et al. (2010)            | 7,0–7,6 | –        | –              | 600,00–1340,00                     |

FONTE: O autor (2023).

O pH do efluente foi levemente ácido, e superior apenas ao pH descrito por Thirugnanasambandham et al. (2015). Entretanto, está dentro da faixa prevista pela Resolução N° 430/2011 do CONAMA (BRASIL, 2011) que prevê que deve estar entre 5 a 9 para ser lançado diretamente em corpos hídricos.

A cor e a turbidez do efluente da indústria de termoprocessados do oeste do Paraná está dentro da faixa de valores quantificados por outros autores descritos na Tabela 4. A alcalinidade total do efluente foi significativamente inferior aos trabalhos descritos por Foucault (2011) e Rajakumar et al. (2010), que também apresentaram valores maiores de pH.

#### 4.2 ENSAIOS PRELIMINARES PARA TRATAMENTO DE COAGULAÇÃO/FLOCULAÇÃO DO EFLUENTE DE INDÚSTRIA DE TERMOPROCESSADOS

Entre os produtos inorgânicos testados para o tratamento de coagulação e floculação, o sulfato de alumínio não teve efeito coagulante nesse efluente, enquanto o cloreto férrico clarificou o efluente e resultou na sedimentação de lodo dentro de um tempo de 20 min. Quanto aos coagulantes orgânicos, ambos foram capazes de clarificar o efluente e levar a sedimentação dos flocos; contudo, o tanino SG teve um desempenho aparente superior, resultando em sobrenadante mais clarificado e sedimentação mais efetiva dentro de um tempo de 20 min. O cloreto férrico e o tanino SG tiveram resultados aparentes satisfatórios nas concentrações de 300, 450 e 600 mg L<sup>-1</sup>, mas não promoveram uma clarificação conveniente para a concentração de 150 mg L<sup>-1</sup>.

#### 4.3 pH APÓS O TRATAMENTO DE COAGULAÇÃO/FLOCULAÇÃO DO EFLUENTE DE INDÚSTRIA DE TERMOPROCESSADOS

Na Tabela 5, tem-se os valores de pH final para os tratamentos testados.

TABELA 5 – pH DO EFLUENTE DE INDÚSTRIA DE TERMOPROCESSADOS APÓS O TRATAMENTO DE COAGULAÇÃO/FLOCULAÇÃO

| Coagulante      | Concentração (g L <sup>-1</sup> ) | pH          |
|-----------------|-----------------------------------|-------------|
| Cloreto férrico | 300                               | 5,19 ± 0,05 |
| Cloreto férrico | 450                               | 4,58 ± 0,02 |
| Cloreto férrico | 600                               | 4,20 ± 0,04 |
| Tanino SG       | 300                               | 5,95 ± 0,05 |
| Tanino SG       | 450                               | 5,67 ± 0,02 |
| Tanino SG       | 600                               | 5,65 ± 0,02 |

FONTE: O autor (2023).

Os tratamentos utilizando o cloreto férrico apresentaram uma maior variação no pH entre concentrações testadas em comparação com o uso do tanino como coagulante, sendo que o pH desses últimos ficou mais próximo do pH inicial do efluente. Outros autores verificaram a mesma resposta (PAVANELLI, 2001; THAKUR; SHOUBEY, 2014; ABOULHASSAN, M. et al, 2015).

Os coagulantes convencionais atuam como ácidos em solução, consumindo os bicarbonatos, carbonatos e hidróxidos que promovem a alcalinidade do meio, o que leva a queda o valor de pH; o que não é verificado para coagulantes orgânicos como o tanino (PAVANELLI, 2001). Thakur e Shoubey (2014) pontuaram que a pequena variação com uso do tanino se deve ao caráter orgânico, deixando de consumir a alcalinidade do meio ao não passar por hidrólise e não liberar íons e sais residuais.

Desse modo, a coagulação com o tanino preserva a alcalinidade do efluente, economizando custos com a adição de reagentes e alcalinizantes para ajuste do pH (PAVANELLI, 2001; BELTRÁN-HEREDIA; SÁNCHEZ-MARTÍN, 2009). Isso é especialmente importante para o tratamento secundário, que pode ser realizado em seguida, uma vez que influencia diretamente sobre a atividade dos microrganismos na degradação da matéria orgânica (IBRAHIN, 2015).

A análise de variância (ANOVA) realizada para a resposta do pH nos tratamentos realizados está disposta na Tabela 6.

TABELA 6 – ANÁLISE DE VARIÂNCIA (ANOVA) PARA O PARÂMETRO DO pH NOS TRATAMENTOS APLICADOS.

| Fonte de Variação | GL | SQ   | QM   | F calc  | Prob |
|-------------------|----|------|------|---------|------|
| Tratamento        | 5  | 7,06 | 1,41 | 1324,46 | 0,00 |
| Erro              | 12 | 0,01 | 0,00 |         |      |
| Total Corrigido   | 17 | 7,08 |      |         |      |

GL: Graus de liberdade; SQ: Soma quadrática; QM: Média quadrática; Fcalc: F calculado; Prob: Probabilidade.

FONTE: O autor (2023).

Como o valor da probabilidade foi menor que 0,05, entende-se que os tratamentos são diferentes entre si e, a partir disso, realiza-se o Teste de Tukey, de modo comparar as médias entre os tratamentos executados (Tabela 7).

TABELA 7 – TESTE DE TUKEY PARA O PARÂMETRO DO pH NOS TRATAMENTOS APLICADOS.

| Coagulante      | Concentração (g L <sup>-1</sup> ) | pH               |
|-----------------|-----------------------------------|------------------|
| Cloreto férrico | 300                               | 5,19 ± 0,05<br>c |
| Cloreto férrico | 450                               | 4,58 ± 0,02<br>d |
| Cloreto férrico | 600                               | 4,20 ± 0,04<br>e |
| Tanino SG       | 300                               | 5,95 ± 0,05<br>a |
| Tanino SG       | 450                               | 5,67 ± 0,02<br>b |
| Tanino SG       | 600                               | 5,65 ± 0,02<br>b |

Letras iguais indicam médias iguais para o pH nos tratamentos aplicados (valor de  $p > 0,05$ ).

Fonte: O autor (2023).

Por meio desses resultados, verifica-se que o pH variou em menor grau para o tratamento de tanino SG a 300 mg L<sup>-1</sup>, representado pela letra a. Os tratamentos com o coagulante inorgânico tradicional, que resultaram em pH 4,58 e 4,2 no tratamento de 450 mg L<sup>-1</sup> e de 600 mg L<sup>-1</sup>, respectivamente, obtiveram resultado inferior ao limite permitido para lançamento do efluente (BRASIL, 2011), o que pode ser consequência da presença de metais e sais residuais e do maior consumo da alcalinidade.

Concentrações maiores de coagulantes resultaram em valores de pH mais ácidos para ambos os coagulantes, indicando que os produtos agem baixando o pH e maiores quantidades de coagulante em solução levam a um maior impacto sobre o parâmetro.

