REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 17/07/2026 - **Accepted:** 12/08/2026
Vol: 13.18 - August
DOI: 10.66104/zfq4ar61
Pages: 1-48

VALORIZAÇÃO DE RESÍDUOS DE CAFÉ PARA PRODUÇÃO DE BIOGÁS: UMA REVISÃO SOBRE DIGESTÃO ANAERÓBIA E CONTRIBUIÇÕES PARA A ECONOMIA CIRCULAR

VALORIZATION OF COFFEE WASTE FOR BIOGAS PRODUCTION: A REVIEW OF ANAEROBIC DIGESTION AND CONTRIBUTIONS TO THE CIRCULAR ECONOMY

VALORIZACIÓN DE RESIDUOS DE CAFÉ PARA LA PRODUCCIÓN DE BIOGÁS: UNA REVISIÓN SOBRE LA DIGESTIÓN ANAEROBIA Y SUS CONTRIBUCIONES A LA ECONOMÍA CIRCULAR

Thiago Medeiros Dos Reis[1], Cesar Conte Guimarães Filho1[2], Kaio Reis Costa[3], Maria Carolyna Sopeletti Fernandes[4], Alvim Borges da Silva Filho[5], Laura Marina Pinotti[6]

[1] Doutorando em Energia, Universidade Federal do Espírito Santo – UFES
[2] Departamento de Zootecnia, Universidade Federal do Espírito Santo – UFES
[3] Doutorando em Energia, Universidade Federal do Espírito Santo – UFES
[4] Doutoranda em Engenharia Ambiental, Universidade Federal do Espírito Santo – UFES
[5]Departamento de Administração, Universidade Federal do Espírito Santo – UFES
[6] Departamento de Engenharia e Tecnologia, Universidade Federal do Espírito Santo - UFES

*Autor para correspondência, E-mail: thiagomreis1@gmail.com

Resumo: A expansão da produção agrícola e industrial tem aumentado a geração de resíduos orgânicos, criando desafios relacionados ao gerenciamento adequado desses materiais e, simultaneamente, oportunidades para sua conversão em produtos de maior valor agregado. Entre os resíduos agroindustriais, aqueles provenientes da cadeia produtiva do café apresentam elevado potencial para aplicações energéticas devido à sua ampla disponibilidade, composição orgânica e presença de compostos biodegradáveis. Entretanto, características estruturais desses materiais, especialmente a elevada fração lignocelulósica e a presença de compostos potencialmente inibidores, podem limitar a eficiência dos processos biológicos de conversão, necessitando de otimização de pesquisas. Neste contexto, a digestão anaeróbia destaca-se como uma tecnologia sustentável capaz de transformar resíduos de café em biogás, contribuindo para a geração de energia renovável e para a redução de impactos ambientais. Este estudo consiste em uma revisão bibliográfica sistematizada, de caráter qualitativo, conduzida com base nas recomendações do protocolo PRISMA. Foram identificados 186 registros nas bases consultadas, dos quais 21 estudos atenderam aos critérios de elegibilidade e foram incluídos na análise. Os resultados indicam que resíduos como polpa, mucilagem, casca e borra de café apresentam potencial para produção de biogás e metano, sendo que polpa e mucilagem tendem a apresentar maiores rendimentos devido à maior biodegradabilidade. Estratégias como pré-tratamentos térmicos, alcalinos e a codigestão com outros resíduos

CC BY

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 17/07/2026 - **Accepted:** 12/08/2026
Vol: 13.18 - August
DOI: 10.66104/zfq4ar61
Pages: 1-48

orgânicos mostraram-se eficazes para aumentar a disponibilidade da matéria orgânica e melhorar o desempenho do processo. Contudo, a heterogeneidade metodológica dos estudos e a escassez de pesquisas em escala piloto e industrial ainda limitam comparações diretas e a aplicação dos resultados em larga escala. Conclui-se que a digestão anaeróbia representa uma alternativa promissora para a valorização energética dos resíduos da cadeia cafeeira, contribuindo para estratégias de bioeconomia e economia circular.

