

BIODIGESTÃO ANAERÓBIA DE ESTERCO DE FRANGO PARA PRODUÇÃO DE ENERGIA LIMPA

Isa Beatriz Conceição Oliveira
Universidade Federal de Sergipe (UFS)

Hortência Elucielly Pereira de Santana
Universidade Federal de Sergipe (UFS)

Ingrid Vieira Fernandes
Universidade Federal de Sergipe (UFS)

Isadora Vieira Fernandes
Universidade Federal de Sergipe (UFS)

Samara de Jesus Santos
Universidade Federal de Sergipe (UFS)

Isabelly Pereira da Silva
Universidade Federal de Sergipe (UFS)

Daniel Pereira Silva
Universidade Federal de Sergipe (UFS)

Denise Santos Ruzene
Universidade Federal de Sergipe (UFS)

RESUMO

O esterco de frango é frequentemente utilizado como fertilizante natural para melhoria da produtividade do solo e da produção agrícola, principalmente por pequenos produtores rurais. Entretanto, devido a rica composição orgânica, estes resíduos animais também possuem potencial para contribuir com a produção de energia, seja ela térmica ou elétrica. Nesse cenário, o esterco de frango é utilizado para alimentar biodigestores anaeróbios, os quais são equipamentos que utilizam comunidades bacterianas para promover a degradação da matéria orgânica e gerar uma mistura de gases chamada de biogás. O biogás é composto essencialmente por CH_4 (gás metano), CO_2 (dióxido de carbono), H_2 (gás hidrogênio) e H_2S (gás sulfídrico), sendo os dois primeiros os principais gases responsáveis pelo alto potencial energético. Além da biodigestão anaeróbia, também é possível realizar codigestão anaeróbia de esterco, onde este é tratado juntamente com outro tipo de resíduo, aumentando a produção de biogás e, por consequência, de potencial energético.

Palavras-chave: Biodigestão, Biogás, Esterco Animal, Matéria Orgânica.

INTRODUÇÃO

O Brasil está entre os países líderes do setor avícola, ocupando a posição de maior exportador e de segundo maior produtor de carne de frango do mundo. As exportações brasileiras de carne de frango chegam a cerca de 4,7 milhões de toneladas por ano, correspondendo a 35% do montante total (USDA, 2024). Enquanto a produção representa cerca de 14% da parcela mundial com 14,9 milhões de toneladas de carne de frango sendo processada só no ano de 2023. A produção brasileira fica atrás apenas dos Estados Unidos, que produziu 21,08 milhões de toneladas no mesmo ano (USDA, 2024).

Por consequência da grande produção e processamento de carne de frango, o Brasil também está entre os grandes contribuintes para geração de resíduos orgânicos. Deste setor tem-se como subprodutos desde as penas e esterco, resultantes do período de desenvolvimento da ave, até os resíduos gerados nos abatedouros como as vísceras, penas e sangue (Méndez-Contreras *et al.*, 2024). Dessa forma, para evitar os problemas que o descarte incorreto desses resíduos possa causar, tem-se a necessidade de serem empregados métodos que promovam a reutilização deles de modo a prevenir a contaminação do meio ambiente.

O esterco de frango é rico em nitrogênio, fósforo, cálcio e potássio, nutrientes ideais para a fertilização das plantas (Thaha *et al.*, 2020). Na zona rural, o esterco de frango é comumente utilizado como fertilizante em plantações, porém, esse uso indiscriminado pode gerar a sobrecarga de nitrogênio e fósforo nos solos e lençóis freáticos. Segundo Palhares e Kunz (2011), o nitrato - estado mais oxidado do nitrogênio - é a forma preferencial de absorção de nitrogênio pelas plantas. Por ser um ânion, o nitrato está sujeito ao processo de lixiviação em que ocorre a retirada dos nutrientes do solo por agentes naturais como a água, podendo assim atingir lençóis freáticos e tornar as águas subterrâneas tóxicas para o consumo humano.

De acordo com os mesmos autores, o fósforo é o principal responsável pela eutrofização de corpos d'água, em que o excesso de nutrientes propicia o crescimento de algas e plantas aquáticas que se acumulam na superfície aquática diminuindo a penetração da luz. Esse processo dificulta a fotossíntese de outras plantas no meio, que quando morrem iniciam o processo de degradação da

matéria orgânica e, por consequência, reduzem os níveis de oxigênio dissolvido na água, causando a morte da fauna aquática aeróbia.

