



**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO
TOCANTINS
CAMPUS PALMAS**

CURSO SUPERIOR DE ENGENHARIA CIVIL

NAÍNARA BISPO DE OLIVEIRA

**APROVEITAMENTO DE CAMA DE FRANGO PARA A PRODUÇÃO
DE BIOCHAR**

PALMAS

2026

NAÍNARA BISPO DE OLIVEIRA

**APROVEITAMENTO DE CAMA DE FRANGO PARA A PRODUÇÃO
DE BIOCHAR**

Trabalho de conclusão de curso apresentado como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel no Curso Superior de Engenharia Civil do Instituto Federal do Tocantins, Campus Palmas.

Orientador (a): Dra. Prof^a Cláudia da Silva A. Rezende

PALMAS

2026

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Bibliotecas do Instituto Federal do Tocantins

-
- O48a Oliveira, Nainara Bispo
 APROVEITAMENTO DE CAMA DE FRANGO PARA A
 PRODUÇÃO DE BIOCHAR / Nainara Bispo Oliveira. – Palmas, TO, 2026.
 52 p. : il. color.
- Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) –
 Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Tocantins, Campus
 Palmas, Palmas, TO, 2026.
- Orientador: Dr. Cláudia da Silva Aguiar Rezende
1. Cama de Frango. 2. Biochar. 3. Pirólise. I. Aguiar Rezende, Cláudia da
 Silva. II. Título.

CDD 624

A reprodução total ou parcial, de qualquer forma ou por qualquer meio, deste documento é autorizada para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

Elaborado pelo sistema de geração automática de ficha catalográfica do IFTO com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

FOLHA DE APROVAÇÃO

NAÍNARA BISPO DE OLIVEIRA

APROVEITAMENTO DE CAMA DE FRANGO PARA A PRODUÇÃO DE BIOCHAR

Trabalho de conclusão de curso apresentado à
Coordenação do curso de Engenharia Civil
Instituto Federal do Tocantins - Campus Palmas,
como exigência à obtenção do grau em
Engenharia Civil.

Aprovado em: ____/____/____

BANCA AVALIADORA



Documento assinado digitalmente

CLAUDIA DA SILVA AGUIAR REZENDE

Data: 18/03/2026 10:25:55-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof.^a Dra. Cláudia da Silva A. Rezende

IFTO- Campus Palmas – TO



Documento assinado digitalmente

MARCELO MENDES PEDROZA

Data: 18/03/2026 11:08:27-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof.^o Dr. Marcelo Mendes Pedroza

IFTO – Campus Palmas - TO



Documento assinado digitalmente

ELAINE DA CUNHA SILVA PAZ

Data: 18/03/2026 21:14:38-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof.^a Dra. Elaine da Cunha Silva Paz

IFTO – Campus Palmas - TO

AGRADECIMENTOS

A conclusão deste trabalho marca o encerramento de uma etapa importante da minha formação, construída com dedicação, aprendizado e crescimento pessoal. Nada disso teria sido possível sem o apoio de pessoas que estiveram ao meu lado ao longo desse percurso.

Agradeço primeiramente, à minha família, que sempre foi minha base e meu ponto de equilíbrio. Em especial, à minha mãe Nairzete Beltrão de Oliveira Bispo, pelo apoio incondicional, pela força constante e por nunca medir esforços para que eu pudesse chegar até aqui. Sem ela, eu não teria conseguido concluir este trabalho.

Ao meu irmão José Eduardo Bispo de Oliveira, um dos meus maiores incentivadores, agradeço por sempre acreditar em mim e por me encorajar diante dos desafios.

À minha orientadora, Prof^a Cláudia Rezende, deixo meu agradecimento pela oportunidade concedida de desenvolver este estudo e pela confiança ao aceitar me orientar nesta etapa final da graduação.

Ao Professor Marcelo Mendes Pedroza, expresso minha sincera gratidão pelo apoio essencial durante a execução deste trabalho, especialmente nas atividades desenvolvidas em laboratório. Sempre disponível, paciente e dedicado, contribuiu com atenção e boa vontade sempre que necessário. Sua forma cuidadosa de ensinar e sua paixão pelo que faz foram fundamentais para que eu pudesse concluir este TCC com segurança e confiança.

Aos colegas que compartilharam comigo os desafios e aprendizados ao longo da graduação, registro meu reconhecimento pelas experiências divididas e pelo apoio mútuo nesses anos de formação.

De maneira especial, agradeço à Jane Sara, pela amizade construída ao longo da graduação, que ultrapassou os limites do ambiente acadêmico, pelo companheirismo constante nos momentos mais desafiadores do curso e por nunca ter soltado minha mão diante das dificuldades. Sua presença foi indispensável para que essa trajetória se tornasse mais leve e possível.

Por fim, agradeço a todos que, de alguma forma, contribuíram para que este momento se tornasse possível.

RESUMO

OLIVEIRA, Nainara Bispo de. **Aproveitamento De Cama de frango para a produção de Biochar**. 2025. 54 p. Trabalho de Conclusão de Curso – Bacharelado em Engenharia Civil – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Tocantins. Palmas, 2026.

O propósito deste trabalho foi aproveitar o resíduo proveniente da cama de frango para a produção de biochar. O Brasil ocupa posição de destaque na avicultura mundial, sendo o maior exportador e o segundo maior produtor de carne de frango, o que reflete a relevância econômica e produtiva do setor no país. Como consequência dessa expressiva produção, a geração de cama de frango ocorre em larga escala, tornando preocupante o volume desse rejeito orgânico e reforçando a necessidade de alternativas adequadas para seu reaproveitamento. Nesse contexto, a transformação térmica da cama de frango por meio da pirólise apresenta-se como alternativa promissora para reduzir o descarte inadequado da biomassa e agregar valor ao resíduo. A metodologia do trabalho consistiu na coleta da cama de frango, seguida da caracterização físico-química da biomassa. Posteriormente, o material foi submetido ao processo de pirólise, cerca de 1 kg do material submetido a 600 °C, com taxa de aquecimento de 30 °C min⁻¹ e tempo de residência de 30min. O biochar obtido também foi submetido a ensaios de caracterização, visando avaliar suas propriedades e seu potencial de uso agrícola. O rendimento gravimétrico apresentou 35,00%, a umidade de 4,63%, teor de voláteis de 23,44%, teor de cinzas de 43,06% e teor de carbono fixo de 28,873%. Em relação a densidade média aparente do biochar obtido foi de 0,26777 g/mL. A análise química evidenciou concentrações elevadas de potássio (16,676%), cálcio (13,075%) e fósforo (2,643%), nutrientes de importância agrônômica, indicando concentração da fração mineral após a conversão térmica. Ademais, o biochar produzido apresentou potencial para ser utilizado como condicionador de solo e insumo agrícola, contribuindo para a melhoria da fertilidade, retenção de nutrientes e valorização ambiental do resíduo, agregando benefícios ambientais, produtivos e econômicos.

Palavras-chave: Cama de frango. Biochar. Pirólise.

ABSTRACT

OLIVEIRA, Nainara Bispo de. **Aproveitamento De Cama de frango para a produção de Biochar**. 2025. 54 p. Trabalho de Conclusão de Curso – Bacharelado em Engenharia Civil – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Tocantins. Palmas, 2026.

The purpose of this work was to utilize waste from chicken litter for biochar production. Brazil occupies a prominent position in the global poultry industry, being the largest exporter and the second largest producer of chicken meat, reflecting the economic and productive relevance of the sector in the country. As a consequence of this significant production, chicken litter is generated on a large scale, making the volume of this organic waste a concern and reinforcing the need for suitable alternatives for its reuse. In this context, the thermal transformation of chicken litter through pyrolysis presents itself as a promising alternative to reduce the improper disposal of biomass and add value to the waste. The methodology of the work consisted of collecting chicken litter, followed by the physicochemical characterization of the biomass. Subsequently, the material was subjected to the pyrolysis process, with approximately 1 kg of the material subjected to 600 °C, with a heating rate of 30 °C min⁻¹ and a residence time of 30 min. The biochar obtained was also subjected to characterization tests, aiming to evaluate its properties and its potential for agricultural use. The gravimetric yield was 35.00%, moisture content 4.63%, volatile content 23.44%, ash content 43.06%, and fixed carbon content 28.873%. The average apparent density of the biochar obtained was 0.26777 g/mL. Chemical analysis showed high concentrations of potassium (16.676%), calcium (13.075%), and phosphorus (2.643%), nutrients of agronomic importance, indicating a concentration of the mineral fraction after thermal conversion. Furthermore, the biochar produced showed potential for use as a soil conditioner and agricultural input, contributing to improved fertility, nutrient retention, and environmental valorization of the residue, adding environmental, productive, and economic benefits.

Keywords: Chicken Litter. Biochar. Pyrolysis.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Demonstração de um galpão da avicultura na criação de frangos de corte	13
Figura 2 - Materiais utilizados como cama de frango	14
Figura 3 - Imagem de granja de frango	16
Figura 4 - Fluxograma contendo os testes e experimentos a serem realizados	20
Figura 5 - Cama de frango <i>in natura</i>	21
Figura 6 - Estufa	22
Figura 7 - Dessecador	23
Figura 8 - Forno Mulfa	23
Figura 9 - Proveta	26
Figura 10 - Balança de Precisão	26
Figura 11 - Reator Termoelétrico	28
Figura 12 - Caldeira	28
Figura 13 - Gráfico densidade Biomassa	35
Figura 14 - Gráfico da densidade do Biochar	41
Figura 15 - Comparação da concentração de elementos químicos (K, Ca, P e Si) entre a cama de frango <i>in natura</i> e o biochar	44

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Resultados da análise imediata da biomassa	32
Tabela 2 - Comparativo entre trabalhos de análise imediata da Cama de frango.....	34
Tabela 3 - Resultados do ensaio de densidade da biomassa.....	34
Tabela 4 - Rendimento do carvão 600 °C	36
Tabela 5 - Comparação do rendimento de biochar com dados da literatura	37
Tabela 6 - Análise imediata do Biochar obtido na temperatura de 600 °C.....	38
Tabela 7 - Comparativo entre trabalhos de análise imediata de Biochar	38
Tabela 8 - Resultados do ensaio de densidade do Biochar	40
Tabela 9 - Elementos químicos determinados em amostra da cama de frango in natura e do biochar a 600 °C	42
Tabela 9 - Continuação.....	42

SUMÁRIO

1.INTRODUÇÃO.....	10
1.1 Problema de pesquisa.....	12
1.2 Justificativa	12
1.3 Objetivos	15
1.3.1 <i>Objetivo Geral.....</i>	<i>15</i>
1.3.2 <i>Objetivos Específicos</i>	<i>15</i>
2.REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	15
2.1. Avicultura no Brasil	15
2.1.2 <i>Resíduo da cama de viário ou cama de frango</i>	<i>16</i>
2.2 Pirólise	17
3.1 Tipo de pesquisa.....	20
3.2 Coleta do material.....	21
3.3. Caracterização da biomassa.....	21
3.3.1 <i>Umidade</i>	<i>21</i>
3.3.2 <i>Teor de cinzas</i>	<i>23</i>
3.3.3 <i>Material volátil.....</i>	<i>24</i>
3.3.4 <i>Teor de carbono fixo.....</i>	<i>25</i>
3.3.5 <i>Determinação dos elementos químicos.....</i>	<i>25</i>
3.3.6 <i>Densidade</i>	<i>25</i>
3.4 Pirólise da biomassa	27
3.5 Espectrometria de Fluorescência de Raios-X (FRX).....	29
3.6 Caracterização do Biochar.....	30
3.6.1 <i>Umidade</i>	<i>30</i>
3.6.2 <i>Teor de cinzas</i>	<i>30</i>
3.6.3 <i>Material volátil.....</i>	<i>30</i>
3.6.4 <i>Teor de carbono fixo.....</i>	<i>30</i>
3.6.5 <i>Densidade</i>	<i>31</i>
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES	32
4.1 Caracterização da Biomassa	32
4.1.1 <i>Análise imediata</i>	<i>32</i>
4.1.2 <i>Densidade da Biomassa.....</i>	<i>34</i>
4.2 Rendimento do Biochar a partir da Cama de Frango.	36
4.3 CARACTERIZAÇÃO DO BIOCHAR.....	37

4.4 Análise imediata.....	37
<i>4.4.1 Densidade do Biochar</i>	<i>40</i>
4.5 Características Químicas da Biomassa e do Biochar	42
5. CONCLUSÃO.....	46
REFERÊNCIAS.....	47

1.INTRODUÇÃO

A intensificação das atividades agropecuárias nas últimas décadas tem sido acompanhada por um aumento expressivo na geração de resíduos orgânicos, reflexo direto da expansão dos sistemas produtivos e da crescente concentração de animais e insumos agrícolas. Nesse contexto, segundo Nunes, Pereira e Araújo (2019) e Lehmann e Joseph (2015), torna-se cada vez mais necessária a adoção de estratégias sustentáveis de manejo e valorização desses materiais, de modo a minimizar impactos ambientais e promover a reciclagem de nutrientes dentro dos próprios sistemas produtivos.