Palavras-chave: Resíduos de café; Biogás; Metano; Digestão anaeróbia; Biomassa lignocelulósica; Economia circular.

***Abstract**: The expansion of agricultural and industrial production has increased the generation of organic residues, creating challenges related to their proper management while simultaneously providing opportunities for their conversion into value-added products. Among agro-industrial residues, those derived from the coffee production chain have significant potential for energy applications due to their wide availability, organic composition, and content of biodegradable compounds. However, structural characteristics of these materials, particularly their lignocellulosic fraction and the presence of potentially inhibitory compounds, may limit the efficiency of biological conversion processes. In this context, anaerobic digestion stands out as a sustainable technology capable of converting coffee residues into biogas, contributing to renewable energy generation and the reduction of environmental impacts. This study consists of a qualitative systematic literature review conducted following the recommendations of the PRISMA protocol. A total of 186 records were identified in the selected databases, of which 21 studies met the eligibility criteria and were included in the analysis. The results indicate that residues such as coffee pulp, mucilage, coffe husk, and coffee grounds present potential for biogas and methane production, with pulp and mucilage generally achieving higher yields due to their greater biodegradability. Strategies such as thermal and alkaline pretreatments, as well as co-digestion with other organic residues, have proven effective in increasing organic matter availability and improving process performance. Nevertheless, methodological heterogeneity among studies and the limited number of pilot- and industrial-scale investigations still restrict direct comparisons and large-scale application of the findings. It is concluded that anaerobic digestion represents a promising alternative for the energetic valorization of coffee-chain residues, contributing to bioeconomy and circular economy strategies.*

Keywords: anaerobic digestion; coffee waste; biogas; methane; circular economy; bioenergy.

Resumen: La expansión de la producción agrícola e industrial ha incrementado la generación de residuos orgánicos, creando desafíos relacionados con su gestión adecuada y, al mismo tiempo, oportunidades para su conversión en productos de mayor valor agregado. Entre los residuos agroindustriales, aquellos provenientes de la cadena productiva del café presentan un elevado potencial para aplicaciones energéticas debido a su amplia disponibilidad, composición orgánica y contenido de compuestos biodegradables. Sin embargo, las características estructurales de estos materiales, especialmente su fracción lignocelulósica y la presencia de compuestos potencialmente inhibidores, pueden limitar la eficiencia de los procesos biológicos de conversión. En este contexto, la digestión anaerobia se destaca como una tecnología sostenible capaz de transformar los residuos del café en biogás, contribuyendo a la generación de energía

CC BY

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 17/07/2026 - **Accepted:** 12/08/2026
Vol: 13.18 - August
DOI: 10.66104/zfq4ar61
Pages: 1-48

renovable y a la reducción de los impactos ambientales. Este estudio consiste en una revisión bibliográfica sistematizada de carácter cualitativo, realizada siguiendo las recomendaciones del protocolo PRISMA. Se identificaron 186 registros en las bases de datos consultadas, de los cuales 21 estudios cumplieron los criterios de elegibilidad y fueron incluidos en el análisis. Los resultados indican que residuos como la pulpa, el mucílago, la cáscara y los posos de café presentan potencial para la producción de biogás y metano, siendo la pulpa y el mucílago los que generalmente alcanzan mayores rendimientos debido a su mayor biodegradabilidad. Estrategias como los pretratamientos térmicos y alcalinos, así como la codigestión con otros residuos orgánicos, demostraron ser eficaces para aumentar la disponibilidad de materia orgánica y mejorar el desempeño del proceso. No obstante, la heterogeneidad metodológica entre los estudios y la escasez de investigaciones a escala piloto e industrial aún limitan las comparaciones directas y la aplicación de los resultados a gran escala. Se concluye que la digestión anaerobia representa una alternativa prometedora para la valorización energética de los residuos de la cadena cafetera, contribuyendo a estrategias de bioeconomía y economía circular.