Aboulhassan et al. (2015) utilizaram efluente de indústria de tintas para testar a eficiência de tanino e cloreto férrico para os parâmetros de DBO e remoção de cor. Verificou que o pH inicial 7,0 não foi perturbado significativamente pelo uso do coagulante orgânico, que apresentou uma variação de apenas 0,3 entre as concentrações de 200 a 1200 mg L<sup>-1</sup> de coagulante. Já o uso do cloreto férrico teve como consequência a variação do pH à medida que as concentrações aumentaram, atingindo um valor de 4,0 para concentração de 600 mg L<sup>-1</sup>, mostrando uma resposta semelhante ao observado nesse estudo.

#### 4.4 EFICIÊNCIA DA REMOÇÃO DE COR E TURBIDEZ APÓS O TRATAMENTO DO EFLUENTE DE INDÚSTRIA DE TERMOPROCESSADOS

Os valores para eficiência de remoção de cor e turbidez constam na Tabela 8.

TABELA 8 – EFICIÊNCIA DE REMOÇÃO DE COR E TURBIDEZ EM EFLUENTE DE INDÚSTRIA DE TERMOPROCESSADOS APÓS O TRATAMENTO DE COAGULAÇÃO/FLOCULAÇÃO.

| Coagulante      | Concentração (mg L <sup>-1</sup> ) | Remoção de cor (%) | Remoção de turbidez (%) |
|-----------------|------------------------------------|--------------------|-------------------------|
| Cloreto férrico | 300                                | 77,83 ± 0,83       | 84,36 ± 6,53            |
| Cloreto férrico | 450                                | 76,03 ± 0,03       | 89,22 ± 1,87            |
| Cloreto férrico | 600                                | 75,54 ± 5,73       | 97,52 ± 0,39            |
| Tanino SG       | 300                                | 80,12 ± 0,63       | 97,89 ± 1,05            |
| Tanino SG       | 450                                | 74,45 ± 0,21       | 98,21 ± 0,80            |
| Tanino SG       | 600                                | 71,21 ± 1,10       | 98,15 ± 0,32            |

FONTE: O autor (2023).

Tanto o cloreto férrico como o tanino SG atingiram eficiência de remoção da cor do efluente superior a 70% e de turbidez superior a 84% em todos os tratamentos. Ferrari (2015) comparou a eficiência do cloreto férrico, do tanino e outro coagulante orgânico, quitosana, nas condições ótimas para efluentes de indústria de alimentos, observou uma remoção de cor de 95,31% com o tanino e 86,86% com o cloreto férrico, apresentando maior eficiência que o presente estudo. A turbidez, por sua vez, foi removida em 98,08% pelo coagulante a base de tanino, muito próximo dos tratamentos realizados com tanino SG (300, 450 e 600 mg L<sup>-1</sup>) e cloreto férrico (600 mg L<sup>-1</sup>).

Silva (2019) executou testes de coagulação/floculação/sedimentação/filtração utilizando tanto o coagulante orgânico tanino quanto o coagulante inorgânico cloreto férrico para tratamento de água bruta. O autor observou para tempos de sedimentação iguais e superiores a 20 min. uma remoção de cor próxima a 70%, quando empregado o cloreto férrico, e superiores a 80%, quando utilizado o tanino. Já a turbidez ao final da sedimentação foi removida em 92,84% e 85,25%, respectivamente, pelo tanino e o cloreto férrico, revelando uma eficiência inferior ao presente estudo quando emprega-se o coagulante orgânico.

Na Tabela 9 é apresentada a análise de variância (ANOVA) para a eficiência de remoção de cor e turbidez para os tratamentos realizados.

TABELA 9 – ANÁLISE DE VARIÂNCIA (ANOVA) PARA EFICIÊNCIA DE REMOÇÃO DE COR E TURBIDEZ NOS TRATAMENTOS APLICADOS.

| Remoção de cor (%)      |    |        |        |        |      |
|-------------------------|----|--------|--------|--------|------|
| Fonte de Variação       | GL | SQ     | QM     | F calc | Prob |
| Tratamento              | 5  | 136,99 | 27,40  | 4,25   | 0,02 |
| Erro                    | 12 | 77,27  | 6,44   |        |      |
| Total Corrigido         | 17 | 214,26 |        |        |      |
| Remoção de turbidez (%) |    |        |        |        |      |
| Fonte de Variação       | GL | SQ     | QM     | F calc | Prob |
| Tratamento              | 5  | 533,78 | 106,76 | 13,3   | 0,00 |
| Erro                    | 12 | 96,32  | 8,03   |        |      |
| Total Corrigido         | 17 | 630,1  |        |        |      |

GL: Graus de liberdade; SQ: Soma quadrática; QM: Média quadrática; Fcalc: F calculado; Prob: Probabilidade.

FONTE: O autor (2023).

Como verificado na Tabela 9, os tratamentos são estatisticamente distintos entre si para ambos os parâmetros, uma vez que a probabilidade é inferior a 0,05. A partir desse resultado, realizou-se então o teste de comparação de médias de Tukey, exibido na Tabela 10.

TABELA 10 – TESTE DE TUKEY PARA A REMOÇÃO DE COR E TURBIDEZ (%) NOS TRATAMENTOS APLICADOS.

| Coagulante      | Concentração (mg L <sup>-1</sup> ) | Remoção de cor (%) | Remoção de turbidez (%) |
|-----------------|------------------------------------|--------------------|-------------------------|
| Cloreto férrico | 300                                | 77,83 ± 0,83<br>ab | 84,36 ± 6,53<br>b       |
| Cloreto férrico | 450                                | 76,03 ± 0,03<br>ab | 89,22 ± 1,87<br>b       |
| Cloreto férrico | 600                                | 75,54 ± 5,73<br>ab | 97,52 ± 0,39<br>a       |
| Tanino SG       | 300                                | 80,12 ± 0,63<br>a  | 97,89 ± 1,05<br>a       |
| Tanino SG       | 450                                | 74,45 ± 0,21<br>ab | 98,21 ± 0,80<br>a       |
| Tanino SG       | 600                                | 71,21 ± 1,10<br>b  | 98,15 ± 0,32<br>a       |

Letras iguais indicam médias iguais para a eficiência de remoção de cor nos tratamentos aplicados (valor de  $p > 0,05$ ).

Fonte: O autor (2023).

A maior remoção de cor verificada nos tratamentos realizados é representada pela letra a. Nesse caso, a eficiência mais significativa nesse parâmetro foi constatada em todos os tratamentos com cloreto de ferro (300, 450 e 600 mg L<sup>-1</sup>) e nos tratamentos com tanino SG (300 e 450 mg L<sup>-1</sup>). Além disso, os tratamentos com o coagulante convencional são estatisticamente iguais a cada tratamento com o tanino

SG individualmente, permitindo supor que não há diferença nesse parâmetro entre as classes de coagulantes.