Na tentativa de desenvolver e consolidar vias tecnológicas que permitam um melhor aproveitamento do potencial dos resíduos avícolas com reintegração dos mesmos nas cadeias produtivas, a biodigestão anaeróbia tem sido intensamente investigada. Esse processo baseia-se na ação das bactérias em ausência de oxigênio (meio anaeróbio) para biorredução dos compostos orgânicos, tendo como resultado a conversão dos resíduos em biogás e biochorume. O biogás é composto majoritariamente por gás metano (CH_4), com menores porções de dióxido de carbono (CO_2), gás hidrogênio (H_2) e traços de outros gases (Laperrière, 2017), que possui alto poder calorífico e pode ser utilizado para geração de energia térmica ou elétrica e como combustível veicular”.

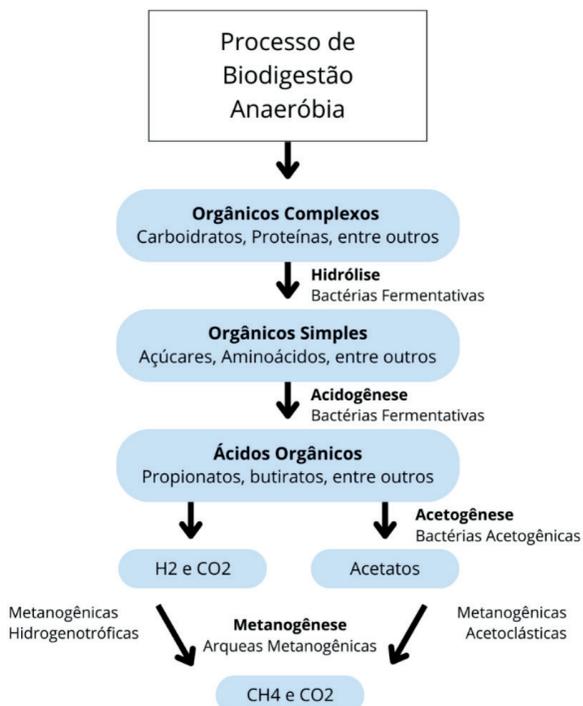
Como extensão da biodigestão há ainda o processo de codigestão anaeróbia, o qual se caracteriza pela biodigestão de mais de um tipo de resíduo. A exemplo tem-se reportado na literatura a combinação de esterco de suíno e resíduos de frango, onde foi constatado que o pré-tratamento dos resíduos de frango antes da biodigestão diminuía a concentração de amônia na reação, melhorando a produção de biogás da codigestão (Schommer *et al.*, 2020). Esterco de gado com esterco de frango e de porco, em que Ameen *et al.* (2021), com o intuito de gerar um maior rendimento de biogás, propuseram o estudo da melhor proporção entre os resíduos, observando que esta seria partes iguais de cada matéria-prima e que a codigestão rendia maior concentração de gás metano em comparação com biodigestão de apenas esterco.

Com base na alta geração de resíduo do setor de produção do frango de corte e tendo em vista seu potencial como fonte de energia, a biodigestão se mostra como um bom método capaz de tratar resíduos orgânicos, com foco em esterco de frango. Esse método possui potencial de minimizar impactos ambientais e promover a energia limpa e renovável. Além disso, a biodigestão não compromete o uso natural desses resíduos para fertilização, uma vez que também propicia um forte biofertilizante como subproduto. Dentro deste contexto, este trabalho apresenta uma breve revisão sobre a biodigestão anaeróbia de esterco de frango para produção de energia limpa.

Biogás

O biogás é um produto da decomposição de resíduos orgânicos a partir de uma comunidade microbiana complexa composta de variados grupos de bactérias e arqueas que, como produtos metabólicos, geram diversos gases durante as fases da biodigestão: hidrólise, acidogênese, acetogênese e metanogênese (Chernicharo, 2007), como mostrado no esquema da Figura 1.

Figura 1 - Etapas de degradação da matéria orgânica e seus produtos.



Fonte: Autores (2024).