Palabras clave: digestión anaerobia; residuos de café; biogás; metano; economía circular; bioenergía

.

1 Introdução

A transição para sistemas energéticos mais sustentáveis tem intensificado o interesse por tecnologias capazes de converter resíduos orgânicos em fontes renováveis de energia. Nesse cenário, os resíduos agroindustriais apresentam grande relevância, pois são gerados continuamente em grandes quantidades e possuem compostos orgânicos que podem ser reaproveitados em processos de conversão biológica, reduzindo impactos ambientais associados ao descarte convencional (SHAHZAD et al., 2024; SARKER & NANDA, 2025).

Segundo a Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB), a produção brasileira de café para a safra 2025 foi estimada em aproximadamente 56,5 milhões de sacas de 60 kg, representando um dos maiores volumes da série histórica, mesmo em um ano de bienalidade negativa (CONAB, 2025). Ressalta-se que as estimativas da CONAB são atualizadas ao longo do ciclo produtivo, o que explica a existência de valores distintos reportados em diferentes levantamentos publicados em 2025, variando entre aproximadamente 55,2 e 56,5 milhões de sacas. Apesar dessas diferenças, todas as projeções confirmam a manutenção do Brasil como o maior produtor mundial de café.

No cenário interno, a produção é fortemente concentrada em poucos estados, com destaque para Minas Gerais, responsável por cerca de 45% a 55% da produção

CC BY

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 17/07/2026 - **Accepted:** 12/08/2026
Vol: 13.18 - August
DOI: 10.66104/zfq4ar61
Pages: 1-48

nacional, seguido pelo Espírito Santo com aproximadamente 25% a 30%, São Paulo com cerca de 8% a 10%, além da Bahia e Rondônia com participações menores (CONAB, 2025). Já no mercado internacional, o Conselho dos Exportadores de Café do Brasil (CECAFÉ) indica que o país mantém posição de liderança nas exportações globais, movimentando dezenas de milhões de sacas por ano e sendo um dos principais fornecedores para Europa, Estados Unidos e Ásia, reforçando a relevância econômica do café na balança comercial brasileira (CECAFÉ, 2025).

Além disso, a cadeia produtiva do café destaca-se como uma das atividades agrícolas de maior importância econômica mundial, sendo responsável pela geração de diversos subprodutos durante as etapas de cultivo, processamento e consumo (DA SILVA et al., 2023; MARTÍNEZ et al., 2024). Embora esses resíduos sejam frequentemente considerados materiais de baixo valor agregado, sua composição química demonstra potencial para aplicações em processos biotecnológicos e energéticos, principalmente devido à presença de carboidratos estruturais, matéria orgânica e compostos capazes de serem convertidos em bioprodutos (MURTHY; NAIDU, 2012; IRIONDO-DEHOND et al., 2019).

Entre os principais resíduos gerados pela indústria cafeeira encontram-se a casca de café, originada durante o beneficiamento do fruto, e a borra de café, resultante principalmente dos processos de extração do café torrado e moído ou da produção de café solúvel (LEE et al., 2023; SARKER; NANDA, 2024; SHAHZAD et al., 2024). Esses materiais apresentam composição variável em função da espécie cultivada, método de processamento e condições de geração, porém geralmente possuem frações de celulose, hemicelulose, lignina, lipídios e compostos fenólicos (CAMPOS-VEGA et al., 2015; DAI et al., 2019).

Nesse contexto, a digestão anaeróbia surge como uma alternativa tecnológica promissora para o aproveitamento desses resíduos, pois permite a conversão da matéria orgânica em biogás, principalmente metano, por meio da atuação sequencial de diferentes grupos microbianos. Além da produção energética, o processo possibilita a obtenção de um digestato com potencial aplicação agrícola,

CC BY

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 17/07/2026 - **Accepted:** 12/08/2026
Vol: 13.18 - August
DOI: 10.66104/zfq4ar61
Pages: 1-48

contribuindo para sistemas integrados de aproveitamento de recursos (MONTGOMERY; BOCHMANN, 2014).