Entre os resíduos gerados, destaca-se a cama de frango, cuja produção é significativa nas granjas industriais e cuja composição é complexa, envolvendo fezes, restos de ração, penas, material absorvente e elevada carga de nutrientes e microrganismos. Essa combinação, impõe desafios quanto ao seu manejo e destinação final.

Em se tratando do Brasil, onde a avicultura ocupa posição estratégica no agronegócio e contribui amplamente para o fornecimento de proteína animal a baixo custo, a geração de cama de frango ocorre em larga escala. Nesse cenário, o estado do Tocantins também se insere como uma região de crescimento da atividade avícola, especialmente na porção centro-norte, onde se concentra parte significativa das granjas e da produção. Esse avanço reforça a relevância econômica do setor na região, mas também evidencia o aumento na geração de resíduos associados à atividade.

Entretanto, segundo Palhares (2021) e Nunes, Pereira e Araújo (2019), o descarte inadequado desse resíduo pode ocasionar impactos ambientais relevantes, especialmente relacionados à contaminação do solo e de corpos hídricos, em virtude da elevada carga de matéria orgânica e microrganismos presentes no material

Embora a aplicação da cama de frango ao solo seja amplamente adotada como estratégia de reciclagem de nutrientes, é importante considerar que seu uso requer planejamento e manejo criterioso. Nesse sentido, Bolan *et al.* (2010) destacam que, apesar de esse resíduo representar uma fonte significativa de nitrogênio (N), fósforo (P) e potássio (K), sua aplicação excessiva ou realizada sob condições edafoclimáticas desfavoráveis pode comprometer a qualidade ambiental. Segundo os autores, o nitrogênio presente na cama de frango pode ser lixiviado para águas subterrâneas, enquanto o fósforo pode ser transportado por escoamento superficial para corpos d'água, contribuindo para processos de eutrofização.

De forma complementar, Sharpley *et al.* (1998) ressaltam que o fósforo oriundo de resíduos orgânicos aplicados ao solo pode ser mobilizado tanto na forma dissolvida quanto

particulada, especialmente em áreas com alta saturação desse nutriente e sob ocorrência de precipitações intensas. Dessa forma, ainda que a aplicação agrícola favoreça a reciclagem de nutrientes, sua adoção sem critérios técnicos adequados pode resultar em impactos ambientais indesejáveis.

Nesse cenário, destaca-se a pirólise, processo termoquímico que converte a biomassa em um material carbonáceo mais estável, denominado biochar, com isso, estudos com biochar derivado de cama de frango (“*poultry litter biochar*”) indicam seu potencial para melhorar propriedades físicas, químicas e biológicas do solo. De maneira análoga, pesquisas demonstram que a aplicação de biochar proveniente de cama de frango pode elevar a capacidade de troca catiônica (CTC) do solo e reduzir a mineralização do carbono quando comparado à aplicação da cama *in natura*, indicando maior estabilidade do carbono no ambiente edáfico.

Além disso, a incorporação desse material pode estimular a atividade e a biomassa microbiana, sobretudo quando utilizada em doses moderadas, apresentando desempenho superior ao de fertilizantes minerais isolados. Ademais, outros estudos apontam que o biochar de cama de frango pode contribuir para o aumento da retenção hídrica e da disponibilidade de nutrientes, especialmente em solos arenosos de textura leve, reforçando seu potencial como condicionador de solo em diferentes contextos agrícolas.

Assim, a conversão da cama de frango em biochar configura-se como uma estratégia promissora de reaproveitamento de resíduos avícolas, reunindo benefícios ambientais e agronômicos. Ao mesmo tempo em que reduz riscos associados ao descarte inadequado, essa alternativa possibilita a geração de um insumo com potencial para melhorar a fertilidade do solo, favorecer a economia circular e contribuir para o sequestro de carbono.

Partindo desses pressupostos, o presente trabalho teve como objetivo avaliar a conversão da cama de frango em biochar por meio da pirólise, realizando a caracterização da biomassa *in natura* e do biochar obtido, a fim de investigar seu potencial de uso agrícola como condicionador de solo e fonte de fertilidade.

1.1 Problema de pesquisa

A grande quantidade de cama de frango pode acarretar sérios impactos ambientais, quando a disposição final é realizada de forma inadequada. Diante desse contexto, fez-se necessário a busca por alternativas de aproveitamento da grande quantidade de resíduos orgânicos resultantes das atividades avícolas, sem impactar o ambiente.

Diante do exposto, esta investigação científica teve como objetivo promover o aproveitamento da cama de frango, resíduo agropecuário gerado em volume significativo no Norte do Estado do Tocantins, caracterizado pela presença potencial de microrganismos patogênicos, por meio de sua conversão em biochar. Esse processo possibilita a redução significativa do volume do resíduo e a atenuação de seu caráter patogênico, ao mesmo tempo em que gera um material de elevado valor agronômico.

O biochar obtido apresenta potencial para atuar como condicionador de solo, contribuindo para a melhoria das propriedades físico-químicas do solo e para o fornecimento de nutrientes essenciais às plantas, especialmente fósforo e potássio.

1.2 Justificativa

O setor agropecuário necessita de soluções sustentáveis para o manejo desse resíduo avícola. Silveira e Vieira (2020) destacam que a ausência de parâmetros técnicos e a aplicação descontrolada da cama de frango no solo podem gerar impactos ambientais significativos a médio e longo prazo, especialmente pela possibilidade de degradação da qualidade do solo e dos recursos hídricos, além de comprometer a eficiência produtiva agrícola.

Diante dessa realidade, tornou-se fundamental compreender a natureza e a composição desse resíduo e avaliar adequadamente seus potenciais riscos e possibilidades de aproveitamento. A cama de frango é gerada nos sistemas de criação intensiva de frangos de corte, sendo formada pelo acúmulo de fezes, restos de ração, penas e material absorvente disposto no piso dos galpões avícolas, conforme evidenciado na Figura 1.

Figura 1 - Demonstração de um galpão da avicultura na criação de frangos de corte



Fonte: Adaptado de Vilarino (2021)

Dantes, a cama de frango era comercializada, ou seja, tinham a cama de frango como uma renda extra, pois os avicultores vendiam este resíduo como insumo nutricional para os pecuaristas. Porém, foi proibida essa comercialização pelo Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento como alimentação de ruminantes (Instrução Normativa nº 15, de 17 de julho de 2001). Consequentemente, esta decisão causou desconforto aos avicultores, pois o que no passado era considerado como ganho, lucro, no presente representa preocupação e custo, com o fato de terem que buscar alternativas para o descarte correto desse insumo.

Segundo Ávila e Mazzuco (1992) a cama de frango tem que ser revolvida do galinheiro uma vez por semana, pois o emplastamento pode causar fungos e bactérias, calo no peito dos animais e erosão das patas. Por isso, dificilmente, pode ocorrer uma reutilização da cama, neste caso, não pode ter ocorrido nenhuma doença no lote. Os mesmos afirmam que, a quantidade de cama produzida por mil cabeças de frango de corte com a idade entre 42 a 49 dias é de 2,0 toneladas. Em se tratando dos resíduos produzidos em uma granja, estima-se cerca de 2,19 kg de cama de aviário por ave. (Santos; Lucas JR., 2003)

Segundo dados da ABPA (2021), a produção de aves no Brasil é de 55,3 milhões de aves e a produção de resíduos orgânicos de aves no país é de aproximadamente 121.183,59 toneladas. Todo esse material, é composto por diferentes tipos de substratos utilizados na formação da cama de frango, como bagaço de cana-de-açúcar, capim Napier, maravalha, casca de arroz e suas misturas, conforme ilustrado na Figura 2, quando são descartado no ambiente de maneira errônea, pode causar desequilíbrios ambientais.

Segundo Palhares e Kunz (2011), o excesso de minerais no solo pode provocar desbalanço nutricional nas plantas, além de carrear resíduos dos insumos utilizados durante a criação das aves.

Figura 2 - Materiais utilizados como cama de frango



Fonte: Adaptado de Garcia, Paz & Caldara (2010)

Vale ressaltar que, quando recém-removida do aviário, a cama de frango pode apresentar elevada carga microbiológica, decorrente da presença de fezes, restos de ração, penas e umidade residual, criando um ambiente favorável ao desenvolvimento de microrganismos. Entre os organismos associados a esse resíduo destacam-se bactérias, fungos e outros agentes potencialmente patogênicos, que podem representar riscos ambientais caso o material seja aplicado ao solo sem manejo adequado. (Palhares; Kunz, 2011; Nunes; Pereira & Araujo, 2019)

Além disso, a presença de insetos e outros organismos associados à matéria orgânica em decomposição pode contribuir para a disseminação de microrganismos no ambiente agrícola. (Zhang *et al.*, 2021)

Diante disso, o material da cama deve ser escolhido criteriosamente levando em consideração as características físicas e químicas do material da cama de frango. (Garcia, Paz & Caldara, 2010; Albino & Tavernari, 2012)

O mesmo deve ser proveniente de material seco e possuir elevada capacidade de absorção de umidade, ser livre de fungos, mofo, não ser proveniente de madeira tratada com produtos químicos, ser macio, com tamanho de partículas médias capazes de absorver o impacto do peso das aves, ser um eficiente isolante térmico. (Garcia, Paz & Caldara, 2010)

Por conseguinte, a transformação da cama de frango em biochar representa uma solução viável, com benefícios ambientais, econômicos e agrícolas. O biochar produzido apresenta um grande potencial como controlador da umidade, como auxiliador na remoção de contaminantes do solo, como fixador de carbono, acredita-se, como fixador de carbono por ser mais lenta a sua decomposição quando agregado ao solo. Além da sua grande capacidade de aumentar a retenção de nutrientes no solo, melhorar a estrutura física e reduzir a dependência de fertilizantes químicos.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo Geral

Realizar a degradação térmica da cama de frango para a produção de biochar, através do processo de pirólise convencional.

1.3.2 Objetivos Específicos

- Caracterizar a biomassa escolhida (cama de frango);
- Realizar a pirólise da biomassa;
- Analisar o rendimento de biochar;
- Caracterizar o material obtido (biochar).