A primeira fase, chamada de hidrólise, é onde as partículas mais complexas (carboidratos, proteínas e outros) são decompostas por bactérias fermentativas (*Clostridium*, *Bacillus*, entre outros) gerando partículas mais simples como açúcares e aminoácidos. Na fase seguinte, chamada de acidogênese, outro grupo das mesmas bactérias fermentativas transformam os açúcares e aminoácidos em ácidos orgânicos (propionato, butirato e outros) ou acetatos. Na terceira fase, denominada acetogênese, esses ácidos são consumidos por bactérias

acetogênicas (*Clostridium*, *Syntrophobacter*, entre outros) que podem gerar tanto gás hidrogênio (H_2) e dióxido de carbono (CO_2), quanto acetatos. Por fim, na fase metanogênica, as arqueas metanogênicas - microrganismos unicelulares mais simples que as bactérias - se subdividem entre arqueas metanogênicas hidrogenotróficas, que consomem o hidrogênio, e arqueas metanogênicas acetoclásticas, que consomem os acetatos, e juntas produzem o mesmo composto, denominado de biogás (Chernicharo, 2007).

O gás metano (CH_4), o mais simples dos hidrocarbonetos, é o principal composto presente no biogás. O poder energético do biogás se deve principalmente ao metano que em solução com os outros gases apresentados na Tabela 1, pode ter um índice calorífico entre 6,0 e 9,4 kWh/Nm³, mas que em condições mais puras pode chegar a um índice de 12 kWh/Nm³ (Chernicharo, 2007).

Tabela 1 - Composição do biogás.

Gás	Símbolo	Concentração (%)
Metano	CH_4	50-80
Dióxido de carbono	CO_2	20-40
Hidrogênio	H_2	1-3
Nitrogênio	N_2	0,5-3,0
Gás sulfídrico e outros	H_2S , CO , NH_3	1-5

Fonte: Coldebella *et al.* (2006, *apud* La Farge, 1979).

A Tabela 1 demonstra que além do metano, o biogás também é formado por dióxido de carbono (CO_2), gás hidrogênio (H_2), nitrogênio (N_2) e resquícios de outros gases que não agregam à geração de energia. Na Tabela 2 está presente comparações do biogás com outros tipos de combustíveis derivados do petróleo e a sua conversão para a energia elétrica.

Tabela 2 - Comparação entre o biogás e outros combustíveis.

Combustíveis	Equivalência a 1 m ³ de biogás
Gasolina	0,613 L
Óleo Diesel	0,553 L
Gás de cozinha (GNL)	0,454 L
Eletricidade	1,428 Kw

Fonte: Barreira (1993).

Conforme apresentado na Tabela 2, o biogás pode ser produzido com o intuito de geração de energia elétrica, mas também como combustível veicular, ou ainda, como gás de cozinha (GNL), normalmente utilizados em botijões de gás. De acordo com Chernicharo (2007), a concentração do gás metano no biogás pode ser influenciada por alguns fatores como o pH da solução que deve estar próximo do neutro ($7\pm 0,5$), a temperatura que deve ser de $37^{\circ}\pm 2^{\circ}\text{C}$ e da presença dos produtos gerados na etapa da acetogênese, devendo fornecer condições ideais para o desenvolvimento das arqueas metanogênicas.

A queima do biogás gera energia térmica com calor suficiente para utilização em sistemas de aquecimento, como caldeiras industriais ou para uso doméstico. O vapor produzido pela queima desse biogás em motores geradores, é utilizado para mover as turbinas do motor, gerando energia mecânica, sendo esta convertida em energia elétrica. Essa, assim como a energia solar, é injetada na rede elétrica da região e descontada na fatura da propriedade, evitando desperdício de energia produzida em horário de pouco uso. Além disso, o biogás também pode ser utilizado como combustível na forma de GNV (Gás Natural Veicular). Para isso, é necessário tratar esse biogás de forma a retirar a umidade, mas também o sulfeto de hidrogênio e o dióxido de carbono (Embrapa, 2022).

Biodigestão anaeróbia

A biodigestão anaeróbica é um processo de fermentação no qual bactérias anaeróbicas consomem resíduos orgânicos, convertendo partículas complexas (carboidratos, proteínas e lipídios) em partículas mais simples (ácidos orgânicos) (UFRGS, 2024). A atividade das bactérias torna possível que as arqueas metanogênicas possam se alimentar dessas partículas de carbono mais simples e, assim, liberar gás metano como resíduo metabólico (Magalhães, 2024).