Apesar do potencial energético desses resíduos, sua utilização direta em processos biológicos pode ser limitada pela estrutura recalcitrante da biomassa lignocelulósica. A lignina, por exemplo, forma uma matriz complexa associada à celulose e à hemicelulose, dificultando a ação enzimática e reduzindo a disponibilidade dos carboidratos para microrganismos envolvidos na degradação anaeróbia (MOURA et al., 2018; WANG et al., 2019).

Entretanto, para alcançar maiores rendimentos de biogás, torna-se necessário superar limitações associadas à baixa biodegradabilidade dos resíduos lignocelulósicos.Dessa forma, diferentes estratégias vêm sendo estudadas, incluindo pré-tratamentos físicos, químicos, físico-químicos e biológicos, capazes de modificar a estrutura da biomassa e favorecer a liberação de compostos fermentescíveis (SUN; CHENG, 2002; ALVIRA et al., 2010).

Além dos pré-tratamentos, a codigestão com outros resíduos orgânicos representa uma estratégia relevante, pois pode melhorar o equilíbrio de nutrientes, reduzir efeitos inibitórios e proporcionar maior estabilidade ao processo anaeróbio. Assim, o aproveitamento combinado de resíduos agrícolas e alimentares apresenta-se como uma abordagem alinhada aos princípios da economia circular, promovendo a redução de desperdícios e a geração de energia renovável (LUZ et al., 2018).

Diante desse contexto, a presente revisão analisa o potencial dos resíduos provenientes da cadeia produtiva do café como matéria-prima para produção de biogás por meio da digestão anaeróbia. São discutidas as características desses resíduos, sua composição lignocelulósica, os principais fatores que limitam sua biodegradabilidade e as estratégias empregadas para melhorar a conversão da matéria orgânica em metano. Além disso, são avaliados estudos recentes sobre pré-tratamentos, codigestão e condições operacionais aplicadas a esses substratos, destacando os avanços e desafios para sua aplicação em sistemas de valorização energética. Por fim, são abordadas as perspectivas de integração

CC BY

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 17/07/2026 - **Accepted:** 12/08/2026
Vol: 13.18 - August
DOI: 10.66104/zfq4ar61
Pages: 1-48

desses resíduos em modelos de economia circular, contribuindo para a redução de impactos ambientais e para o desenvolvimento de alternativas renováveis de geração de energia.

2. Metodologia

Este estudo foi conduzido por meio de uma revisão bibliográfica sistematizada, de natureza qualitativa e caráter exploratório-descritivo, conduzida com procedimentos metodológicos inspirados nas recomendações do protocolo PRISMA (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses, 2021).

2.1 Estratégia de busca e bases de dados

As buscas foram realizadas nas bases de dados ScienceDirect, Scopus, Web of Science, SciELO e Google Scholar, abrangendo estudos publicados entre 2010 e 2025. O levantamento bibliográfico foi conduzido entre 20 de março e 01 de junho de 2026. Foram considerados artigos científicos publicados em português e inglês, relacionados à digestão anaeróbia de resíduos da cadeia produtiva do café, incluindo casca, polpa, mucilagem, pergaminho, borra de café e águas residuárias do processamento. As estratégias de busca foram adaptadas às especificidades de cada base de dados, utilizando descritores combinados por operadores booleanos (AND e OR). Os detalhes das estratégias de busca, período de realização e número de registros recuperados em cada base encontram-se apresentados na Tabela 1.