Observa-se ainda que apenas os tratamentos com tanino na concentração 300 mg L<sup>-1</sup> (a) e 600 mg L<sup>-1</sup> (b) são diferentes estatisticamente entre si, indicando que o tanino é mais eficiente em concentrações inferiores do que em superiores. Bashir et al. (2023), que investigaram o potencial do tanino como coagulante para tratamento de efluente de frigorífico de aves, chegaram a mesma conclusão, sendo que obtiveram maior eficiência na remoção de cor para concentração de 40 mg L<sup>-1</sup> do coagulante, que reduziu gradualmente com o aumento da sua dose para tratamentos com até 160 mg L<sup>-1</sup>.

Os tratamentos que apresentaram menor turbidez ao final da coagulação e floculação estão representados pela letra a. Observa-se que apenas os tratamentos empregando cloreto férrico em concentrações de 300 e 450 mg L<sup>-1</sup> (b) apresentaram remoção de turbidez estatisticamente inferior ao restante dos tratamentos (a). Assim, é necessário despendar mais coagulante para conseguir a mesma eficiência de concentrações mais baixas de tanino SG. Para Santos (2016), o melhor desempenho do tanino se deve aos flocos gerados pelo coagulante apresentarem uma área de superfície superior, o que possibilita maior agregação entre as unidades e eficiência na remoção de cor e turbidez, como observado para a turbidez no presente estudo.

Entre os tratamentos variando a concentração de tanino não foram observadas diferenças significativas para remoção de turbidez, contrariando o estudo de Thakur e Choubey (2014), que testaram a eficiência do coagulante para tratamento de água. Os autores obtiveram eficiência superior na remoção da turbidez em concentrações mais baixas do tanino, alcançando 91% na concentração de 300 mg L<sup>-1</sup>, podendo ser uma vantagem econômica para o produto.

Werberich (2017), a fim de avaliar a eficiência de coagulantes orgânicos para tratamento de efluente de frigorífico, verificou que a faixa entre 200 a 300 mg L<sup>-1</sup> foi a melhor dosagem, recomendando a escolha pela concentração de 200 mg L<sup>-1</sup>, que minimiza os custos e ainda atinge uma taxa de remoção 50% da cor. Apesar da eficiência inferior, a concentração sugerida se aproxima do tratamento de 300 mg L<sup>-1</sup>, o que indica que essa pode ser uma concentração apropriada para o tanino.

Irfan et al. (2013) procuraram otimizar o tratamento de coagulação-floculação de licor negro de indústria papeleira para os parâmetros de pH, tempo e concentração de coagulantes inorgânicos. Com o aumento de concentrações de cloreto férrico, a

eficiência de remoção de cor também aumentou, chegando a 44% na concentração de 800 mg L<sup>-1</sup>, o que foi menos eficiente do que no presente estudo.

#### 4.5 PRODUÇÃO DE LODO NO TRATAMENTO COAGULAÇÃO-FLOCULAÇÃO DO EFLUENTE DE INDÚSTRIA DE TERMOPROCESSADOS

Na Tabela 11 tem-se a produção de lodo para os diferentes tratamentos realizados.

TABELA 11 – PRODUÇÃO DE LODO PARA AS CONDIÇÕES TESTADAS

| Coagulante      | Concentração (mg L <sup>-1</sup> ) | Produção de lodo (g L <sup>-1</sup> ) |
|-----------------|------------------------------------|---------------------------------------|
| Cloreto férrico | 300                                | 2,15 ± 0,08                           |
| Cloreto férrico | 450                                | 3,20 ± 0,24                           |
| Cloreto férrico | 600                                | 3,69 ± 0,33                           |
| Tanino SG       | 300                                | 1,92 ± 0,11                           |
| Tanino SG       | 450                                | 2,25 ± 0,16                           |
| Tanino SG       | 600                                | 2,57 ± 0,10                           |

FONTE: O autor (2023).

Para as mesmas concentrações, os tratamentos com tanino SG resultaram em menor formação de lodo em comparação aos tratamentos com cloreto férrico, indicando a geração de uma quantidade menor de resíduos sólidos a ser tratada posteriormente. A produção relativamente inferior de lodo é uma vantagem já verificada na literatura (YIN, 2010; MUNIZ, 2018; JÚNIOR; ABREU, 2018).

O lodo gerado pelo emprego do tanino é principalmente favorável devido a composição orgânica do coagulante, sendo altamente biodegradável e pouco tóxico, sem liberar sais e íons residuais para o efluente tratado, possibilitando que a biomassa residual seja utilizada como fertilizante e condicionador na agricultura, por exemplo (YIN, 2010; THAKUR; SHOUBEY, 2014; MUNIZ, 2018). Já o emprego do cloreto férrico pode levar ao acúmulo e contaminação de metais no solo e a efeitos tóxicos em plantas e microrganismos, além de enfrentar legislações cada mais rigorosas, exigindo cautela com o destino dado aos resíduos gerados nesse tipo de tratamento (NUNES, 2001; SENA, 2005; FERRARI, 2015).

A Tabela 12 apresenta a análise de variância (ANOVA) referente à produção de lodo pelos tratamentos aplicados.

TABELA 12 – ANÁLISE DE VARIÂNCIA (ANOVA) PARA PRODUÇÃO DE LODO NOS TRATAMENTOS APLICADOS.

| Fonte de Variação | GL | SQ   | QM   | F calc | Prob |
|-------------------|----|------|------|--------|------|
| Tratamento        | 5  | 6,99 | 1,40 | 38,68  | 0,00 |
| Erro              | 12 | 0,43 | 0,04 |        |      |
| Total Corrigido   | 17 | 7,43 |      |        |      |

GL: Graus de liberdade; SQ: Soma quadrática; QM: Média quadrática; Fcalc: F calculado; Prob: Probabilidade.

FONTE: O autor (2023).

Como pode ser observado, o valor da probabilidade para os tratamentos é menor que 0,05, evidenciando que os tratamentos são estatisticamente diferentes entre si. Com base nesse resultado, foi conduzido o teste de comparação de médias de Tukey, cujos detalhes estão apresentados na Tabela 13.

TABELA 13 – TESTE DE TUKEY PARA PRODUÇÃO DE LODO NOS TRATAMENTOS APLICADOS.

| Coagulante      | Concentração (g L <sup>-1</sup> ) | Produção de lodo (g L <sup>-1</sup> ) |
|-----------------|-----------------------------------|---------------------------------------|
| Cloreto férrico | 300                               | 2,15 ± 0,08<br>bc                     |
| Cloreto férrico | 450                               | 3,20 ± 0,24<br>a                      |
| Cloreto férrico | 600                               | 3,69 ± 0,33<br>a                      |
| Tanino SG       | 300                               | 1,92 ± 0,11<br>c                      |
| Tanino SG       | 450                               | 2,25 ± 0,16<br>bc                     |
| Tanino SG       | 600                               | 2,57 ± 0,10<br>b                      |

Letras iguais indicam médias iguais para produção de lodo nos tratamentos aplicados (valor de  $p > 0,05$ ).

Fonte: O autor (2023).