O processo de digestão é comumente utilizado em estações de tratamento de esgoto, pois além de requerer poucos recursos para operar, uma vez que não demanda de energia elétrica, pode ainda fornecer energia para o sistema mediante a queima do biogás para produção de calor ou eletricidade (Freitas *et al.*, 2022). Geralmente o conjunto de sistemas para o tratamento são unidos a biodigestores anaeróbios e biodigestores aeróbios, os quais usam bactérias que precisam da presença de oxigênio e, por isso, precisam de aeradores

para garantir que haja oxigênio em todo o tanque. Em estações de tratamento autossuficientes a energia gerada a partir do biogás no biodigestor anaeróbio é superior a demanda de energia da estação, diminuindo os custos de manutenção de operação (Freitas *et al.*, 2022).

Os biodigestores também são bastante implementados em zonas rurais para tratar resíduos provenientes da criação de animais de corte, incluindo frangos. O esterco de frango é um dos resíduos de animais com maior potencial energético, se aproximando do potencial energético do carvão segundo o diagrama de van Krevelen (1950). Dessa forma, muitos estudos estão voltados para o seu tratamento em biodigestores com a intenção de aproveitar esse potencial energético. Chen *et al.* (2021) usaram o esterco de frango para avaliar a viabilidade de sua aplicação para produção de energia elétrica, chegando a produzir mais energia que a necessária para a manutenção da avicultura. Reansuwan *et al.* (2021) estudaram o enriquecimento de metano na biodigestão de esterco de frango, obtendo uma concentração de 65-73% do total de biogás.

Em zonas rurais, a utilização do biogás pode ser mais simplificada e direta utilizando o biogás do mesmo modo que ele é gerado. Todavia, em ambientes com maior controle tecnológico, como as estações de tratamento de esgoto, o biogás passa por um tratamento, de modo a minimizar impurezas (sulfeto de hidrogênio e dióxido de carbono em sua maioria) e maximizar o seu potencial energético (Chernicharo, 2007).

Além do biogás, durante o processo de biodigestão também é gerado um resíduo denominado de biochorume ou biofertilizante (Chernicharo, 2007). A NBR 8419:1992 define o biochorume como sendo um líquido escuro formado pela decomposição da matéria orgânica (ABNT, 1996). Esse biochorume possui uma alta taxa de nutrientes e sais minerais que contribuem para a fertilidade do solo. Porém, é um elemento muito concentrado, que não deve ser aplicado diretamente sem prévia diluição, com risco de saturação e contaminação do solo e lençol freático por meio da alta concentração de nitrogênio e fósforo, além de antibióticos e metais pesados (Wang *et al.*, 2021). Ainda de acordo com Wang *et al.* (2021) deve ser feito um pré-tratamento desse biochorume, para que haja a eliminação dos antibióticos e metais pesados e redução dos nutrientes para que ele possa ser utilizado com segurança.

Codigestão anaeróbia

A codigestão anaeróbia é uma extensão da biodigestão anaeróbia em que se utiliza mais de um tipo de resíduo. Esses podem ser do mesmo tipo, como demonstrado por Altinbas e Cicek (2019), que combinaram diferentes proporções de esterco de frango com esterco de gado para aumentar a produção de biogás. Apesar do estudo ter apresentado um melhor resultado para a reação onde o substrato era composto apenas por esterco de frango (256 L/kg), o esterco de frango se mostrou um bom co-substrato para o esterco de gado que sozinho produziu 144 L/kg, enquanto produziu 217 L/kg com 30% de esterco de frango. Ademais, a combinação do substrato pode ser de diferentes tipos de resíduos como por exemplo esterco de frango com resíduos alimentares e lodo doméstico. Nuhu *et al.* (2021) caracterizaram esses resíduos para avaliar a sua eficiência juntos, chegando a uma proporção de 3 kg de esterco de frango para 1 kg de resíduos alimentares e 1 kg de lodo de esgoto, produzindo 5,94 m³ de gás metano em pH bem próximo do neutro (6,9) e temperatura de 27,2°C.