Tabela 1. Estratégia de busca adotada nas bases de dados consultadas

Base de dados	Período da busca	Estratégia de busca	Registros recuperados
		("coffee waste" OR "coffee husk" OR "coffee pulp" OR "coffee mucilage" OR " coffee	

CC BY

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 17/07/2026 - **Accepted:** 12/08/2026
Vol: 13.18 - August
DOI: 10.66104/zfq4ar61
Pages: 1-48

ScienceDirect	20/03/2026 a 01/06/2026	grounds") AND ("anaerobic digestion" OR "biogas" OR "methane production" OR "methane yield") AND ("pretreatment" OR "co-digestion" OR " OR "circular economy")	52
Scopus	20/03/2026 a 01/06/2026	Mesma estratégia utilizada na ScienceDirect	48
Web of Science	20/03/2026 a 01/06/2026	Mesma estratégia utilizada na ScienceDirect	31
SciELO	20/03/2026 a 01/06/2026	(café OR "resíduo de café" OR "casca de café" OR "borra de café") AND ("digestão anaeróbia" OR biogás OR metano)	15
Google Scholar	20/03/2026 a 01/06/2026	Combinações livres dos descritores utilizados nas demais bases; avaliação dos 200 primeiros resultados ordenados por	40

CC BY

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 17/07/2026 - **Accepted:** 12/08/2026
Vol: 13.18 - August
DOI: 10.66104/zfq4ar61
Pages: 1-48

		relevância

Fonte: Elaborado pelo autores (2026)

As estratégias de busca foram construídas utilizando descritores em inglês e português combinados por operadores booleanos (AND e OR).

As seguintes strings de busca foram empregadas nas bases ScienceDirect, Scopus e Web of Science:

("coffee waste" OR "coffee husk" OR "coffee pulp" OR "coffee mucilage" OR "coffee grounds") AND ("anaerobic digestion" OR "biogas" OR "methane production" OR "methane yield") AND ("pretreatment" OR "co-digestion" OR "circular economy").

Na base SciELO foi utilizada a seguinte estratégia:

(café OR "resíduo de café" OR "casca de café" OR "borra de café") AND ("digestão anaeróbia" OR biogás OR metano). Para o Google Scholar foram utilizados os mesmos descritores, aplicando-se busca manual por combinações livres dos termos acima. Em razão da natureza dinâmica da plataforma, foram avaliados os primeiros 200 resultados ordenados por relevância. Após a análise dos títulos e resumos e a aplicação dos critérios de elegibilidade, 40 registros potencialmente relevantes foram selecionados para compor o conjunto inicial de estudos recuperados nessa base.

2.2 Processo de seleção dos estudos

A seleção dos estudos seguiu as etapas de identificação, triagem, elegibilidade e inclusão recomendadas pelo protocolo PRISMA. O fluxograma detalhando esse processo é apresentado na Figura 1.

Inicialmente, foram identificados 186 registros, distribuídos entre as bases consultadas da seguinte forma: ScienceDirect (n = 52), Scopus (n = 48), Web of Science (n = 31), Google Scholar (n = 40) e SciELO (n = 15).

CC BY

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 17/07/2026 - **Accepted:** 12/08/2026
Vol: 13.18 - August
DOI: 10.66104/zfq4ar61
Pages: 1-48

Após a remoção de 32 registros duplicados, permaneceram 154 estudos para avaliação de títulos e resumos. Nessa etapa, foram excluídos 98 registros, dos quais 54 não apresentavam relação direta com o tema, 24 abordavam aplicações não energéticas dos resíduos de café, 12 não envolviam digestão anaeróbia e 8 foram excluídos por outros motivos.

Ao final da triagem, 56 artigos foram selecionados para leitura completa e avaliação de elegibilidade.

Os critérios de inclusão adotados compreenderam: (i) estudos envolvendo resíduos da cadeia produtiva do café, incluindo casca, polpa, mucilagem, pergaminho e borra de café; (ii) pesquisas que utilizaram a digestão anaeróbia como rota de conversão energética; (iii) trabalhos contendo dados quantitativos de produção de biogás, rendimento específico de metano ou potencial bioquímico de metano (BMP); (iv) estudos avaliando pré-tratamentos físicos, químicos, térmicos ou biológicos; e (v) pesquisas envolvendo estratégias de codigestão visando aumentar a eficiência do processo.