2.REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Avicultura no Brasil

A primeira referência sobre o início da avicultura no país remete às navegações portuguesas e ao descobrimento do território brasileiro. Inicialmente restritas à família real, as aves, que eram fruto de cruzamentos realizados ao longo dos séculos, aos poucos passaram a ser criadas de forma artesanal no quintal das casas de cidades litorâneas. (Costa, 2011)

Somente com o crescimento econômico e populacional do Brasil, fortemente atrelados ao ciclo da mineração do ouro, teve início a exploração comercial da atividade. O estado de Minas Gerais, onde foram encontradas as principais jazidas brasileiras, se consolidou ao final do século XIX como o maior produtor de aves do Brasil, abastecendo parte do mercado nacional. (Costa, 2011)

Segundo Costa (2011), foi a partir do ano de 1895 que a atividade ganhou impulso com o início dos trabalhos de seleção e cruzamentos dentre as raças de aves importadas, sendo selecionadas as características de maior interesse econômico aos criadores brasileiros. Neste contexto, foram lançadas as bases da avicultura industrial dando vistas à expansão populacional brasileira, que passou de 10 milhões no ano de 1872 para 30,6 milhões de habitantes em 1920. No ano de 1913, visando profissionalizar o setor, foi fundada em São Paulo a Sociedade Brasileira de Avicultura. (Costa, 2011)

2.1.2 Resíduo da cama de viário ou cama de frango

A intensificação da avicultura nas últimas décadas transformou o Brasil em um dos maiores produtores mundiais de carne de frango. Consequentemente, observa-se uma geração crescente de resíduos orgânicos, especialmente a cama de frango, composta por fezes, restos de ração, penas e material vegetal utilizado como substrato.

Nesse contexto, a Figura 3 apresenta a granja de frango, local de origem do resíduo e a cama de frango utilizada neste estudo, evidenciando suas características visuais e estruturais. A observação dessas condições produtivas permitiu compreender o volume e a natureza do resíduo gerado ao longo do ciclo produtivo e nos instigou a pesquisar, buscar, descobrir, reaproveitar e transformar esse resíduo avícola em algo benéfico e reaproveitável.

Figura 3 - Imagem de granja de frango



Fonte: Adaptado de Embrapa (2021)

Partindo do pressuposto que, o acúmulo e o descarte inadequado desse material podem gerar sérios impactos ambientais, como a emissão de gases de efeito estufa (GEE), a contaminação de corpos d'água por nutrientes e a proliferação de microrganismos patogênicos. (Silva *et al.*, 2020)

Tornou-se, fundamental buscar alternativas sustentáveis para o manejo e aproveitamento da cama de frango. A escolha foi o aproveitamento desse resíduo na produção de biochar por meio da pirólise. Segundo Lehmann e Joseph (2015), a pirólise é um processo

termoquímico de decomposição de materiais orgânicos na ausência parcial ou total de oxigênio, que resulta na formação do biochar. Esse material carbonoso estável é rico em carbono fixo e tem sido amplamente estudado por suas propriedades de sequestro de carbono, melhoria da qualidade do solo e retenção de nutrientes. (Santos *et al.*, 2021)

Por outro lado, segundo Nunes, Pereira e Araújo (2019) a cama de frango quando disposta de forma inadequada, libera compostos voláteis como amônia (NH_3), metano (CH_4) e óxidos de nitrogênio (N_2O), que contribuem para o aquecimento global e a degradação da qualidade do ar. Para Oliveira *et al* (2020) a elevada concentração de nitrogênio e fósforo presente na cama de frango pode contribuir para processos de eutrofização em corpos hídricos, especialmente quando o resíduo é aplicado sem manejo adequado.

Em concordância com a afirmação de Oliveira *et al.*, (2020) é possível afirmar que a conversão da cama de frango em biochar surge como uma alternativa ambientalmente adequada, capaz de reduzir o volume do resíduo, imobilizar nutrientes e minimizar a emissão de gases durante o tratamento. Conforme, Zhang *et al* (2021) alguns estudos relataram que a pirólise reduziu em até 80% o volume inicial da biomassa e eliminou microrganismos patogênicos, tornando o produto final seguro para aplicação agrícola.

Em suma, no transcorrer das atividades laboratoriais, dos estudos e análises realizadas, foi possível obter uma boa qualidade do biochar produzido e a eficiência em todo o processo, como o controle da temperatura da pirólise, a taxa de aquecimento e o tempo de residência.

Usou-se, como base para a prática desse trabalho, a afirmação de Fernandes *et al.* (2022), segundo o mesmo, as temperaturas entre 400 °C e 600 °C são as mais estudadas para a cama de frango, produzindo biochars com alto teor de cinzas, pH alcalino e elevada concentração de fósforo e potássio.

Para Tan *et al* (2017) a temperatura exerce influência significativa sobre a estabilidade química e o teor de carbono fixo do biochar e as temperaturas mais baixas (300–400 °C) tendem a gerar maior rendimento em massa, mas com produtos mais reativos e menos estáveis, já temperaturas mais altas (>500 °C) aumentam a estabilidade do carbono, reduzem o teor de compostos voláteis e promovem uma estrutura mais aromática.

2.2 Pirólise

A pirólise consiste em um processo de degradação térmica de caráter endotérmico, realizado em condições com ausência total ou parcial de oxigênio. Nesse processo, o material é submetido a temperaturas elevadas, geralmente entre 500 e 800 °C, promovendo a

decomposição de seus componentes orgânicos. Em geral, esse processo gera produtos recicláveis, incluindo carvão, óleo e gases combustíveis, sendo possível otimizar as condições do procedimento para aumentar o volume de produção de cada um deles. (Arenas, 2019; Chen *et al.*, 2014; Pedroza, 2011)

Nesse contexto, a pirólise pode ser entendida como um processo termoquímico que varia não apenas em função da temperatura, mas também de outros parâmetros operacionais que influenciam os objetivos e os produtos finais do processo. Entre as principais variáveis destacam-se a taxa de aquecimento, a temperatura de operação, o tempo de residência das fases sólida e gasosa e o tamanho das partículas da biomassa, as quais determinam o comportamento reacional e a distribuição dos produtos obtidos durante a pirólise. Dessa forma, diferentes modos de condução do processo, como pirólise lenta, rápida ou flash, de acordo com as condições termodinâmicas e cinéticas adotadas. (Pahnila *et al.*, Bridg 2023)

A seguir, esses procedimentos de degradação térmica podem ser divididos em categorias, conforme o quadro 1:

Quadro 1 - Variantes e variáveis do processo de pirólise

Variantes do processo	Tempo de residência	Taxa de aquecimento	Temperatura do processo (°C)	Produtos obtidos
Carbonização	Horas ou dia	muito baixa	400 à 450	Carvão vegetal
Convencional	5 à 30 min	baixa	até 600	Bio-óleo, carvão e gás
Rápida	0,5 à 5 s	média	500 à 550	Bio-óleo
Flash-líquido	menor que 1 s	alta	menor que 650	Bio-óleo
Flash-gás	menor que 1 s	alta	maior que 650	Gás combustível
Ultra-rápida	menor que 0,5 s	muito alta	1000	Produtos químicos e gás combustível
Vácuo	2 à 30 s	média	400	Bio-óleo
Metano-pirólise	menor que 10 s	alta	maior que 700	Produtos químicos
Hidro-pirólise	menor que 10 s	alta	maior que 500	Bio-óleo e produtos químicos

Fonte: Adaptado de Gómez (2002 *apud* Bridgwater, 1991).

Por isso, a pirólise como forma de transformação de biomassas foi uma alternativa interessante, se comparada com outras destinações de resíduos sólidos, já que a dimensão de uma usina pirolítica é mais flexível. Ademais, essa opção está recebendo cada vez mais atenção em pequenas cidades, pois evita o transporte de longa distância dos resíduos.

Nas grandes cidades, também há demanda por novos métodos de descarte, devido à crescente dificuldade em encontrar novos locais para incineradores e aterros sanitários. (Chen *et al.*, 2014).

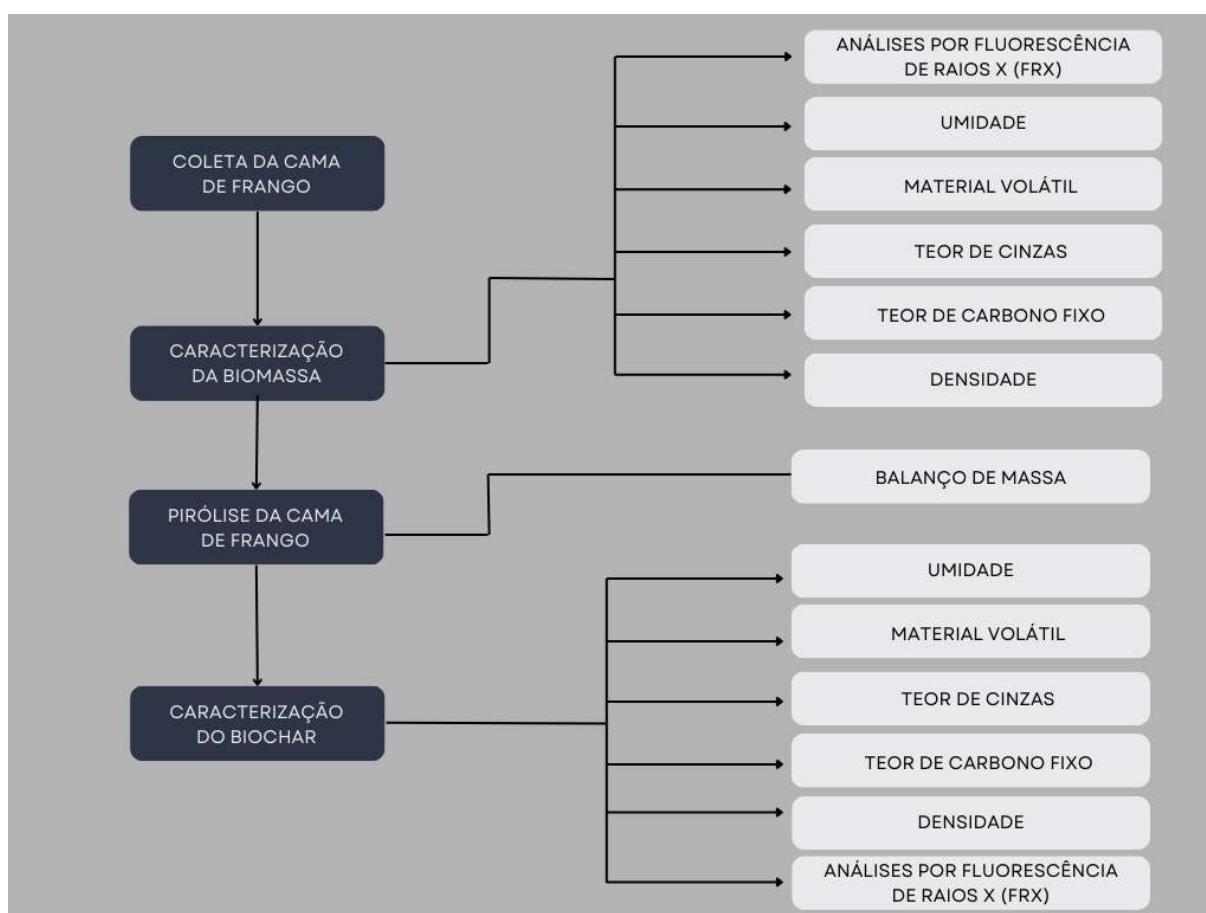
3. METODOLOGIA

3.1 Tipo de pesquisa

O presente estudo foi desenvolvido nas dependências do LARSEN (Laboratório de Inovação em Aproveitamento de Resíduos e Sustentabilidade Energética) do Instituto Federal do Tocantins (IFTO), Campus Palmas. A metodologia utilizada nesta pesquisa foi baseada no diagrama esquemático (Figura 4), sendo destacadas as seguintes atividades experimentais: (a) coleta e caracterização de biomassa, (b) realização de ensaios de pirólise da mistura da cama de frango e (c) determinação da qualidade do biochar obtido.

Os experimentos foram conduzidos com base em normas e metodologias reconhecidas, como as da Sociedade Americana para Ensaios e Materiais. (American Society for Testing and Materials – ASTM)

Figura 4 - Fluxograma contendo os testes e experimentos a serem realizados



Fonte: Autoria própria (2026)

3.2 Coleta do material

A coleta de cama de frango *in natura* (Figura 5) foi realizada nas dependências da Fazenda AGRIVITA, município de Tocantinópolis - TO, localizada no norte do Estado do Tocantins, na região amazônica do Brasil. Atualmente a fazenda tem uma produção de 60 a 70 mil frangos por lote, sendo os aviários alojados com 12 a 14 aves por metro quadrado.