O objetivo de se performar a codigestão pode ser variado, contemplando desde a otimização da produção de biogás a partir de resíduos mais energéticos como o esterco de frango, a maior produção de biogás a partir do aumento de matéria orgânica inserida no reator ou apenas para o tratamento do máximo de resíduos gerados na região. Para que haja uma melhor produção de biogás no reator em processos de codigestão, pode ser feito um estudo para investigar a melhor proporção entre os resíduos a serem utilizados. Zouaghi *et al.* (2021) estudaram diferentes proporções para a codigestão de esterco de frango, resíduos alimentares e lodo digerido, de dois modos diferentes, um utilizando apenas 2 substratos e outro utilizando os três. Com os estudos para a codigestão de apenas dois desses resíduos, o que mais produziu foi a proporção de 30% de esterco de frango com 70% de lodo digerido. Essa proporção obteve quase o dobro de biogás produzido em comparação com a segunda melhor proporção (50% de esterco de frango e 50% de lodo digerido).

Na codigestão com os três resíduos foi mantida a proporção de 70% de lodo digerido, enquanto os outros 30% foram divididos para os outros resíduos, sendo 20% de resíduos alimentares e 10% de esterco de frango como melhor proporção. Ademais, observou-se uma alta presença de amônia no biodigestor,

nutriente proveniente do esterco de frango que inibe a produção de biogás, o que poderia explicar o baixo rendimento do esterco de frango nessa codigestão. Porém, esse resíduo pode ser tratado de forma a reduzir a presença desse nutriente e estimular a produção de biogás (Zouaghi *et al.*, 2021).

Otimização

O sistema de biodigestão anaeróbia, além de reduzir o volume de resíduos, também gera o biogás e o biochorume que podem ser utilizados para manutenção da própria estação ou vendidos. Uma maior concentração de gás metano no biogás é essencial para uma maior produção de energia. Com isso, novos estudos têm focado na otimização desse sistema, com o intuito de melhorar a produção desses produtos ecológicos. Essa otimização pode ocorrer de várias formas como o estudo da microbiologia do sistema para estabelecer os melhores microrganismos para degradar determinados resíduos. O fungo *Trichoderma longibrachiatum*, por exemplo, pode degradar mais rapidamente a amônia presente no esterco de frango, melhorando a produção de biogás em aproximadamente 2,4 vezes (Chaitanoo *et al.*, 2021). Também são realizados estudos de situações ideais de cultivo como temperatura próxima a 37°C e pH próximo ao neutro de modo a deixar o ambiente com as condições ideais para as arqueas metanogênicas (Cai *et al.*, 2021).

Os pré-tratamentos têm o intuito de acelerar a digestão de determinados resíduos de difícil degradação natural, mas com potencial energético, como o esterco de frango, suas penas ou outros resíduos utilizados na biodigestão. Cada resíduo a ser tratado possui algum componente específico em sua composição que dificulta a biodegradação do resíduo ou inibe a produção do gás metano. No caso do esterco de frango é a presença do alto teor de amônia que inibe a produção do gás metano, de modo que o pré-tratamento com remoção de nitrogênio minimiza a presença da amônia da biodigestão (Kirby *et al.*, 2020).

Noori e Ismail (2020) fizeram o uso de ácidos e agentes oxidantes de modo acelerar a decomposição do esterco de frango e aumentar a produção de biogás, resultando em um aumento de 200% e 36%, respectivamente, quando no uso de H₂O₂ (peróxido de hidrogênio) e H₂SO₄ (ácido sulfúrico) como meios de tratamento. Li *et al.* (2022) utilizaram solo de uma granja agrícola com a presença

de alguns gêneros específicos de bactérias como *Bacillus*, *Chryseobacterium*, *Lysobacter*, *Brevibacillus* e *Stenotrophomonas* de modo a acelerar o processo de decomposição das penas de frango, atingindo uma taxa de cerca de 58% de decomposição em apenas 120 h de cultivo, melhorando assim o processo de codigestão com o esterco de frango.