Os tratamentos que apresentam menor produção de lodo estão representados pela letra c, que nesse caso são os tratamentos com tanino SG nas concentrações de 300 e 450 mg L<sup>-1</sup> e com cloreto férrico na concentração 300 mg L<sup>-1</sup>, indicando que desempenho do cloreto férrico foi inferior ao coagulante orgânico nesse parâmetro. Contrariando esse resultado, Franciozi (2020) obteve uma produção de lodo estatisticamente igual para os tratamentos com tanino e cloreto férrico para efluentes de abatedouro de aves, em todas as concentrações avaliadas.

Entre os tratamentos com coagulante inorgânico, as concentrações maiores de 450 e de 600 mg L<sup>-1</sup> levaram a produções de lodo também superiores, representados pela letra a. O mesmo foi observado com o emprego do tanino, visto que as concentrações de 300 mg L<sup>-1</sup> (c) e 600 mg L<sup>-1</sup> (b) são estatisticamente

diferentes entre si; isso já foi observado por Santos (2016), que pontuou que o produto orgânico promove maior agregação de flocos e, por consequência, facilita que o lodo seja formado e decantado.

#### 4.6 ANÁLISE IMEDIATA DO LODO GERADO NO TRATAMENTO DE COAGULAÇÃO-FLOCULAÇÃO

Na Tabela 14 dispõe-se os teores de materiais voláteis, cinzas e carbono fixo para análise imediata do lodo do processo de coagulação-floculação.

TABELA 14 – ANÁLISE IMEDIATA DO LODO GERADO PARA AS CONDIÇÕES TESTADAS.

| Coagulante      | Concentração<br>(mg L <sup>-1</sup> ) | Teor de materiais<br>voláteis (%) | Teor de cinzas<br>(%) | Teor de carbono<br>fixo (%) |
|-----------------|---------------------------------------|-----------------------------------|-----------------------|-----------------------------|
| Cloreto férrico | 300                                   | 70,69 ± 1,5                       | 21,52 ± 0,52          | 7,79 ± 1,09                 |
| Cloreto férrico | 450                                   | 70,80 ± 1,0                       | 20,20 ± 0,87          | 8,99 ± 0,74                 |
| Cloreto férrico | 600                                   | 68,66 ± 0,2                       | 21,88 ± 0,51          | 9,46 ± 0,53                 |
| Tanino SG       | 300                                   | 79,52 ± 0,7                       | 10,14 ± 1,45          | 10,35 ± 1,76                |
| Tanino SG       | 450                                   | 76,81 ± 0,6                       | 11,05 ± 0,58          | 12,13 ± 0,50                |
| Tanino SG       | 600                                   | 75,87 ± 0,9                       | 11,54 ± 0,23          | 12,59 ± 0,73                |

FONTE: O autor (2023).

Confere-se que, apesar do material volátil compor mais de 70% do lodo em todos os tratamentos, aqueles com o uso de tanino SG demonstraram maior volatilidade, enquanto o lodo resultante do tratamento de cloreto férrico produziu mais de 20% de cinzas nos tratamentos de 300 e 450 mg L<sup>-1</sup>, com 1/5 de sua massa permanecendo como resíduo do processo de combustão. O teor de carbono fixo, aferido indiretamente pela diferença entre os parâmetros de material volátil e cinzas, manteve-se próximo nos diferentes tratamentos.

Sena (2005) empregou o cloreto férrico para otimizar a flotação de efluentes da indústria de processamento de carnes. Avaliando a biomassa gerada pelo coagulante, determinou-se 80,80% de materiais voláteis, 13,46% de carbono fixo e 5,47% de cinzas. O desempenho do lodo gerado pelo cloreto férrico no presente estudo revela-se inferior ao de Sena (2005), pois produz um teor significativamente maior de massa residual na forma de cinzas. Além disso, a biomassa analisada por Sena (2005) é também mais volátil, visto que os presentes tratamentos com coagulante inorgânicos se aproximam de 70% de materiais voláteis para as concentrações testadas. O carbono fixo apresenta valores relativamente próximos

entre as análises imediatas. Contudo, o autor adverte que a presença de cloro durante a queima pode ocasionar na formação de compostos organoclorados, que são poluentes ambientais com efeito genotóxico, recomendando o uso de coagulantes isentos de cloro, como o sulfato férrico (SENA, 2005; COSTA; TEIXEIRA, 2012).

Meneghini et al. (2015) avaliaram a co-combustão de lodo frigorífico primário para aplicar na geração de vapor. Os dados obtidos na análise imediata foram: 64,22% de materiais voláteis, 17,51% de cinzas e 18,26% de carbono fixo. Kim et al. (2018) estudaram a carbonização hidrotérmica de lodo gerado em frigorífico avícola, buscando recuperá-lo para emprego como combustível, sendo que a análise imediata revelou 80,08% de materiais voláteis, 13,35% de cinzas e 6,46% de carbono fixo. Para Bueno (2022), que analisou o potencial energético de óleos residuais e lodo gerados em abatedouros de aves, o resíduo apresentou uma predominância de materiais voláteis de 83,94%, uma proporção de 2,86% de cinzas e 13,31% de carbono fixo.

Esses valores são próximos da análise imediata para os tratamentos com cloreto férrico e tanino SG, com um teor de carbono fixo relativamente próximo. O conteúdo de cinzas foi semelhante ao obtido para testes de ambos os coagulantes e diferentes concentrações, com exceção em Bueno (2022), que rendeu pouca cinza residual. Tanto Kim et al. (2018) e Bueno (2022) apresentaram lodos com maior conteúdo volátil, próximos dos tratamentos com tanino SG para as diferentes concentrações, enquanto Meneghini et al. (2015) obtiveram desempenho inferior em relação aos tratamentos com cloreto férrico para as diferentes concentrações.

Silva et al. (2021), que avaliaram a compactação de lodo seco de efluente de frigorífico avícola para produção de briquetes, teve como resultado médio da análise imediata conteúdos de 11,33% de cinzas, 60,8% de carbono fixo e 27,86% de material volátil. Já Pandey e Thakur (2020), ao analisar o lodo gerado em indústria de papel após o tratamento do efluente por eletrocoagulação, verificaram na base seca teor de 57,74% de materiais voláteis, 19,50% de cinzas e 30,47% de carbono fixo. Ribeiro (2018) caracterizou em seu estudo o lodo de ETE para quantificar a capacidade energética e avaliar a viabilidade no acionamento de usinas termoeletricas. O lodo sem areia coletado em época seca demonstrou maior viabilidade energética, com 53,14% de materiais voláteis, 0,72% de cinzas e 46,13% de carbono fixo.