Foram excluídos artigos sem descrição metodológica adequada, estudos sem resultados quantitativos relacionados à produção de biogás ou metano, publicações duplicadas, resumos de eventos, capítulos de livros, dissertações e teses.

Após a leitura integral dos textos, 35 estudos foram excluídos devido à ausência de dados quantitativos de biogás ou metano (n = 14), metodologia inadequada (n = 8), insuficiência de dados para comparação (n = 7) ou por se tratarem de revisões sem resultados experimentais (n = 6).

2.3 Estudos incluídos e avaliação metodológica

Ao final do processo de seleção, 21 estudos foram incluídos na revisão qualitativa e encontram-se listados na Tabela 6. Dentre esses, nove trabalhos apresentaram informações experimentais completas e padronizadas sobre tipo de resíduo, condições operacionais da digestão anaeróbia, aplicação de pré-tratamentos e rendimentos de biogás ou metano, possibilitando sua inclusão na análise

CC BY

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 17/07/2026 - **Accepted:** 12/08/2026
Vol: 13.18 - August
DOI: 10.66104/zfq4ar61
Pages: 1-48

comparativa apresentada na Tabela 7. A seleção desses estudos baseou-se na disponibilidade de dados quantitativos comparáveis, permitindo a avaliação das principais estratégias de otimização da digestão anaeróbia de resíduos da cadeia produtiva do café.

Os estudos experimentais selecionados foram avaliados quanto à presença de grupo controle, replicação experimental, caracterização do inóculo, condições operacionais (pH, temperatura e tempo de retenção hidráulica) e padronização das unidades de rendimento. A avaliação metodológica teve caráter qualitativo e foi utilizada para verificar a consistência experimental dos estudos incluídos, sem atribuição de escores quantitativos ou exclusão adicional de trabalhos com base nesses critérios.

2.4 Extração e análise dos dados

Após a seleção, os estudos foram organizados em uma base de dados para extração sistemática das informações relevantes. As variáveis analisadas incluíram tipo de resíduo, composição físico-química da biomassa, presença de compostos inibidores, métodos de pré-tratamento, condições operacionais da digestão anaeróbia, produção de biogás, rendimento específico de metano, teor de metano e principais limitações observadas.

Considerando a heterogeneidade metodológica entre os estudos selecionados, os resultados foram inicialmente registrados em suas unidades originais e classificados de acordo com a base de normalização empregada por cada autor. Sempre que possível, foram realizadas conversões para unidades comparáveis. Entretanto, quando os estudos não disponibilizavam informações suficientes para a conversão, os resultados foram mantidos em suas unidades de origem e analisados de forma qualitativa, respeitando as condições experimentais reportadas.

Os trabalhos também foram classificados de acordo com a escala de aplicação empregada, sendo categorizados em ensaios de potencial bioquímico de metano (BMP), escala de bancada, escala piloto e escala industrial. Adicionalmente, foram

CC BY

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 17/07/2026 - **Accepted:** 12/08/2026
Vol: 13.18 - August
DOI: 10.66104/zfq4ar61
Pages: 1-48