Figura 5 - Cama de frango *in natura*



Fonte: Autoria própria (2026)

3.3. Caracterização da biomassa

Para caracterizar a biomassa estudada composta pela mistura da cama de frango na proporção de 1:1 (kg/kg), foram realizados diversos ensaios com o objetivo de conhecer suas características, como teor de umidade, material volátil, teor de cinzas, análise térmica e teor de carbono fixo. Inicialmente, a cama de frango passou por um processo de secagem em estufa, visando remover qualquer excesso de umidade presente na biomassa.

3.3.1 Umidade

A determinação do teor de umidade da cama de frango seguiu os procedimentos descritos na norma ASTM D3173-87. Para isso, aproximadamente 1 g de amostra foi

acondicionada em um cadinho de porcelana, registrando-se previamente o seu peso inicial. Em seguida, o cadinho foi colocado em uma estufa do tipo SP-200 (Figura 6), mantida a 105 °C, onde permanecerá por 1 hora para a remoção da umidade presente no material.

Figura 6 - Estufa



Fonte: Adaptado de Marconi (2025)

$$\textit{Umidade} \text{ (\%)} = \left(\frac{p-p'}{a} \right) \times 100 \quad \textbf{(Equação 1)}$$

Após esse período de aquecimento, o cadinho foi removido da estufa e colocado em um dessecador (Figura 7), onde permaneceu por aproximadamente 15 minutos para resfriamento. Em seguida, foi realizada a pesagem final da amostra.

Com esses valores, aplicou-se a Equação 1 para determinar o percentual de umidade do material.

Onde:

p = peso próprio do cadinho + peso da amostra inicial (em gramas);

p' = peso próprio do cadinho + peso da amostra pós aquecimento em estufa (em gramas);

a = peso da amostra inicial (em gramas).

Figura 7 - Dessecador



Fonte: Adaptado de CQA.Quimica (2025)

3.3.2 Teor de cinzas

Para a determinação do teor de cinzas da biomassa, o procedimento adotou as diretrizes da norma ASTM D3174-04. Uma amostra de aproximadamente 1 g foi acondicionada em um cadinho de porcelana previamente pesado e, em seguida, levada ao forno mufla (Figura 8). O material permaneceu no equipamento por 1 hora, sob temperatura de 710 °C, para que ocorresse a completa queima da fração orgânica.

Figura 8 - Forno Mulfa



Fonte: Adaptação de Splabor (2025)

Após o término do aquecimento, o cadinho foi retirado do forno e colocado em um dessecador, onde permaneceu por cerca de 1 hora para resfriamento. Em seguida, foi efetuada a pesagem final. Com esses valores, aplicou-se a Equação 2 para determinar o percentual de cinzas da amostra.

$$\textbf{Teor de cinzas} (\%) = \left(\frac{p - p'}{a} \right) \times 100 \quad (\text{Equação 2})$$

Onde:

p = peso próprio do cadinho + peso da amostra inicial (em gramas);

p' = peso próprio do cadinho + peso da amostra pós aquecimento em estufa (em gramas);

a = peso da amostra inicial (em gramas).

3.3.3 Material volátil

A determinação do teor de materiais voláteis da cama de frango foi realizada com base no procedimento descrito por Batista Júnior (2017) e conforme a norma ASTM D3175-07. Para isso, aproximadamente 1 g de amostra foi colocada em um cadinho de porcelana previamente estabilizado em massa e, em seguida, transferida para um forno tipo mufla, mantendo-se a tampa de vedação fechada durante o aquecimento.

A amostra foi submetida a uma temperatura de 850 °C por 7 minutos. Após esse período, o cadinho foi resfriado e novamente pesado. Com os valores obtidos, a Equação 3 foi aplicada para calcular o teor percentual de material volátil.

$$\textbf{Material volátil} (\%) = \left(\frac{p - p'}{a} \right) \times 100 \quad (\text{Equação 3})$$

Onde:

p = peso próprio do cadinho + peso da amostra inicial (em gramas);

p' = peso próprio do cadinho + peso da amostra pós aquecimento em estufa (em gramas);

a = peso da amostra inicial (em gramas).

3.3.4 Teor de carbono fixo

O teor de carbono fixo da amostra foi obtido de forma indireta, por meio da diferença entre os valores previamente determinados nos ensaios de umidade, cinzas e materiais voláteis. Para esse cálculo, foi aplicada a Equação 4, utilizando os resultados obtidos nas etapas anteriores.

$$Tcf (\%) = 100 - [Umidade(\%) + Material volátil(\%) + Teor de cinzas (\%)]$$

(Equação 4)

3.3.5 Determinação dos elementos químicos

A identificação dos elementos químicos presentes nas amostras foi conduzida por meio de uma análise semiquantitativa baseada na técnica de fluorescência de raios X (FRX). As análises foram realizadas com o auxílio de um espectrômetro de fluorescência de raios X PANalytical, modelo Epsilon.

3.3.6 Densidade

A determinação da densidade da Biomassa foi realizada utilizando uma proveta de 100mL (Figura 9), previamente acoplada a uma balança de precisão (Figura 10) para que seu peso seja tarado. Após esse procedimento, a amostra foi inserida na proveta para continuidade do ensaio. Após esse procedimento, porções da biomassa deverão ser adicionadas gradualmente à proveta, registrando-se o peso correspondente em cada intervalo de volume de 20, 40, 60, 80 e 100 mL.

Figura 9 - Proveta



Fonte: Autoria própria (2026)

Figura 10 - Balança de Precisão



Fonte: Adaptado de Euripesa (2025)

Com os valores obtidos, calculou-se a densidade média do material por meio da Equação 5, que relaciona massa e volume do elemento analisado:

$$\text{Densidade (g/mL)} = \frac{m}{v} \quad (\text{Equação 5})$$

Onde:

M = massa (em gramas);

V = volume (em mL).

3.4 Pirólise da biomassa

A pirólise do material foi conduzida a uma temperatura de 600 °C, adotando-se uma taxa de aquecimento de 30 °C por minuto. A amostra permaneceu na temperatura final durante 30 minutos, tempo necessário para garantir a completa conversão térmica prevista no processo.

A escolha da temperatura de 600 °C foi baseada nas recomendações de Fernandes *et al.* (2022), que indicam que a faixa entre 400 °C e 600 °C é amplamente empregada na produção de biochar a partir da cama de frango. Segundo os autores, nessa faixa de temperatura são obtidos biochars com elevado teor de cinzas, pH alcalino e alta concentração de fósforo e potássio, características desejáveis para aplicação agrícola.

Além disso, Tan *et al.* (2017) afirmam que a temperatura exerce influência significativa sobre a estabilidade química e o teor de carbono fixo do biochar. Segundo os autores, temperaturas mais baixas (300–400 °C) tendem a gerar maior rendimento em massa, porém com produtos mais reativos e menos estáveis. Já temperaturas superiores a 500 °C favorecem o aumento da estabilidade do carbono, reduzem o teor de compostos voláteis e promovem maior aromaticidade estrutural.

Antes do ensaio, o resíduo foi previamente seco em estufa a 50 °C foi acondicionado em uma barca metálica, que teve sua massa medida vazia e, posteriormente, com o material, por meio de uma balança analítica, permitindo a determinação da massa inicial e o cálculo do rendimento após a pirólise.

Em seguida, a barca contendo a biomassa foi posicionada no reator termoeletrico (Figura 11), centralizada na câmara de aquecimento para assegurar uniformidade térmica durante todo o procedimento.

Figura 11 - Reator Termoelétrico



Fonte: Autoria própria (2026)

Antes do início do processo de pirólise, realizou-se a configuração do reator termoelétrico, definindo-se os parâmetros de temperatura, taxa de aquecimento e tempo de residência da biomassa no interior da câmara. Além disso, ajustou-se a a potência da caldeira vertical (Figura 12), responsável pela geração de vapor d'água utilizado como gás de arraste durante o procedimento.

Figura 12 - Caldeira



Fonte: Autoria própria (2026)

O balanço de massa do processo de pirólise foi realizado com base no princípio da conservação da massa, considerando as quantidades de material na entrada e na saída do sistema. Para isso, foi registrada a massa inicial de biomassa adicionada ao reator e, ao final do procedimento, a massa de biochar obtido.

Com esses valores, foram determinados o balanço de massa (Equação 6) e o rendimento do processo (Equação 7).

$$M_c = M_e - M_s \quad (\text{Equação 6})$$

$$\text{Rendimento (\%)} = \frac{M_c}{M_e} * 100 \quad (\text{Equação 7})$$

Onde:

M_c = massa do carvão (em gramas);

M_e = massa de entrada (em gramas);

M_s = massa de saída (em gramas)

3.5 Espectrometria de Fluorescência de Raios-X (FRX)

A determinação da composição elementar das amostras foi realizada por meio da técnica de fluorescência de raios X (FRX). Essa técnica baseia-se, fundamentalmente, na interação entre a radiação incidente e os átomos presentes na amostra, resultando na emissão de radiações secundárias características de cada elemento químico.

Inicialmente, as amostras foram submetidas à incidência de raios X, o que promove a excitação dos elétrons das camadas internas dos átomos. Em decorrência desse processo, ocorre a emissão de radiação com energias específicas, permitindo a identificação dos elementos presentes. Além disso, a intensidade da radiação emitida está diretamente relacionada à concentração desses elementos na amostra analisada.

Para a realização das análises, utilizou-se um espectrômetro de fluorescência de raios X, operando sob condições apropriadas de tensão e calibração. Dessa forma, foi possível obter resultados de caráter qualitativo e semiquantitativo, com capacidade de detecção de elementos a partir do flúor.

Posteriormente, os dados obtidos foram processados por meio de software específico do

equipamento, sendo os resultados expressos em termos de composição percentual relativa dos elementos químicos presentes nas amostras. Ademais, essa análise foi aplicada tanto à biomassa *in natura* quanto ao biochar obtido após o processo de pirólise, possibilitando a comparação entre os materiais.

3.6 Caracterização do Biochar

O biochar obtido após o processo de pirólise da cama de frango foi submetido a uma série de ensaios laboratoriais para determinar suas propriedades físico-químicas. Os procedimentos seguiram metodologia similar à aplicada na caracterização da biomassa antes da conversão térmica, conforme descrito nos itens anteriores.

3.6.1 Umidade

A determinação do teor de umidade do carvão foi conduzida conforme descrito no item 3.3.1, seguindo as diretrizes da ASTM D3173-87, adaptada para amostras de Biochar.

3.6.2 Teor de cinzas

O teor de cinzas foi avaliado conforme o procedimento apresentado no item 4.3.2 em conformidade com a norma ASTM D3174-04, quantificando o resíduo mineral não combustível presente no carvão obtido.

3.6.3 Material volátil

A fração de materiais voláteis do carvão foi determinada de acordo com o método descrito no item 4.3.3, seguindo as instruções da ASTM D3175-07.

3.6.4 Teor de carbono fixo

O teor de carbono fixo foi calculado por diferença, seguindo o procedimento previamente estabelecido no item 4.3.4, considerando os resultados obtidos nos ensaios de umidade, cinzas e voláteis.

3.6.5 Densidade

A densidade aparente do carvão foi medida conforme o método apresentado no item 4.3.6, por meio da relação entre massa e volume da amostra. No entanto, tendo uma modificação com relação ao método volumétrico, utilizando-se uma proveta de 50 mL, registrando-se o peso correspondente em cada intervalo de volume de problema, previamente acoplada a uma balança de precisão para a tara do sistema. Após esse procedimento, o material foi inserido na proveta de forma gradual, com o registro da massa correspondente aos volumes ocupados, permitindo o cálculo da densidade aparente do biochar.

A densidade média foi determinada a partir da relação entre a massa do material e o volume ocupado, conforme a Equação 5, no item 4.3.6.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Caracterização da Biomassa

Com a finalidade de promover a caracterização da biomassa estudada, foram realizadas análises de caráter imediato, determinação do teor de umidade, do material volátil, do teor de cinzas e do carbono fixo.