Além disso, outra forma de estimular o aumento da produção de biogás é a partir do controle da temperatura ideal para a fermentação da mistura, diminuindo a concentração de amônia na reação. A amônia inibe a formação de biogás, portanto, quanto menor a sua concentração, maior a geração de biogás. Com isso, o estudo de Yin *et al.* (2018) mostrou que a uma temperatura ideal de 37°C é possível ter uma redução significativa da presença de amônia favorecendo o crescimento das arqueas metanogênicas para biodegradação e geração de gás metano de forma mais concentrada e rápida.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

O biodigestor anaeróbio, por intermédio de sua produção de biogás, é um sistema capaz de gerar grande potencial energético, seja ele térmico ou elétrico; reduz o volume de resíduos que possivelmente causariam prejuízos ambientais ao serem descartados de forma incorreta e ainda é capaz de produzir um biofertilizante forte e concentrado, aproveitando assim o máximo do processo. Com isso, este trabalho apresentou algumas das diversas aplicações deste sistema, tanto em variedade de resíduos a serem utilizados (esterco de frango como material único ou combinado a esterco de outros animais, penas, resíduos alimentares e lodo de esgoto) quanto ao modo que pode ser feito e seus produtos podem ser aproveitados. O uso desse sistema é uma alternativa quanto a busca por energia limpa e renovável, principalmente se empregada em grandes granjas ou fazendas. Ademais, a abrangência de estudos na área da biodigestão do esterco, codigestão e otimizações do sistema evidenciam o grande potencial desse processo com retorno positivo para a sociedade e meio ambiente.

Agradecimentos

Os autores agradecem o apoio financeiro de agências brasileiras de fomento à pesquisa como CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) sob o Código Financeiro 001, e CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico), FAPITEC/SE (Fundação de Apoio à Pesquisa e à Inovação Tecnológica do Estado de Sergipe), e a Universidade Federal de Sergipe.

REFERÊNCIAS

ALTINBAS, M.; CICEK, O. A. Anaerobic co-digestion of chicken and cattle manures: Free ammonia inhibition. **Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects**, v. 41, n. 9, p. 1097-1109, 2019. DOI: <10.1080/15567036.2018.1539143>.

AMEEN, F. *et al.* Co-digestion of microbial biomass with animal manure in three-stage anaerobic digestion. **Fuel**, v. 306, p. 121746, 2021. DOI: 10.1016/j.fuel.2021.121746.

ABNT - Associação Brasileira De Normas Técnicas. **ABNT NBR 8419:1992**: Apresentação de projetos de aterros sanitários de resíduos sólidos urbanos. Rio de Janeiro: ABNT, 1996.

BARREIRA, Paulo. **Biodigestores**: energia, fertilidade e saneamento para a zona rural. São Paulo: Ícone, 1993. p. 11.

CAI, Y. *et al.* Exploring the combined effect of total ammonia nitrogen, pH and temperature on anaerobic digestion of chicken manure using response surface methodology and two kinetic models. **Bioresource Technology**, v. 337, p. 125328, 2021. DOI: <10.1016/j.biortech.2021.125328>.

CHAITANOO, N.; AGGARANGSI, P.; NITAYAVARDHANA, S. Improvement of solid-state anaerobic digestion of broiler farm-derived waste via fungal pretreatment. **Bioresource Technology**, v. 332, p. 125146, 2021. DOI: <10.1016/j.biortech.2021.125146>.

CHEN, J. *et al.* Energy balance assessment on chicken manure for biogas production in Rabat-Salé-Zemmour-Zaïr of Morocco. **Journal of Environmental Management**, v. 299, p. 113656, 2021. DOI: <10.1016/j.jenvman.2021.113656>.

CHERNICHARO, C. A. L. **Princípios do Tratamento Biológico de Águas Residuárias e Reatores anaeróbicos**. 2. ed. Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, Universidade Federal de Minas Gerais, Minas Gerais, 2007.

FREITAS, F. F. *et al.* Study of the Potential for Energy Use of Biogas from a Wastewater Treatment Plant to a Medium-Sized City: A Technical, Economic and Environmental Analysis. **Waste and Biomass Valorization**, v. 13, p. 3509-3521, 2022. DOI: <10.1007/s12649-022-01727-8>.

KIRBY, M. E. *et al.* A novel nitrogen removal technology pre-treating chicken manure, prior to anaerobic digestion. **Sustainability**, v. 12, n. 18, p. 7463, 2020. DOI: <10.3390/su12187463>.

LA FARGE, B. **Le Biogaz** – Procédes de Fermentation Méthanique. Paris: Masson, 1979.

LAPERRIÈRE, W. Évaluation des limites d'un digesteur biogaz pour une utilisation flexible dans un réseau local de production d'énergie. **Sciences Agricoles**, Université Montpellier, 2017.