Os dados desses estudos se distanciam substancialmente da presente análise. Os lodos utilizados nos trabalhos de Silva et al. (2021), Pandey e Thakur (2020) e Ribeiro (2018) exibiram um teor de voláteis consideravelmente menor que o

lodo formado pelos tratamentos de cloreto férrico e tanino SG nas diferentes concentrações; a proporção de materiais voláteis não chegou a 60% para esses estudos, indicando menor reatividade dos mesmos na combustão. O teor de carbono fixo também divergiu substancialmente ao alcançar valores de 27,86% (SILVA et al., 2021), 30,47% (PANDEY; THAKUR, 2020) e 46,13% (RIBEIRO, 2018), enquanto o atual trabalho não apresentou carbono fixo acima 15% em todos os tratamentos. Quanto às cinzas, Silva et al (2021) obtiveram 11,33%, que é semelhante ao conteúdo dos tratamentos com tanino SG para as diferentes concentrações, enquanto Pandey e Thakur (2020) demonstraram 19,50% de cinzas, aproximando-se dos tratamentos com cloreto férrico; Ribeiro (2018) produziu apenas 0,72% de cinzas, muito inferior aos tratamentos com ambos os coagulantes em diferentes concentrações.

A composição química imediata do lodo nos tratamentos realizados passou pela análise de variância (ANOVA), exibido na Tabela 15.

TABELA 15 – ANÁLISE DE VARIÂNCIA (ANOVA) PARA COMPOSIÇÃO QUÍMICA IMEDIATA DO LODO NOS TRATAMENTOS APLICADOS.

| Teor de materiais voláteis (%) |    |        |       |        |      |
|--------------------------------|----|--------|-------|--------|------|
| Fonte de Variação              | GL | SQ     | QM    | F calc | Prob |
| Tratamento                     | 5  | 273,11 | 54,62 | 63,54  | 0,00 |
| Erro                           | 12 | 10,32  | 0,86  |        |      |
| Total Corrigido                | 17 | 283,43 |       |        |      |
| Teor de cinzas (%)             |    |        |       |        |      |
| Fonte de Variação              | GL | SQ     | QM    | F calc | Prob |
| Tratamento                     | 5  | 484,55 | 96,91 | 154,70 | 0,00 |
| Erro                           | 12 | 7,52   | 0,63  |        |      |
| Total Corrigido                | 17 | 492,07 |       |        |      |
| Teor de carbono fixo (%)       |    |        |       |        |      |
| Fonte de Variação              | GL | SQ     | QM    | F calc | Prob |
| Tratamento                     | 5  | 51,99  | 10,40 | 10,62  | 0,00 |
| Erro                           | 12 | 11,75  | 0,98  |        |      |
| Total Corrigido                | 17 | 63,74  |       |        |      |

GL: Graus de liberdade; SQ: Soma quadrática; QM: Média quadrática; Fcalc: F calculado; Prob: Probabilidade.

FONTE: O autor (2023).

Observa-se que, em cada componente da análise imediata, a probabilidade para os tratamentos é inferior a 0,05, indicando diferença estatística. Com base nesse resultado, foi realizado o teste de comparação das médias de Tukey (Tabela 16).

TABELA 16 – TESTE DE TUKEY PARA ANÁLISE IMEDIATA NOS TRATAMENTOS APLICADOS.

| Coagulante      | Concentração<br>(mg L <sup>-1</sup> ) | Teor de materiais<br>voláteis (%) | Teor de cinzas<br>(%) | Teor de carbono fixo<br>(%) |
|-----------------|---------------------------------------|-----------------------------------|-----------------------|-----------------------------|
| Cloreto férrico | 300                                   | 70,69 ± 1,5<br>c                  | 21,52 ± 0,52<br>a     | 7,79 ± 1,09<br>c            |
| Cloreto férrico | 450                                   | 70,80 ± 1,0<br>c                  | 20,20 ± 0,87<br>a     | 8,99 ± 0,74<br>c            |
| Cloreto férrico | 600                                   | 68,66 ± 0,2<br>c                  | 21,88 ± 0,51<br>a     | 9,46 ± 0,53<br>bc           |
| Tanino SG       | 300                                   | 79,52 ± 0,7<br>a                  | 10,14 ± 1,45<br>b     | 10,35 ± 1,76<br>abc         |
| Tanino SG       | 450                                   | 76,81 ± 0,6<br>b                  | 11,05 ± 0,58<br>b     | 12,13 ± 0,50<br>ab          |
| Tanino SG       | 600                                   | 75,87 ± 0,9<br>b                  | 11,54 ± 0,23<br>b     | 12,59 ± 0,73<br>a           |

Letras iguais indicam médias iguais para o teor de materiais voláteis (%) nos tratamentos aplicados (valor de  $p > 0,05$ ).

Fonte: o autor (2023).

A maior média para materiais voláteis é verificada no tratamento com tanino SG a 300 mg L<sup>-1</sup>, descrito pela letra a. Já concentrações de tanino SG de 450 mg L<sup>-1</sup> e 600 mg L<sup>-1</sup> (b) produziram a um lodo com menos constituintes voláteis, mas ainda superior ao lodo de tratamentos com cloreto férrico nas diferentes concentrações. Considerando apenas os tratamentos com cloreto férrico, não houve diferença estatística entre os teores de coagulante, representados pela letra c.

O conteúdo de materiais voláteis da biomassa é um parâmetro muito importante para verificar a eficiência energética, uma vez que esses compostos correspondem a 70% do calor na combustão e são cruciais na ignição e etapas iniciais da queima. Hidrocarbonetos, monóxido de carbono e dióxido de carbono são volatilizados e misturam-se com o oxigênio em reações de combustão iniciais (BRAND, 2010; WILLIAMS; JONES; POURKASHIAN, 2012). Por essas razões, a reatividade de um combustível pode ser apontada pelo seu teor de materiais voláteis (LEWANDOWSKI; KICHERER, 1997).

Quanto às cinzas, em todas as concentrações o lodo após tratamento com cloreto férrico rendeu estatisticamente o mesmo conteúdo, o que também foi observado entre o lodo dos tratamentos com coagulante orgânico; assim, a geração de cinzas não foi alterada pela concentração do coagulante.

O emprego do coagulante inorgânico (a), contudo, gerou mais resíduo de cinzas no processo em relação ao orgânico (b). Quanto mais cinza permanece após a combustão, maior é o volume de resíduo que precisa de uma disposição adequada, o que é particularmente relevante para indústrias que consomem muita energia (OBERNBERGER; BRUNNER; BARNTHALER, 2006; FAGNANI, 2019). Além disso,

esses produtos não fornecem calor para o processo, diminuindo o poder calorífico da combustão (VIRMOND, 2007). Assim, os tratamentos com tanino SG mostraram-se mais vantajosos que o emprego do cloreto férrico nesse parâmetro.

Já o maior teor de carbono fixo foi encontrado nos tratamentos que utilizaram tanino SG, em as todas as concentrações, indicados pela letra a. Os tratamentos com coagulante inorgânico convencional e o tratamento com tanino SG na concentração de 300 mg L<sup>-1</sup> podem apresentar uma combustão mais rápida, visto que o conteúdo de carbono fixo é utilizado como parâmetro para a duração da queima. Nesse parâmetro, o teor de carbono fixo é diretamente proporcional ao tempo da combustão. Considerando que queimas mais longas significam um maior tempo de residência nos equipamentos, baixas concentrações de carbono fixo são mais vantajosas (FAGNANI, 2019).