Os resultados obtidos a partir desses procedimentos foram apresentados e discutidos nas seções subsequentes.

4.1.1 Análise imediata

Os resultados da análise imediata da cama de frango utilizados neste estudo estão apresentados na Tabela 1, contemplando teor de umidade, materiais voláteis, cinzas e carbono fixo. Esses parâmetros são fundamentais para interpretar o comportamento da biomassa em processos termoquímicos, pois influenciam diretamente tanto o desempenho em combustão quanto o rendimento e a distribuição de produtos em pirólise.

Tabela 1 - Resultados da análise imediata da biomassa

Nº amostra	Umidade (%)	Material Volátil (%)	Cinzas (%)	Carbono fixo (%)
A1	13,36	67,42	14,95	4,25
A2	12,69	65,57	15,48	6,25
A3	13,18	62,35	16,33	8,12
Valores médios (%)	13,08	65,12	15,59	6,21

Fonte: Autoria própria (2026).

À medida que o teor de umidade aumenta, maior é a energia necessária para aquecer e evaporar a água presente no material, reduzindo a eficiência energética do processo e, no caso de pirólise, podendo elevar a fração aquosa do condensado. (Fonseca *et al.*, 2019; Demirbas, 2004)

Recomenda-se que a biomassa apresente teores de umidade reduzidos, e valores

inferiores a 10% são usualmente apontados como desejáveis para melhor desempenho, no caso de níveis muito elevados, sobretudo acima de 43%, tornam-se inadequados para utilização em caldeiras devido à redução do poder calorífico e ao maior consumo de energia associado à evaporação. (García *et al.*, 2012)

No presente estudo, a cama de frango apresentou umidade média de 13,08%, valor acima do intervalo ideal mais restritivo, porém inferior aos observados por Pereira *et al.* (2021) (15,25%) e por Francielli (2022) (20,91%), indicando uma condição relativamente mais favorável do material analisado quanto à remoção de água. Outro parâmetro decisivo para o aproveitamento energético é o teor de cinzas, correspondente à fração inorgânica que não participa da combustão e, portanto, reduz a fração efetivamente combustível.

Além do exposto anteriormente, a composição mineral da biomassa pode intensificar problemas operacionais, como deposição/incrustações, escorificação e corrosão em equipamentos térmicos. (Jenkins *et al.*, 1998; Shao *et al.*, 2012) No que tange ao presente estudo, o teor médio de cinzas obtido neste estudo (15,59%) foi superior ao reportado por Pereira *et al.* (2021) (12,76%) e significativamente inferior ao encontrado por Francielli (2022) (34,42%). Essa variação é coerente com a influência do manejo, da idade da cama e do acúmulo de material mineral ao longo de sucessivos ciclos produtivos, o que tende a elevar a fração inorgânica do resíduo.

No que tange aos materiais voláteis, essa fração está associada à liberação rápida de compostos gasosos e vapores durante o aquecimento, contribuindo para a ignição e o início da combustão; assim, valores mais elevados tendem a favorecer o comportamento de ignição do combustível. (Jenkins *et al.*, 1998; Mckendry, 2002)

No presente estudo, o teor de materiais voláteis foi de 65,12%, próximo ao valor reportado por Pereira *et al.* (2021) (70,69%) e superior ao observado por Francielli (2022) (57,58%), sugerindo comportamento térmico adequado da biomassa analisada para aplicações energéticas.

Em se tratando do carbono fixo, este representa a parcela sólida remanescente após a liberação dos voláteis, associada à manutenção da combustão por maior tempo e, em rotas termoquímicas, à fração precursora de maior estabilidade no produto sólido. (Mckendry, 2002) O carbono fixo médio obtido neste estudo (6,21%) foi inferior ao reportado por Pereira *et al.* (2021) (16,55%) e próximo ao observado por Francielli (2022) (8,01%), evidenciando o comportamento esperado de compensação entre frações: materiais com maior teor de voláteis tendem a apresentar menor parcela relativa de carbono fixo.

Dessa forma, a comparação apresentada na Tabela 2, indica que os resultados deste

estudo se inserem nas faixas reportadas na literatura para a cama de frango, permitindo contextualizar as características físico-químicas da biomassa analisada. Além disso, as diferenças observadas entre os estudos podem estar associadas a fatores como condições de manejo, número de ciclos produtivos, idade da cama e metodologias empregadas, os quais influenciam diretamente a composição do material.

Tabela 2 - Comparativo entre trabalhos de análise imediata da Cama de frango

Características	Experimento	Pereira <i>et al.</i>,(2019)^(a)	Francielli, F., (2022)^(b)
Umidade (%)	13,08	15,25	20,91
Mat. volátil(%)	65,12	70,69	57,58
Cinzas (%)	15,59	12,76	34,42
Carbono fixo (%)	6,21	16,55	8,01

^(a) e ^(b) Biomassa a partir da cama de frango *in natura*

Fonte: Autoria própria (2026)

4.1.2 Densidade da Biomassa

O ensaio de densidade transcorreu de acordo com os procedimentos metodológicos indicados, tendo os seus resultados expostos na Tabela 3.

Tabela 3 - Resultados do ensaio de densidade da biomassa

Massa (g)	Volume (mL)	Densidade (g/mL)
6,75	20	0,3375
14,54	40	0,3635
22,20	60	0,370
29,10	80	0,3637
34,74	100	0,3774
Densidade média (g/mL)		0,3624

Fonte: Autoria própria (2026).

Segundo Bolan *et al.* (2010), a densidade aparente da cama de frango pode variar conforme o manejo e o grau de compactação, situando-se geralmente entre 0,3 e 0,8 g/cm³. De

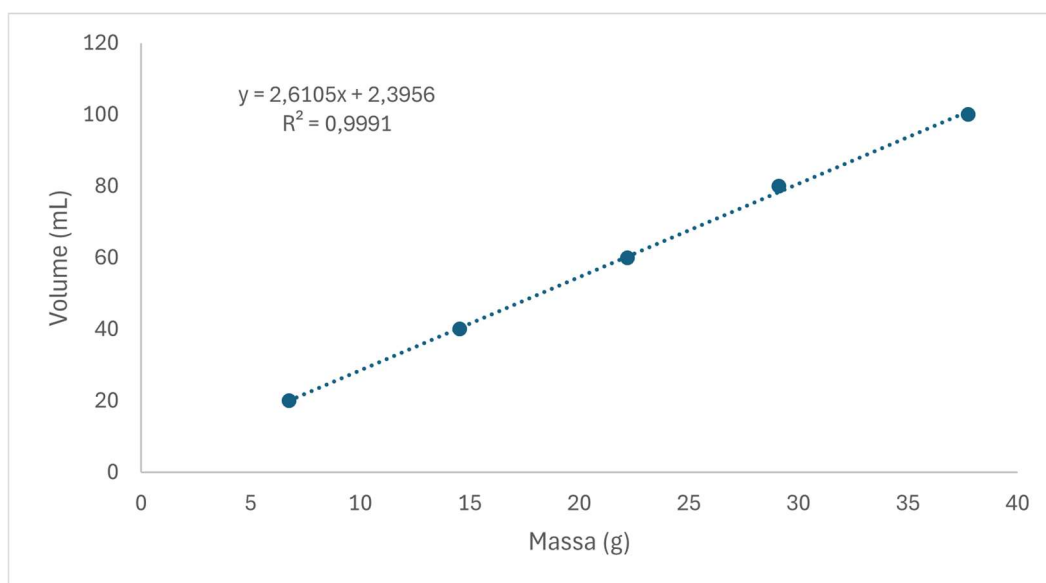
forma semelhante, Ro, Cantrell e Hunt (2010) observaram valores próximos a 0,5-0,7 g/cm³ para resíduos avícolas antes da conversão termoquímica.

Nesse contexto, o valor médio obtido neste estudo mostra-se compatível com os intervalos reportados na literatura, indicando comportamento físico coerente com outras amostras de cama de frango descritas em estudos anteriores.

Com base nesses dados experimentais, construiu-se um gráfico (Figura 13) relacionando a massa (eixo X) e o volume (eixo Y), no qual cada ponto representa uma etapa do enchimento da proveta. Com isso, análise gráfica evidenciou um comportamento linear entre as variáveis, indicando uma distribuição homogênea da biomassa ao longo do volume analisado.

Logo, a equação da reta obtida foi expressa por $y = 2,6105x + 2,3936$, com coeficiente de determinação $R^2 = 0,9991$, demonstrando excelente correlação linear entre massa e volume. Esse elevado valor de R^2 confirma a consistência dos dados experimentais e a confiabilidade do método adotado para a determinação da densidade aparente da biomassa.

Figura 13 - Gráfico densidade Biomassa



Fonte: Autoria própria (2026)

4.2 Rendimento do Biochar a partir da Cama de Frango.

Após os processos de pirólise, o peso do Biochar produzido foi obtido por diferença entre os pesos de entrada e saída dos procedimentos, analisando o rendimento, conforme Tabela 4.

Tabela 4 - Rendimento do carvão 600 °C

Descrição	Carvão 600 °C
Peso barca (g)	241,42
Peso barca + biomassa (g)	301,42
Peso biomassa (g)	60,00
Peso barca + Biochar (g)	262,42
Massa do Biochar (g)	21
Rendimento (%)	35,00

Fonte: Autoria própria (2026).

Desse modo, percebe-se que o processo de pirólise a 600 °C produziu 21 g de biochar, sendo a massa de entrada da cama de frango igual a 60 g, apresentando, assim, um rendimento de 35,00%.

Os ensaios de pirólise realizados com a cama de frango resultaram em um rendimento gravimétrico de biochar variando entre 33% e 35%, considerando as condições operacionais adotadas neste estudo, com temperatura de 600 °C, taxa de aquecimento de 30 °C min⁻¹ e tempo de residência de 30 minutos. Esses valores indicam uma conversão eficiente da biomassa em material carbonáceo sólido, evidenciando o potencial da cama de frango como matéria-prima para a produção de biochar.

Resultados compatíveis são reportados por Pereira (2024), como descrito na Tabela 5, que avaliou a produção de biochar a partir da cama de frango em diferentes temperaturas de pirólise. De acordo com o autor, a pirólise realizada a 600 °C resultou em rendimento de carvão em torno de 38%, sendo observada uma redução gradual do rendimento sólido com o aumento da temperatura, em função da maior liberação de compostos voláteis e da intensificação da formação das frações líquida e gasosa do processo. Essa tendência corrobora os resultados obtidos neste trabalho, uma vez que temperaturas elevadas favorecem maior degradação térmica da biomassa.

Tabela 5 - Comparação do rendimento de biochar com dados da literatura

Características	Experimento	Pereira(2024)^(a)	Kimura (2009)^(b)
Rendimento (%)	35	38,00	38,38

Fonte: Autoria própria (2026).

De forma complementar, Kimura (2009) como demonstrado na tabela 5, investigou a pirólise de resíduos agroindustriais, incluindo a cama de frango, utilizando temperatura de 450 °C, obtendo rendimento gravimétrico de biochar da ordem de 38,38%. O maior rendimento observado nesse estudo, quando comparado ao presente trabalho, pode ser atribuído principalmente à menor temperatura de pirólise, condição que favorece a preservação de uma fração sólida maior do material original, reduzindo a conversão em produtos líquidos e gasosos.

Dessa forma, ao comparar os resultados obtidos neste estudo com aqueles descritos na literatura, verifica-se que o rendimento de biochar produzido a partir da cama de frango encontra-se dentro da faixa esperada para processos de pirólise desse resíduo. As variações observadas entre os trabalhos estão diretamente relacionadas às condições operacionais do processo, especialmente à temperatura de pirólise, à taxa de aquecimento e ao tempo de residência, parâmetros que exercem influência significativa na distribuição dos produtos da pirólise e no rendimento do biochar.