LI, K-T. *et al.* Dynamics of the Bacterial Community's Soil During the In-Situ Degradation Process of Waste Chicken Feathers. **Indian Journal of Microbiology**, v. 62, n. 2, p. 225-233, 2022. DOI: <10.1007/s12088-021-00996-6>.

MAGALHÃES, Lana. Arqueobactérias. **Toda Matéria**, [s.d.]. Disponível em: <<https://www.todamateria.com.br/arqueobacterias/>>. Acesso em: 23 abr. 2024.

MÉNDEZ-CONTRERAS, J. M. *et al.* Enhanced Biogas Production from Thermophilic Anaerobic Digestion of Poultry Slaughterhouse Sludge: Effect of Thermal Pretreatment and Micronutrients Supplementation. **Waste and Biomass Valorization**, v. 15, p. 2201-2214, 2024. DOI: <10.1007/s12649-023-02277-3>.

NOORI, N. A.; ISMAIL, Z. Z. Process optimization of biogas recovery from giant reed (*Arundo donax*) alternatively pretreated with acid and oxidant agent: experimental and kinetic study. **iomass Conversion and Biorefinery**, v. 10, p. 1121-1135, 2020. DOI: <10.1007/s13399-019-00481-7>.

NUHU, S. K.; GYANG, J. A.; KWARBAK, J. J. Production and optimization of biomethane from chicken, food, and sewage wastes: The domestic pilot biodigester performance. **Cleaner Engineering and Technology**, v. 5, p. 100298, 2021. DOI: <10.1016/j.clet.2021.100298>.

PALHARES, J. C. P.; KUNZ, A. Impacto ambiental da produção de frangos de corte - Revisão do cenário brasileiro. **Manejo ambiental na avicultura**. Santa Catarina: Embrapa Suínos e Aves, 2011. p. 13-33.

REANSUWAN, K. *et al.* Cost effective in-situ methane enrichment for chicken farm biogas system. **Bioresource Technology Reports**, v. 15, p. 100773, 2021. DOI: <10.1016/j.biteb.2021.100773>.

SCHOMMER, V. A.; WENZEL, B. M.; DAROIT, D. J. Anaerobic co-digestion of swine manure and chicken feathers: Effects of manure maturation and microbial pretreatment of feathers on methane production. **Renewable Energy**, v. 152, p. 1284-1291, 2020.

THAHA, A. R. *et al.* The role of local isolates of *Trichoderma* sp. as a decomposer in the substrate of cacao pod rind (*Theobroma cacao* L.). **AIMS Agriculture and Food**, v. 5, ed. 4, p. 825-834, 2020. DOI: <10.3934/agrfood.2020.4.825>.

VAN KREVELEN, D. W. Graphical-statistical method for the study of structure and reaction processes of coal. **Open Journal of Soil Science**, v. 29, p. 269-284, 1950.

UFRGS - Universidade Federal do Rio Grande do Sul. **Estresse Oxidativo em Sistemas Biológicos: Oxigênio e Anaeróbios e Aeróbios**. Porto Alegre. Disponível em: <<https://www.ufrgs.br/leo/eosb/organismos.htm>>. Acesso em: 23 abr. 2024.

USDA - United States Department of Agriculture. **World chicken production in 2022**. Disponível em: <<https://apps.fas.usda.gov/psdonline/app/index.html#/app/advQuery>>. Acesso em: 19 abr. 2024.

WANG, X. B.; XIANG, Y.; LI, X. Y. Environmental safety risk for application of anaerobic fermentation biogas slurry from livestock manure in agricultural land in China. **Scientia Agricultura Sinica**, v. 54, ed. 1, p. 110-139, 2021. DOI: <10.3864/j.issn.0578-1752.2021.01.009>.

YIN, D-M. *et al.* An explanation of the methanogenic pathway for methane production in anaerobic digestion of nitrogen-rich materials under mesophilic and thermophilic conditions. **Bioresource Technology**, v. 264, p. 42-50, 2018. DOI: <10.1016/j.biortech.2018.05.062>.

ZOUAGHI, K. *et al.* Anaerobic co-digestion of three organic wastes under mesophilic conditions: lab-scale and pilot-scale studies. **Environment, Development and Sustainability**, v. 23, p. 9014-9028, 2021. DOI: <10.1007/s10668-020-01009-0>.