## 5 CONCLUSÃO

De modo geral, o efluente de termoprocessados passou por um eficiente processo de coagulação e floculação com cloreto férrico e tanino SG como coagulantes, apresentando substancial remoção de sólidos suspensos e aspecto clarificado. Além disso, a biomassa obtida pelos ensaios demonstrou boa eficiência para uso como fonte de energia renovável, oferecendo uma alternativa sustentável para o destino desse resíduo. Dados para o tratamento desse tipo de efluente ainda não são encontrados na literatura, atribuindo mais pertinência ao presente estudo.

O tanino SG demonstrou superior desempenho em relação a cloreto férrico para diversos parâmetros, variando pouco no pH do efluente, removendo maior turbidez em baixas concentrações, gerando menos lodo, produzindo biomassa mais reativa e com menor cinza residual. Soma-se a isso vantagens como baixa toxicidade e alta biodegradabilidade, aspectos relacionados a natureza orgânica que se destacam na busca de agroindústrias por desempenho ambiental correto. O coagulante orgânico também foi mais eficiente em concentrações mais baixas, removendo mais cor do efluente e produzindo menos lodo, sugerindo uma vantagem econômica no seu emprego.

Desse modo, o presente estudo classifica o emprego de tanino SG como uma ótima alternativa para coagulantes inorgânicos tradicionais e a biomassa formada no tratamento de efluente de termoprocessados como uma fonte de energia eficiente e sustentável.

## REFERÊNCIAS

- ABOULHASSAN, M. A. et al. Coagulation efficacy of a tannin coagulant agent compared to metal salts for paint manufacturing wastewater treatment. **Desalination and Water Treatment**, v. 57, n. 41, 2016.
- ABPA. **Relatório Anual 2022**. São Paulo, 2022.
- BAZZO, E. **Geração de vapor**. Florianópolis: Ed. da UFSC, 1995.
- BASHIR, M. J. K. Treatment of Poultry Wastewater with Tannin as a Natural Coagulation Agent. **2023 IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.** v. 1135, p. 1-8, 2023.
- BELTRÁN-HEREDIA, J.; SÁNCHEZ-MARTÍN, J.; GÓMEZ-MUÑOZ, M. C. New coagulant agents from tannin extracts: preliminary optimization studies, **Chem. Eng. J.**, v. 162, p. 1019-1025, 2010.
- BERNARDO, G. de L. **Cenário da avicultura no Brasil e as principais afecções - Revisão de literatura**. 34 p. Trabalho de Graduação (Bacharel em Medicina Veterinária) – Universidade Federal da Paraíba, Areia, 2022.
- BOEKEL, M. V. A review on the beneficial aspects of food processing. **Molecular Nutrition & Food Research**, v. 54, p. 1215-1247, 2010.
- BUENO, V. M. **Caracterização físico-química de resíduos de abatedouros de frangos**. Trabalho de graduação (Bacharelado em Engenharia de Energia) – Universidade Estadual Paulista, Rosana, 2022.
- BRAND, M. A. **Energia de biomassa florestal**. 131 p. Rio de Janeiro: Interciência, 2010.
- BRASIL. Ministério da Agricultura. Secretaria de Defesa Agropecuária. Portaria nº 210 de 10 de nov. 1998. **Regulamento Técnico de inspeção tecnológica e higiênico-sanitária de carne de aves**. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 26 nov. 1998. Seção 1, p. 226. Republicado em 05 mar. 1999, seção 1, p. 17–22.
- BRASIL. **Resolução nº 430, de 1 de maio de 2011**. Dispõe sobre as condições e padrões de lançamento de efluentes, complementa e altera a Resolução no 357, de 17 de março de 2005, do Conselho Nacional do Meio Ambiente-CONAMA. Disponível em: <http://www.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=646>. Acesso em: 03 jun. 2023.
- CORAL, L. A.; BERGAMASCO, R.; BASSETTI, F. J. Estudo da Viabilidade de Utilização do Polímero Natural (TANFLOC) em Substituição ao Sulfato de Alumínio no Tratamento de Águas para Abastecimento Público. *In*: INTERNATIONAL WORKSHOP ADVANCES IN CLEANER PRODUCTION, 2. **Anais...**, São Paulo, 2009.
- CORTEZ, L. A. B.; LORA, E. E. S.; GÓMEZ, E. O. **Biomassa para energia**. Campinas: Editora Unicamp, 2008.

COSTA, C.; TEIXEIRA, J. P. Efeitos genotóxicos dos pesticidas. **Revista de Ciências Agrárias**, v. 35, n. 2, p. 19-31, 2012.

COUTO, C. M. **Estimativa do poder calorífico de madeiras de acácia-negra e eucalipto do Município de Pelotas-RS**. Trabalho de graduação (Bacharelado em Engenharia Ambiental e Sanitária) – Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 2014.

DAWSON, P. L.; MANGALASSARY, S.; SHELDON, B. W. Thermal processing of Poultry Products. In: SUN, D. W. **Thermal Food Processing**, Boca Raton: CRS Press, 2006.

DIAS, I. C. L.; CASTRO, A. C. L. de. O PROCESSO DE ABATE DE BOVINOS: implicações para a saúde e o ambiente. **Cadernos De Pesquisa**, v. 18, p. 39-48, 2011.

EPA. **Process design manual for suspended solids removal**. Technology Transfer. EPA-625/1-75-003a, Washington, 1975

EPE. Relatório Síntese do Balanço Energético Nacional – BEN 2021: ano base 2020. Brasília, 2021.

FAGNANI, K. C. Comparação do potencial energético do lodo gerado no tratamento físico-químico de efluentes provenientes do abate de aves utilizando diferentes coagulantes. 100 p. Dissertação (Mestrado em Tecnologia em Bioprodutos Agroindustriais) – Universidade Federal do Paraná, Palotina, 2017.

FAGNANI, K. C.; ALVES, H. J.; CASTRO, L. E. N.; KUHN, S. S., COLPINI, L. M. S. An alternative for the energetic exploitation of sludge generated in the physico-chemical effluent treatment from poultry slaughter and processing in Brazilian industries. **J. Environ. Chem. Eng.**, v. 7, n. 2, 2019.

FARIAS, L. A.; FÁVARO, I. T. Vinte anos de química verde: conquistas e desafios. **Quim. Nova**, v. 34, n. 6, p. 1089-1093, 2011.

FEISTEL, J. C. **Tratamento e destinação de resíduos e efluentes de matadouros e abatedouros**. 37 p. Dissertação (Mestrado em Medicina Veterinária) – Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2011.

FERRARI, C. T. da R. R. **Uso de coagulantes naturais no tratamento de efluente da indústria de alimentos**. 2015. 64 f. Dissertação (Mestrado em Tecnologia de Alimentos) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Medianeira, 2015.

FERREIRA FILHO, S. S. **Tratamento de Águas**: concepção, projeto e operação de estações de tratamento. São Paulo: Elsevier, 2017.