4.3 CARACTERIZAÇÃO DO BIOCHAR

4.4 Análise imediata

De forma análoga ao procedimento adotado na caracterização da biomassa, o biochar obtido a partir da cama de frango também foi submetido a ensaios de caracterização, com o objetivo de avaliar suas propriedades e subsidiar a análise de seu potencial de aplicação agrícola. As análises realizadas permitiram a verificação de parâmetros relevantes para a qualidade do material, considerando o processo de pirólise conduzido a 600 °C, conforme descrito na metodologia.

Após a conclusão dos ensaios, foram determinados os valores característicos do biochar produzido, os quais estão apresentados na Tabela 6, de acordo com os procedimentos metodológicos adotados neste estudo. Conforme, esses resultados possibilitaram a comparação do material obtido com dados reportados na literatura e a avaliação da eficiência do processo

de pirólise na conversão da cama de frango em um biochar com propriedades adequadas para uso como condicionador de solo.

Tabela 6 - Análise imediata do Biochar obtido na temperatura de 600 °C

Variável analítica	Biochar (600 °C)
Umidade (%)	4,63
Material volátil (%)	23,44
Cinzas (%)	43,06
Carbono fixo (%)	28,87

Fonte: Autoria própria (2026)

Para fins de análise comparativa, a Tabela 6 apresenta os resultados obtidos neste estudo em confronto com dados reportados na literatura. Os biochars utilizados como referência foram produzidos a partir da cama de frango, por meio de processos termoquímicos conduzidos em diferentes condições operacionais, com temperaturas de pirólise variando entre 450 °C e 600 °C, conforme descrito em estudos anterior.

Tabela 7 - Comparativo entre trabalhos de análise imediata de Biochar

Características	Experimento	Pereira <i>et al.</i> ,(2021) ^(a)	Kimura, (2009) ^(b)
Umidade (%)	4,63	4,49	1,64
Material volátil (%)	23,44	24,11	16,79
Cinzas (%)	43,06	34,40	48,65
Carbono fixo (%)	28,87	41,49	34,56

^(a) Biochar produzido a partir da pirólise da cama de frango a 600°C

^(b) Biochar produzido a partir da pirólise da cama de frango a 450°C

Fonte: Autoria própria (2026).

De modo geral, observa-se que a conversão termoquímica promove redução significativa do teor de materiais voláteis e concentração relativa das frações de carbono fixo e cinzas. (Bridgwater, 2012; Lehmann; Joseph, 2015)

Em se tratando do teor de umidade do biochar obtido neste estudo foi de 4,63%, valor próximo ao reportado por Pereira *et al.* (2021), de 4,49%, e superior ao encontrado por Kimura (2009), de 1,64%.

De acordo com Demirbas (2004) e McKendry (2002), elevados teores de umidade reduzem a eficiência da combustão, pois parte significativa da energia liberada é consumida na evaporação da água presente no material. Para aplicações energéticas mais eficientes, recomenda-se que a biomassa apresente baixos teores de umidade, geralmente inferiores a 15%, a fim de evitar perdas energéticas e garantir maior estabilidade do processo térmico. (Oberberger; Thek, 2004)

Nesse contexto, os valores observados para os biochars comparados encontram-se abaixo desses limites, indicando condição favorável para aplicações energéticas.

Em relação ao teor de materiais voláteis, verificou-se que o biochar produzido apresentou valor de 23,44%, próximo ao observado por Pereira *et al.* (2021), de 24,11%, e superior ao reportado por Kimura (2009), de 16,79%. A literatura aponta que o aumento da temperatura de pirólise favorece a volatilização de compostos orgânicos, resultando em biochars com menor teor de voláteis e maior estabilidade estrutural. (Bridgwater, 2012; Lehmann; Joseph, 2015). Dessa forma, diferenças entre os trabalhos podem estar associadas às distintas condições operacionais empregadas, especialmente temperatura e tempo de residência.

O teor de cinzas obtido neste estudo (43,06%) apresentou-se intermediário quando comparado aos valores de Pereira *et al.* (2021), de 34,40%, e Kimura (2009), de 48,65%. O aumento relativo do teor de cinzas em biochars, quando comparado à biomassa *in natura*, é esperado, uma vez que durante a pirólise ocorre a degradação da fração orgânica, concentrando os componentes minerais originalmente presentes na matéria-prima. (Lehmann; Joseph 2015)

Quanto ao carbono fixo, o valor obtido neste estudo (28,87%) foi inferior ao reportado por Pereira *et al.* (2021), de 41,49%, e também inferior ao observado por Kimura (2009), de 34,56%. Conforme descrito por Bridgwater (2012), a elevação da temperatura de pirólise tende a promover maior formação de estruturas aromáticas condensadas, aumentando o teor de carbono fixo e a estabilidade do biochar. Assim, as diferenças observadas entre os trabalhos podem estar relacionadas às variações nas condições de processamento adotadas.

De modo geral, os resultados da análise imediata do biochar produzido neste estudo mostram-se compatíveis com aqueles reportados na literatura para materiais obtidos a partir da pirólise de resíduos agroindustriais em faixas de temperatura entre 450 °C e 600 °C, indicando coerência técnica dos dados obtidos e reforçando o potencial do biochar como material com características energéticas e estruturais adequadas.

4.4.1 Densidade do Biochar

O ensaio de densidade do biochar transcorreu de acordo com os procedimentos metodológicos previamente descritos, tendo seus resultados apresentados na Tabela 7.

Tabela 8 - Resultados do ensaio de densidade do Biochar

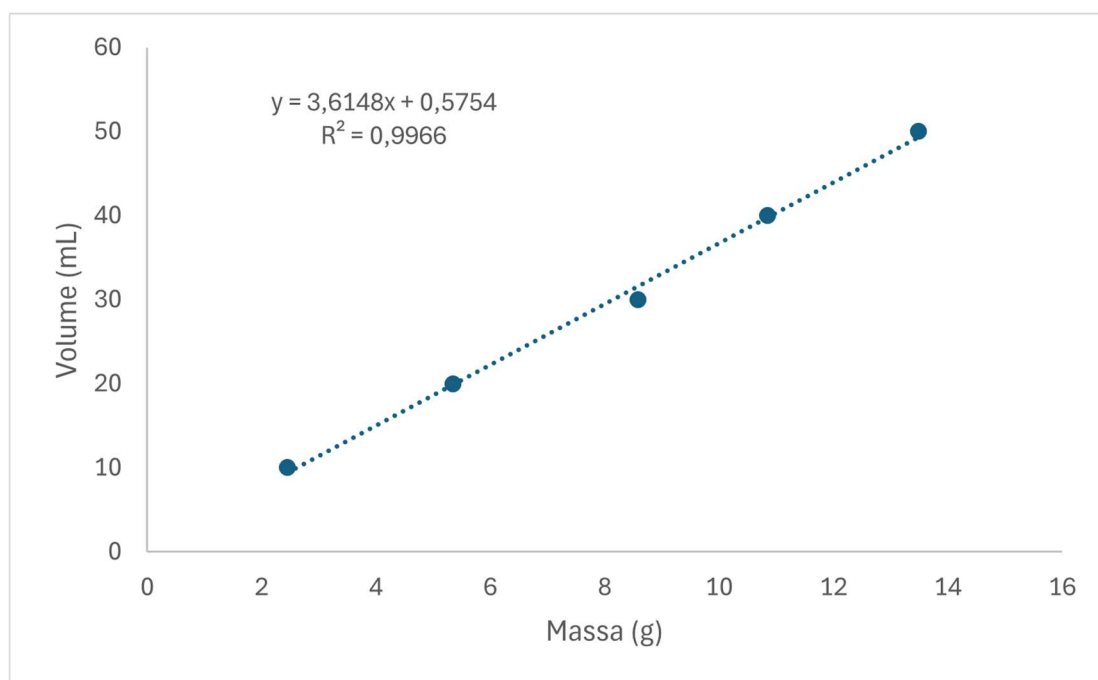
Massa (g)	Volume (mL)	Densidade (g/mL)
2,45	10	0,245
5,34	20	0,267
8,58	30	0,286
10,85	40	0,271
13,48	50	0,2696
Densidade média (g/mL)		0,26777

Fonte: Autoria própria (2026)

A partir dos dados obtidos no ensaio de densidade do biochar, apresentados na (Tabela 8), foi elaborada uma representação gráfica com o objetivo de avaliar a relação entre a massa adicionada e o volume ocupado pelo material.

O ensaio foi conduzido por meio da adição gradual do biochar em uma proveta graduada de 100 mL, com registros sucessivos de massa correspondentes aos volumes ocupados, permitindo a obtenção da densidade aparente do material pela razão entre massa e volume.

Com base nesses dados experimentais, construiu-se um gráfico (Figura 14) relacionando a massa (eixo X) e o volume (eixo Y), no qual cada ponto representa uma etapa do enchimento da proveta. A análise gráfica evidenciou um comportamento linear entre as variáveis, indicando distribuição relativamente homogênea do material ao longo do volume avaliado.

Figura 14 - Gráfico da densidade do Biochar

Fonte: Autoria própria (2026)

A equação da reta obtida foi expressa por:

$$y = 3,6148x + 0,5754$$

O coeficiente de determinação $R^2 = 0,9966$, demonstrando excelente correlação linear entre massa e volume. Esse elevado valor de R^2 confirma a consistência dos dados experimentais e a confiabilidade do método adotado para a determinação da densidade aparente do biochar.

A densidade média obtida para o biochar foi de 0,26777 g/mL, valor inferior ao determinado anteriormente para a biomassa *in natura* (0,3624 g/mL). Essa redução é esperada, uma vez que o processo de pirólise promove a devolatilização da fração orgânica e o desenvolvimento de uma estrutura mais porosa, resultando em material com menor massa por unidade de volume. (Lehmann; Joseph, 2015)

A menor densidade aparente do biochar está associada ao aumento da porosidade e à formação de estruturas carbonosas mais leves, características típicas de materiais submetidos a conversão termoquímica.

De modo geral, os resultados obtidos indicam que o biochar produzido apresenta densidade compatível com valores reportados na literatura para materiais carbonizados obtidos

a partir de resíduos agroindustriais, reforçando a adequação do processo experimental empregado.

4.5 Características Químicas da Biomassa e do Biochar

Após a realização das análises laboratoriais por fluorescência de raios X (FRX), foi possível comparar a composição química da cama de frango *in natura* (Amostra 315) e do biochar produzido a partir da cama de frango via pirólise a 600 °C (Amostra 290), apresentados na Tabela 8.

Esses dados permitem avaliar as alterações na concentração e no comportamento dos elementos químicos decorrentes do processo de conversão térmica.

Tabela 9 - Elementos químicos determinados em amostra da cama de frango *in natura* e do biochar a 600 °C

Elemento	Cama de frango <i>in natura</i>	Biochar 600 °C
Si (%)	0,384	1,560
P (%)	0,796	2,643
S (%)	1,068	0,997
Cl (%)	1,187	2,751
K (%)	8,864	16,676
Ca (%)	6,742	13,075
Ti (%)	395,5	584,2
Mn (%)	0,180	0,241
Fe (%)	0,680	0,837
V (ppm)	3,3	29,7
Se (ppm)	-	3,5
As (ppm)	0,0	0,389
Ni (ppm)	-	22,3
Cu (ppm)	0,145	0,150

Tabela 9 – Continuação.