FRANCIOZI, S. A. Uso de diferentes coagulantes no tratamento de efluente de abatedouro bovino e análise do potencial energético do lodo gerado. 100 p. Dissertação (Mestrado em Biotecnologia) – Universidade Federal do Paraná, Palotina, 2020.

FOUCAULT, L. J. **Anaerobic Co-digestion of Chicken Processing Wastewater and Crude Glycerol from Biodiesel**. 2011. 85 p. Thesis (Master of Science in Biological and Agricultural Engineering) – Texas A&M University, Texas, 2011.

GALINKIN, M. (ed.). **Agroenergia da biomassa residual: perspectivas energéticas, socioeconômicas e ambientais**. Brasília: Itaipu Binacional, 2009.

GOMES, A. J. G. Electrochemical remediation of chicken processing plant wastewater. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, v. 6, p. 6028-6036, 2018.

GOMES, J. B. V.; WREGE, M. S. **Municípios formadores da Bacia do Paraná 3 e Palotina: estudos de clima, solos e aptidão das terras para o cultivo do eucalipto**. Brasília: Embrapa, 2020.

GOMES, P. A.; OLIVEIRA, J. B. Teoria da carbonização da madeira. In: PENEDO, W. R. **Uso da madeira para fins energéticos**. Belo Horizonte: CETEC, 1980.

GONÇALVES, R. E.; LUDUVICE, M.; SPERLING, M. V. sludge thickening and dewatering. In: ANDREIOLI, C. V.; SPERLING, M. V.; FERNANDES, F. (Ed.). **sludge Treatment and Disposal**. London: IWA Publishing, 2007.

GUEDES, I. N.; COUTO, L. A.; COQUEIRO, J. S.; MARTINS, N. C. G.; MEIRA, N. S.; LANDIM, L. B. Agroindústria frigorífica: legislação correlatada, destinação de resíduos e aspectos ambientais: uma revisão bibliográfica. **Meio Ambiente**, v. 4, p. 11-25, 2022.

HOWE, K. J.; HAND, D. W.; CRITTENDEN, J. C.; TRUSSELL, R. H.; TCHOBANOGLOUS. **Principles of Water Treatment**. 1. ed. New Jersey: Ed. John Wiley & Sons Inc., 2012.

IBRAHIN, F. J.; IBRAHIN, F. I. D.; CANTUÁRIA, E. R. **Análise ambiental: gerenciamento de resíduos e tratamento de efluentes**. São Paulo: Erica, 2015.

IRFAN, M. et al. The removal of COD, TSS and colour of black liquor by coagulation–flocculation process at optimized pH, settling and dosing rate. **Arabian Journal of Chemistry**, v. 10, p. S2307-S2318, 2013.

JORDÃO, E. P.; BÔAS, D. V.; CONCEIÇÃO, J. R.; da SILVA, T. C. R.; SOBRINHO, P. A. Controle microbiológico na operação de um sistema de lodos ativados - estudo em escala piloto. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 19, 1997, Foz do Iguaçu, **Anais...** Foz do Iguaçu: ABES, 1997. p. 625-636.

JÚNIOR, R. N. L.; ABREU, F. O. M. S. Produtos Naturais Utilizados como Coagulantes e Flocculantes para Tratamento de Águas: Uma Revisão sobre Benefícios e Potencialidades. **Revista Virtual de Química**, v. 10, p. 709-735, 2018.

JÚNIOR, S. V. (ed.). **Biomassa para Química Verde**. Brasília: Embrapa Agroenergia, 2013.

KIM, H. et al. Estimation of the characteristics with hydrothermal carbonisation temperature on poultry slaughterhouse wastes. **Waste Management & Research**, v. 36, n. 6, p. 1-6, 2018.

KRIEGER, E. I. F. **Avaliação do consumo de água, racionalização do uso e reúso do efluente líquido de frigorífico de suínos na busca sustentabilidade socioambiental da empresa**. Tese (Doutorado em Ciências) – Instituto de Biociências da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2007.

KROYER, G. Th. Impact of food processing on the environment—an overview. **LWT - Food Science and Technology**, v. 28, p. 547-552, 1995.

LEWANDOWSKI, I.; KICHERER, A. Combustion quality of biomass: practical relevance and experiments to modify the biomass quality of *Miscanthus x giganteus*. **European Journal of Agronomy**, v. 6, p. 163-177, 1997.

MANGRICH, A. S.; DOUMER, M. E.; MALLMANN, A. S.; WOLF, C. R. Química verde no tratamento de águas: uso de coagulante derivado de tanino de *Acacia mearnsii*. **Revista Virtual de Química**, v. 6, p. 2-15, 2014.

MÂNICA, A. N. **Utilização do óleo de fritura para a produção de bio-óleo através do processo de pirólise catalítica**. Trabalho de graduação (Bacharelado em Engenharia Ambiental) – Universidade Federal da Fronteira Sul, Chapecó, 2015.

MAPA. Projeções do Agronegócio - Brasil 2021/22 a 2031/2032. Brasília, 2022.

McKENDRY, P. Energy production from biomass (part 1): overview of biomass. **Bioresources Technology**, v. 83, 1. ed., p. 37-46, 2002.

MENDES, C. G. da N. **Estudo da coagulação e floculação de águas sintéticas e naturais com turbidez e cor variáveis**. 244 p. Tese (Doutorado em Hidráulica e Saneamento) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1989.

MENEGHINI, C. et al. Avaliação técnica e econômica da co-combustão de lodo frigorífico primário para geração de vapor. In: **VI CONGRESSO BRASILEIRO DE GESTÃO AMBIENTAL**. Porto Alegre: Universidade do Oeste de Santa Catarina.

MUNIZ, G. L. **Otimização do tratamento de efluente lácteo sintético com o uso de coagulantes alternativos**. 181p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2018.

MYRA, T. et al. Biological Treatment of Meat Processing Wastewater using Anaerobic Sequencing Batch Reactor (ASBR). **International Research Journal of Biological Sciences**, v. 4, n. 3, p. 66-75, 2015.

NUNES, J. A. **Tratamento físico-químico de águas residuárias industriais**. 3. ed. Aracaju: Gráfica e Editora Triunfo, 2001.

OBERNBERGER, I.; BRUNNER, T.; BARNTHALER, G. Chemical properties of solid biofuels-significance and impact. **Biomass and Bioenergy**, Amsterdam, v. 30, n. 11, p. 973-982, 2006.

OLDONI, B. T.; STEFFENS, C.; DALLAGO, R. M.; STEFFENS, J. Uso de tanino como alternativa aos coagulantes químicos no tratamento de efluente de laticínio. **Rev. Brasileira do Meio Ambiente**, v. 10, n. 3, p. 100-116, 2022.

PACHECO, J. W. Guia técnico ambiental de frigoríficos - industrialização de carnes (bovina e suína). São Paulo: CETESB, 2006.

PAVANELLI, G. **Eficiência de diferentes tipos de coagulantes na coagulação, floculação e sedimentação de água com cor ou turbidez elevada**. 216f. Dissertação (Mestrado em Hidráulica e Saneamento) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2001.

PANDEY, N.; THAKUR, C. Study on treatment of paper mill wastewater by electrocoagulation and its sludge analysis. **Chemical Data Collections**, v. 27, p. 1-12, 2020.

PRADO, A. G. S. Química Verde, os desafios da química do novo milênio. **Quim. Nova**, v. 26, n. 5, p. 738-744, 2003.

QASIM, W.; MANE, A.V. Characterizationand treatmentof selectedfood industrial effluents bycoagulationand adsorption techniquesCharacterizationand treatmentof selectedfood industrial effluents bycoagulationand adsorption techniques. **Water Resources and Industry**, v. 4, p. 1-12, 2013.

RAJAKUMAR, R. et al. Treatment of poultry slaughterhouse wastewater in upflow anaerobic filter under low upflow velocity. **Int. J. Environ. Sci. Tech.**, v. 8, n. 1, p. 149-158, 2011.

RICHTER, C. A. **Água: métodos e tecnologias de tratamento**. São Paulo: Blucher, 2009.

RIBEIRO, K. P. **Caracterização físico-química do lodo de estação de tratamento de esgoto para aproveitamento como biomassa energética**. 53 p. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-graduação em Biocombustíveis, Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri, Diamantina, 2018.

ROSA, M. S. da. **Avaliação do emprego de coagulantes orgânico e inorgânico no tratamento primário de efluente de abate e industrialização de aves**. 51 p. Trabalho de graduação (Bacharelado em Engenharia Ambiental) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Medianeira, 2019.

SANTOS, E. P. C. C.; TEIXEIRA, A. R.; ALMEIDA, C. P.; LIBÂNIO, M.; PÁDUA, V. L. Estudo da coagulação aplicada à filtração direta descendente. **Engenharia Sanitária Ambiental**, v. 12, p. 361-371, 2007.

SANTOS, J. D. dos. **Tratamento de efluente de fecularia utilizando coagulação/floculação e separação por membranas**. 2016. 120 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Toledo, 2016.

SANTOS, J. R. S. **Estudo da biomassa torrada de resíduos florestais de eucalipto e de bagaço de cana-de-açúcar para fins energéticos**. 85 p. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2012.

SANTOS, V. A. L.; PIERRE, F. C. Fatores chave para implantar um Sistema de Gestão Ambiental em uma agroindústria. **Tekhne e Logos**, v. 9, n. 1, p. 31-42, 2019.

SCARASSATI, D.; CARVALHO, R. F.; DELGADO, V. L.; CONEGLIAN, C.M.R; BRITO, N.N.; TONSO, S.; SOBRINHO, G.D.; PELEGRINI, R. Tratamento de Efluentes de Matadouros e Frigoríficos. *In: III Fórum de Estudos Contábeis*. São Paulo: Faculdades Integradas Claretianas.

SCHATZMANN, H. C. **Tratamento avançado de efluentes de frigorífico de aves e o reúso da água**. 108 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Química) – Universidade Federal De Santa Catarina, 2009.

SENA, R. F. de. **Avaliação da biomassa obtida pela otimização da flotação de efluentes da indústria de carnes para geração de energia**. 83 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2005.

SEMAN, D. L. et al. Meat Science Lexicon. **Meat and Muscle Biology**, v. 2, 1-15, 2018.

SILVESTRE, L. H. da S. N. **Desempenho ambiental de sistema de tratamento de efluentes de indústria de abate e industrialização de carne de aves: estudo de caso hg foods - EPP – Unidade de Santa Luzia/MG**. 58 p. Trabalho de graduação (Bacharelado em Engenharia Ambiental e Sanitária) – Departamento de Ciência e Tecnologia Ambiental, Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2018.

SILVA, I. R. G. **Avaliação quantitativa do tratamento da água utilizando os coagulantes tanino e cloreto férrico**. 2019. 61 f. Trabalho de graduação (Graduação em Engenharia Ambiental) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Londrina, 2019.

SILVA, J. P. et al. Compaction as a sustainable alternative to dried sludge from poultry slaughterhouse wastewater for energy generation. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 51, n. 12, p. 1-9, 2021.

SOUZA, P. C.; PEREIRA, N. C.; GONÇALVES, M. S.; FILHO, N. S.; RODRIGUES, P. H.; JAMARIM, V. M. Estudo do tratamento de efluente têxtil através de processos de coagulação/floculação e eletrocoagulação. **Revista E-Xacta**, Belo Horizonte, v. 9, n. 2, p. 123-132, 2016.

SPERLING, M. V. **Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos**: princípios do tratamento biológico e ao tratamento de águas residuárias. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, UFMG, 1995.

STEIN, R. T. **Caracterização e avaliação do sistema de tratamento de efluentes de uma indústria alimentícia, visando o reuso**. 83 fl. Trabalho de graduação (Bacharelado em Engenharia Ambiental) – Universidade do Vale do Taquari, Lajeado, 2012.

TANAC. Tanfloc SG. Tanac S. A. Rio Grande do Sul. 2016. Disponível em: <[https://www.tanac.com.br/novo/wp-content/uploads/2021/06/CT\\_TANFLOC\\_SG\\_PT\\_0.pdf](https://www.tanac.com.br/novo/wp-content/uploads/2021/06/CT_TANFLOC_SG_PT_0.pdf)>. Acesso: 27 de maio de 2023.

THIRUGNANASAMBANDHAM, K. et al. Optimization of process parameters in electrocoagulation treating chicken industry wastewater to recover hydrogen gas with pollutant reduction. **Renewable Energy**, v. 80, p. 101-108, 2015.

USDA. Foreign Agricultural Service. **Livestock and Poultry: World Markets and Trade**. Estados Unidos, 2022.

VIEIRA, A. C. **Caracterização da biomassa proveniente de resíduos agrícolas**. 72 f. Dissertação (Mestrado em Energia na Agricultura) – Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Cascavel, 2012.

VIRMOND, E. **Aproveitamento do lodo de tratamento primário de efluentes de um frigorífico como fonte de energia**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2007.

WANG, S. (ed.). Chemical hazards in thermally-processed foods. Singapore: Springer, 2019.

WERBERICH, T. **Diferentes tipos de coagulantes no tratamento de efluente de frigorífico**. 2017. 49f. Trabalho de graduação (Bacharelado em Engenharia Agrícola e Ambiental) – Universidade Federal de Mato Grosso, Instituto de Ciências Agrárias e Ambientais, Sinop, 2017.

WILLIAMS, A.; JONES, J. M.; POURKASHANIAN, M. Pollutants from the combustion of solid biomass fuels. **Progress in Energy and Combustion Science**, v. 38, n. 2, p. 113-137, 2012.

WIMMER, A. C. S. **Aplicação do processo eletrolítico no tratamento de efluentes de uma indústria petroquímica**. 195f. Dissertação (Mestrado em Ciência dos Materiais e Metalurgia) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2007.

YIN, C. Y. Emerging usage of plant-based coagulants for water and wastewater treatment. **Process Biochemistry**, v. 45, n. 9, p. 1437-1444, 2010.