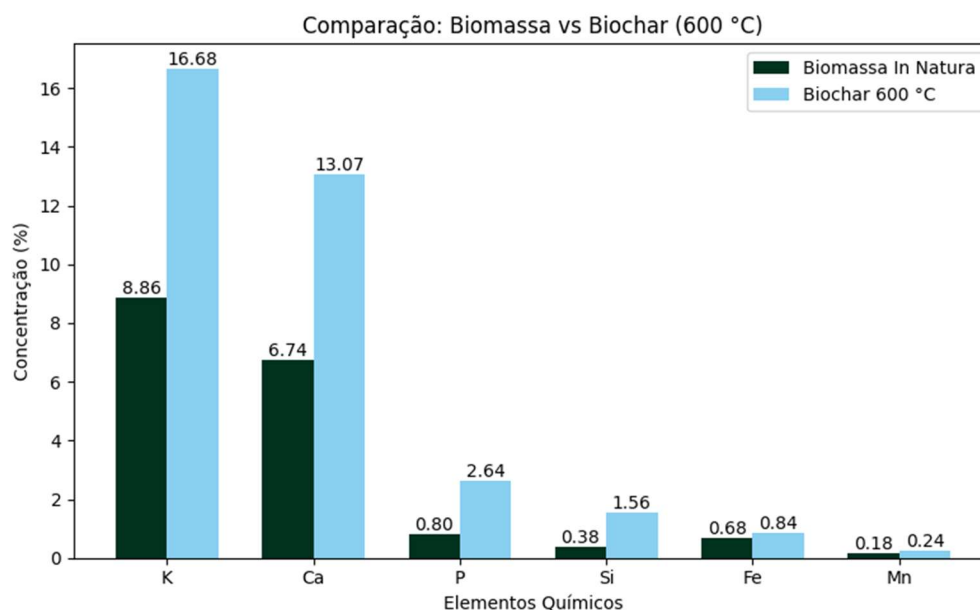
Elemento	Cama de frango <i>in natura</i>	Biochar 600°C
Zn (ppm)	0,351	0,573
Ga (ppm)	261,1	2,807
Ge (ppm)	970,3	391,2
Br (ppm)	832,5	0,309
Sr (ppm)	392,4	494,9
Y (ppm)	128,7	790,5
Zr (ppm)	23,1	36,7
Mo (ppm)	61,5	75,4
Ce (ppm)	53,6	162,3
Eu (ppm)	0,0	46,8
Yb (ppm)	-	56,4
Lu (ppm)	0,162	300,3
Re (ppm)	841,1	479,3
Os (ppm)	215,3	65,6
Rb (ppm)	147,8	199,6
Pb (ppm)	3,8	12,0

Fonte: Autoria própria(2026).

Após a conversão da cama de frango em biochar, verifica-se uma concentração relativa de diversos elementos mineiros, resultado da perda de frações orgânicas voláteis durante a pirólise. Esse processo promove a imobilização parcial de elementos potencialmente tóxicos, reduzindo sua biodisponibilidade e o risco de lixiviação, o que representa uma vantagem ambiental significativa em relação à aplicação direta da biomassa *in natura*.

A fim de complementar a análise dos dados obtidos por fluorescência de raios X (FRX) e facilitar a visualização das variações nos principais elementos de interesse agrônômico, a Figura 15 apresenta uma comparação entre a composição da biomassa *in natura* e do biochar produzido a 600 °C, com destaque para os elementos potássio (K), cálcio (Ca), fósforo (P) e silício (Si).

Figura 15 - Comparação da concentração de elementos químicos (K, Ca, P e Si) entre a cama de frango *in natura* e o biochar



Fonte: Autoria própria (2026)

Observa-se um aumento significativo na concentração desses elementos após o processo de pirólise, o que está associado à perda de matéria orgânica volátil e consequente concentração da fração mineral. Esse comportamento está em consonância com o observado na literatura, conforme destacado por Singh *et al.* (2010) e Gai *et al.* (2014), que apontam a elevação do conteúdo mineral em biochars provenientes de resíduos orgânicos.

O potássio e o fósforo, em particular, são nutrientes essenciais para o desenvolvimento vegetal, atuando em processos fisiológicos fundamentais, enquanto o cálcio contribui para a estruturação do solo e o silício pode desempenhar papel importante na resistência das plantas a estresses bióticos e abióticos. Dessa forma, o aumento desses elementos no biochar reforça seu potencial de aplicação como condicionador de solo e insumo agrícola.

Além disso, a transformação em biochar favorece a formação de uma matriz carbonácea mais estável, capaz de reter nutrientes na sua estrutura por adsorção, diminuindo perdas por escoamento superficial ou percolação no solo. Essa característica contribui não apenas para a fertilidade agrícola, mas também para a mitigação de impactos ambientais associados ao descarte inadequado da cama de frango.

Dessa forma, a pirólise da cama de frango não apenas mantém o potencial fertilizante do resíduo, como também reduz riscos ambientais, melhora o controle sobre a liberação de nutrientes e amplia suas possibilidades de uso sustentável, incluindo aplicações na melhoria da

qualidade do solo, na mitigação da poluição difusa e no sequestro de carbono a longo prazo.

5. CONCLUSÃO

Com base nos resultados obtidos ao longo deste estudo, a caracterização da cama de frango e do biochar produzido por meio da pirólise evidenciou que a conversão térmica desse resíduo avícola constitui uma alternativa eficiente para o seu reaproveitamento.

A partir das análises realizadas, verificou-se que a biomassa apresentou características compatíveis com aquelas descritas na literatura, especialmente em relação aos teores de umidade, materiais voláteis, cinzas e carbono fixo, indicando sua adequação para aplicação em processos termoquímicos. Além disso, o processo de pirólise conduzido a 600 °C demonstrou eficiência na conversão da biomassa em biochar, apresentando rendimento dentro da faixa esperada para esse tipo de resíduo.

No que se refere às propriedades do biochar produzido, os resultados evidenciaram características relevantes para aplicação agrícola, como a presença de nutrientes de interesse agrônomo, a exemplo de potássio, cálcio e fósforo, além de propriedades físico-químicas adequadas. Esses aspectos indicam que o material possui potencial para atuar como condicionador de solo, contribuindo para a melhoria da fertilidade e da retenção de nutrientes.

Considerando o contexto da região Norte do Tocantins, caracterizada pela predominância de pequenos produtores rurais e pela significativa geração de resíduos oriundos da atividade avícola, a conversão da cama de frango em biochar mostra-se uma alternativa tecnicamente viável e ambientalmente adequada. Isso se justifica pelo fato de que, nessas condições, o manejo inadequado desse resíduo pode provocar impactos negativos ao meio ambiente e à saúde, como a contaminação do solo e de recursos hídricos, além da proliferação de microrganismos.

Nesse sentido, a utilização da pirólise como estratégia de tratamento possibilita não apenas a redução dos impactos ambientais associados ao descarte inadequado da cama de frango, mas também a valorização desse resíduo, transformando-o em um produto com potencial de aplicação agrícola. Dessa forma, essa abordagem contribui para a promoção de práticas mais sustentáveis, alinhadas aos princípios da economia circular e ao fortalecimento da produção agrícola regional.

REFERÊNCIAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE PROTEÍNA ANIMAL (ABPA). **Produção de carne de frango em 2021**. Disponível em: <https://abpa-br.org/>. Acesso em: 10 out. 2025.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE PROTEÍNA ANIMAL (ABPA). **Relatório anual 2025**. São Paulo: ABPA, 2025. Disponível em: <https://abpa-br.org/>. Acesso em: 17 set. 2025.
- ARENAS, C. N.; NAVARRO, M. V.; MARTÍNEZ, J. D. **Pyrolysis kinetics of biomass wastes using isoconversional methods and the distributed activation energy model. Bioresource Technology**, v. 288, p. 121485, 2019. DOI: 10.1016/j.biortech.2019.121485. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.121485>. Acesso em: 15 fev. 2026.
- ÁVILA, V. S.; MAZZUCO, H.; FIGUEIREDO, E. A. P. **Cama de aviário: materiais, reutilização, uso como alimento e fertilizante**. Concórdia: Embrapa Suínos e Aves, 1992. 32 p. (Embrapa Suínos e Aves. Circular Técnica, 16).
- BATISTA JÚNIOR, R. **Pirólise da borra de café: cinética química e operação em leito fixo**. 2017. Dissertação (Mestrado em Química) — Universidade Federal do Triângulo Mineiro, Uberaba, 2017.
- BERNARDI, A. C. de C.; MACHADO, P. L. O. de A.; SILVA, C. A. Fertilidade do solo e demanda por nutrientes no Brasil. In: MANZATTO, C. V.; FREITAS JÚNIOR, E. de; PERES, J. R. R. (ed.). **Uso agrícola dos solos brasileiros**. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2002. p. 61–77. Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/>. Acesso em: 26 out. 2025.
- BOLAN, N. S. et al. Uses and management of poultry litter. **World's Poultry Science Journal**, v. 66, n. 4, p. 673–698, 2010. DOI: 10.1017/S0043933910000656. Disponível em: <https://doi.org/10.1017/S0043933910000656>. Acesso em: 15 fev. 2026.
- BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Instrução Normativa nº 15, de 17 de junho de 2001. **Dispõe sobre o uso da cama de aviário para alimentação de ruminantes**. Disponível em: <http://www.mapa.gov.br>. Acesso em: 1 out. 2025.
- BRIDGWATER, A. V. Review of fast pyrolysis of biomass and product upgrading. **Biomass and Bioenergy**, v. 38, p. 68–94, 2012. DOI: 10.1016/j.biombioe.2011.01.048. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2011.01.048>. Acesso em: 15 fev. 2026.
- CHA, J. S.; PARK, S. H.; JUNG, S. C.; RYU, C.; JEON, J. K.; SHIN, M. C.; PARK, Y. K. Production and utilization of biochar: a review. **Journal of Industrial and Engineering Chemistry**, v. 40, p. 1–15, 2016. DOI: 10.1016/j.jiec.2016.06.002. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2016.06.002>. Acesso em: 26 jan. 2026.
- CHEN, D. et al. **Pyrolysis technologies for municipal solid waste: a review**. Waste Management, v. 34, n. 12, p. 2466–2486, 2014.

CHEN, Z.; JIANG, X. **Microbiological safety of chicken litter or chicken litter-based organic fertilizers: a review**. *Agriculture*, v. 4, n. 1, p. 1–29, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/agriculture010001>. Acesso em: 15 fev. 2026.

COSTA, S. **A saga da avicultura brasileira: como o Brasil se tornou o maior exportador mundial de carne de frango**. São Paulo: UBABEF, 2011.

CQA QUÍMICA. **Dessecador completo 200 mm com tampa e luva**. 2025. Disponível em: <https://www.cqaquimica.com.br/dessecador-completo-200mm-ctampa-cluva-5538-acompanha-placa-de-porcelana>. Acesso em: 15 fev. 2026.

DEMIRBAS, A. Combustion characteristics of different biomass fuels. **Progress in Energy and Combustion Science**, v. 30, n. 2, p. 219–230, 2004. DOI: 10.1016/j.pecs.2003.10.004. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2003.10.004>. Acesso em: 13 fev. 2026.

EMBRAPA. **Cama de frango: manejo e aproveitamento**. Brasília: Embrapa, 2021.

EURIPESA. **Balança de laboratório**. [s. d.]. Disponível em: <https://euripesa.pt/balancas-precisao-laboratorio/balanca-laboratorio-ald-410g-x-0-001g/>. Acesso em: 15 fev. 2026.

FERNANDES, M. R.; COSTA, D. F.; RIBEIRO, L. M. Produção e caracterização de biochar de cama de frango em diferentes temperaturas de pirólise. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 26, n. 3, p. 415–423, 2022.

FERREIRA, T. O. et al. **Biochar: potencial uso agrícola e ambiental**. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 2019.

FONSECA, F. G. et al. Moisture content as a design and operational parameter for fast pyrolysis. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, v. 139, p. 73–86, 2019. DOI: 10.1016/j.jaap.2019.01.012. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2019.01.012>. Acesso em: 13 fev. 2026.

FRANCIELLI, F. **Caracterização e análise imediata da cama de frango e outros resíduos para o aproveitamento energético**. 2022. Trabalho de Conclusão de Curso — Universidade Federal do Paraná, Palotina, 2022. Disponível em: https://palotina.ufpr.br/lpb/wp-content/uploads/sites/4/2022/10/TCC_FRANCIELLI.pdf. Acesso em: 6 jan. 2026.

GARCIA, R. G.; PAZ, I. C. L. A.; CALDARA, F. R. **Papel da cama na produção e bem-estar de frangos de corte**. 2010. Disponível em: <http://www.avisite.com.br/>. Acesso em: 12 out. 2025.

GARCÍA, R. et al. Characterization of Spanish biomass wastes for energy use. **Bioresource Technology**, v. 103, n. 1, p. 249–258, 2012. DOI: 10.1016/j.biortech.2011.10.004. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2011.10.004>. Acesso em: 13 fev. 2026.

GÓMEZ, E. O. **Estudo da pirólise rápida de capim elefante em leito fluidizado borbulhante mediante caracterização dos finos de carvão**. 2002. Tese (Doutorado) — Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2002.

GRABER, E. R.; HAREL, Y. M.; KOLTON, M.; CYTRYN, E.; SILBER, A.; DAVID, D. R.; TSECHANSKY, L.; BORISOVER, M.; ELAD, Y. Biochar impact on development and productivity of pepper and tomato grown in fertigated soilless media. **Plant and Soil**, v. 337, n. 1–2, p. 481–496, 2010. DOI: 10.1007/s11104-010-0546-4. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11104-010-0546-4>. Acesso em: 15 fev. 2026.

JENKINS, B. M.; BAXTER, L. L.; MILES JR., T. R.; MILES, T. R. Combustion properties of biomass. **Fuel Processing Technology**, v. 54, p. 17–46, 1998. DOI: 10.1016/S0378-3820(97)00059-3. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S0378-3820\(97\)00059-3](https://doi.org/10.1016/S0378-3820(97)00059-3). Acesso em: 13 fev. 2026.

KIMURA, L. M. **Caracterização físico-química de biochar obtido a partir de cama de frango**. 2009. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) — Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2009.

LEHMANN, J. Bio-energy in the black. **Frontiers in Ecology and the Environment**, v. 5, n. 7, p. 381–387, 2007. DOI: 10.1890/1540-9295(2007)5[381:BITB]2.0.CO;2. Disponível em: [https://doi.org/10.1890/1540-9295\(2007\)5\[381:BITB\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1890/1540-9295(2007)5[381:BITB]2.0.CO;2). Acesso em: 6 set. 2025.

LEHMANN, J.; JOSEPH, S. (org.). **Biochar for environmental management: science, technology and implementation**. 2. ed. London: Earthscan, 2015.

MACHADO, P. L. de A. Carbono do solo e a mitigação da mudança climática global. **Química Nova**, v. 28, n. 2, p. 329–334, 2005. DOI: 10.1590/S0100-40422005000200026. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0100-40422005000200026>. Acesso em: 5 nov. 2025.

MARCONI. **Estufa de esterilização e secagem** – produto 168. 2025. Disponível em: <https://marconi.com.br/produto/168/estufa-de-esterilizacao-e-secagem>. Acesso em: 15 fev. 2026.

MARCOS, Fábio M. et al. Caracterização da biomassa de cama de frango para avaliação de propriedades térmicas e termoquímicas. **Química Nova na Escola**, 2019, v. 11, n. 4, no prelo. Disponível em: <http://static.sites.sbq.org.br/rvq.sbq.org.br/pdf/FabioMNoPrelo.pdf>. Acesso em: 15 fev. 2026.

MCKENDRY, P. Energy production from biomass (Part 1): overview of biomass. **Bioresource Technology**, v. 83, n. 1, p. 37–46, 2002. DOI: 10.1016/S0960-8524(01)00118-3. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S0960-8524\(01\)00118-3](https://doi.org/10.1016/S0960-8524(01)00118-3). Acesso em: 13 fev. 2026.

NAKASHIMA, G. T. **Production, soil amendment and sustainability of sugarcane trash biochar**. 2020. 91 f. Tese (Doutorado em Planejamento e Uso de Recursos Renováveis) — Universidade Federal de São Carlos, Sorocaba, 2020.

NOVAK, J. M.; BUSSCHER, W. J.; LAIRD, D. L.; AHMEDNA, M.; WATTS, D. W.; NIANDOU, M. A. S. Impact of biochar amendment on fertility of a southeastern coastal plain soil. **Soil Science**, v. 174, n. 2, p. 105–112, 2009. DOI: 10.1097/SS.0b013e3181981d9a.

NUNES, T. A.; PEREIRA, R. S.; ARAÚJO, A. M. Impactos ambientais do descarte de resíduos avícolas e alternativas de aproveitamento. **Ciência Rural**, v. 49, n. 12, e20190156, 2019.

OBERNBERGER, I.; THEK, G. Physical characterisation and chemical composition of densified biomass fuels with regard to their combustion behaviour. **Biomass and Bioenergy**, v. 27, n. 6, p. 653–669, 2004. DOI: 10.1016/j.biombioe.2003.07.006.

OLIVEIRA, M. J.; BARBOSA, L. R.; COSTA, V. A. Eutrofização e manejo de resíduos de cama de frango no Brasil. **Revista Ambiente & Água**, v. 15, n. 2, e2415, 2020.

OLIVEIRA, N. G. et al. Cama de frango como alternativa sustentável de resíduo na agricultura. **Journal of Agronomic Sciences**, v. 8, n. 2, [s. d.]. Disponível em: <https://periodicos.uem.br/ojs/index.php/jas/article/view/78506>. Acesso em: 17 set. 2025.

PAHNILA, M.; KOSKELA, A.; SULASALMI, P.; FABRITIUS, T. A review of pyrolysis technologies and the effect of process parameters on biocarbon properties. **Energies**, v. 16, n. 19, p. 6936, 2023. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1996-1073/16/19/6936>. Acesso em: 17 fev. 2026.

PALHARES, J. C. P. **Resíduos da produção. Brasília: Agência Embrapa de Informação Tecnológica, 2021.** Disponível em: <https://www.embrapa.br/em/agencia-de-informacao-tecnologia/criacoes/frango-de-corte/producao/meio-ambiente/residuos-da-producao>. Acesso em: 17 set. 2025.

PALHARES, J. C. P.; KUNZ, A. **Manejo ambiental na avicultura.** Concórdia: Embrapa Suínos e Aves, 2011. 221 p.

PEDROZA, M. M. **Bio-óleo e biogás da degradação termoquímica de lodo de esgoto doméstico em cilindro rotativo.** 2011. Tese (Doutorado) — Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2011.

PESSÔA, G. B. S.; TAVERNARI, F. C.; VIEIRA, R. A.; ALBINO, L. F. T. Novos conceitos em nutrição de aves. **Revista Brasileira de Saúde e Produção Animal**, v. 13, n. 3, p. 755–774, 2012.

PEREIRA, M. E.; VARANDA, L. D.; NAKASHIMA, G. T.; HANSTED, A. L. S.; SILVA, D. A.; TOMELERI, J. O. P.; BELINI, G. B.; YAMAJI, F. M. Caracterização da biomassa de cama de frango para fabricação de biochar. **Revista Virtual de Química**, v. 11, n. 4, p. 1330–1343, 2019. DOI: 10.21577/1984-6835.20190092. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.21577/1984-6835.20190092>. Acesso em: 15 fev. 2026.

PEREIRA, M. E.; VARANDA, L. D.; CARVALHO, N. R. de; SETTE JR., C. R.; PÁDUA, F. A. de; CONTI, A. C. de; YAMAJI, F. M. Biochar produced from poultry

litter waste. **Research, Society and Development**, v. 10, n. 11, p. e3511011119704, 2021. DOI: 10.33448/rsd-v10i11.19704. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.33448/rsd-v10i11.19704>. Acesso em: 12 jan. 2026.

PEREIRA, M. E. **Biochar de cama de frango: produção, aplicação e análise de suas propriedades no solo e no cultivo de rabanetes**. 2024. 145 f. Tese (Doutorado em Planejamento e Uso de Recursos Renováveis) — Universidade Federal de São Carlos, Campus Sorocaba, Sorocaba, 2024.

PETTER, F. A.; MADARI, B. E. Biochar: agronomic, and environmental potential in Brazilian savannah soils. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 16, n. 7, p. 761–768, 2012. DOI: 10.1590/S1415-43662012000700009. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S1415-43662012000700009>. Acesso em: 24 out. 2025.

RO, K. S.; CANTRELL, K. B.; HUNT, P. G. High-temperature pyrolysis of blended animal manures for producing renewable energy and value-added biochar. **Industrial & Engineering Chemistry Research**, v. 49, n. 20, p. 10125–10131, 2010. DOI: 10.1021/ie101422c. Disponível em: <https://doi.org/10.1021/ie101422c>. Acesso em: 15 fev. 2026.

SANTOS, E. H.; COSTA, J. L.; MOREIRA, A. S. Efeitos do biochar na mitigação de gases de efeito estufa em solos agrícolas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 45, e0200132, 2021.

SANTOS, T. M. B.; LUCAS JR., J. Utilização de resíduos da avicultura de corte para produção de energia. In: **ZOOTECH 2003; CONGRESSO INTERNACIONAL DE ZOOTECHNIA, 5.; CONGRESSO NACIONAL DE ZOOTECHNIA, 13.**, 2003, Uberaba. Anais [...]. Uberaba: [s. n.], 2003. p. 131–141.

SHAO, Y. et al. Ash deposition in biomass combustion or co-firing for power/heat generation. **Energies**, v. 5, n. 12, p. 5171–5189, 2012. DOI: 10.3390/en5125171. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1996-1073/5/12/5171>. Acesso em: 13 fev. 2026.

SHARPLEY, A. N.; DANIEL, T. C.; SIMS, J. T.; LEMUNYON, J. L.; STEVENS, R. G.; PARRY, R. **Agricultural phosphorus and eutrophication**. Washington, DC: USDA-ARS, 1998. Disponível em: <https://www.ars.usda.gov.pdf>. Acesso em: 15 fev. 2026.

SILVA, P. R.; ALMEIDA, F. B.; ROCHA, M. T. Gestão sustentável de resíduos da avicultura. **Revista Tecnologia e Ambiente**, v. 26, n. 2, p. 92–104, 2020.

SILVEIRA, D. C.; VIEIRA, F. M. Caracterização da geração de resíduos da produção de frangos de corte. **Naturae**, São José dos Pinhais, v. 2, n. 1, p. 34–39, 2020.

SPLABOR. Forno mufla digital. Disponível em: <https://www.splabor.com.br/produto/forno-mufla-digital-microprocessado-com-1-rampa-dimensoes-internas-15x10x12cm-modelo-sp-1200dmb-splabor-preco-promocional-ate-o-fim-do-estoque-r-2-67000-2/>. Acesso em: 15 fev. 2026.

TAN, Z.; LIN, C.; ZHOU, Y. Effect of pyrolysis temperature on characteristics and nutrient value of chicken litter biochar. **Bioresource Technology**, v. 243, p. 236–24, [s. d.].

THOMAZINI, A. Reutilização de cama de aviário compostada na produção agrícola. **Research, Society and Development**, v. 11, n. 7, e33141728042, 2022. DOI: 10.33448/rsd-v11i7.28042. Disponível em: <https://doi.org/10.33448/rsd-v11i7.28042>.

VAN ZWIETEN, L.; KIMBER, S.; MORRIS, S.; DOWNIE, A.; BERGER, E.; RUST, J.; SCHEER, C. Effects of biochar from slow pyrolysis of papermill waste on agronomic performance and soil fertility. **Plant and Soil**, v. 327, n. 1–2, p. 235–246, 2010. DOI: 10.1007/s11104-009-0050-x. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11104-009-0050-x>.

VILARINO, C. Fazenda é flagada oferecendo “cama de frango” na alimentação de bovinos em MG. **Globo Rural**, 2021. Disponível em: <https://globorural.globo.com>. Acesso em: 15 nov. 2025.

WANG, Y. et al. Biochar amendment reduces paddy soil nitrogen leaching but increases net global warming potential in Ningxia irrigation, China. **Scientific Reports**, v. 7, n. 1, p. 1592, 2017.

ZHANG, X.; WANG, H.; HE, L. Pyrolysis of poultry litter and its effect on greenhouse gas mitigation. **Waste Management**, v. 120, p. 310–318, 2021