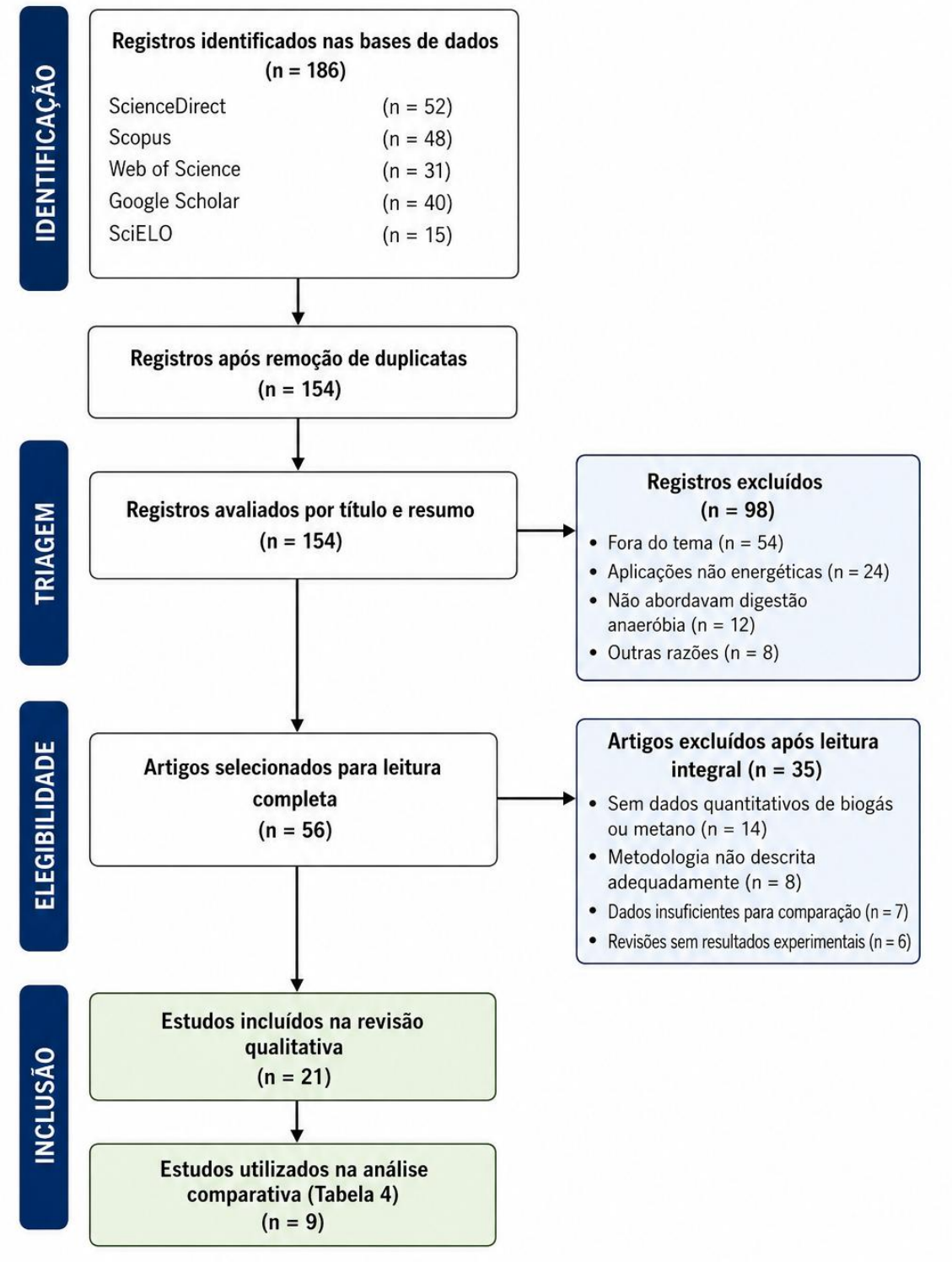
consideradas diferenças relacionadas ao tipo de substrato, configuração do reator, utilização de codigestão, aplicação de pré-tratamentos e condições operacionais, visando contextualizar os resultados apresentados na análise comparativa.

CC BY

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 17/07/2026 - **Accepted:** 12/08/2026
Vol: 13.18 - August
DOI: 10.66104/zfq4ar61
Pages: 1-48

Figura 1. Fluxograma do processo de identificação, triagem, elegibilidade e inclusão dos estudos analisados nesta revisão, elaborado com base nas recomendações do protocolo PRISMA.



Fonte: Elaborado pelos autores (2026), adaptado de Page et al. (2021)

CC BY

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 17/07/2026 - **Accepted:** 12/08/2026
Vol: 13.18 - August
DOI: 10.66104/zfq4ar61
Pages: 1-48

Conforme apresentado na Figura 1, o processo de seleção permitiu identificar e filtrar os estudos mais relevantes para o objetivo desta revisão. Dos 186 registros inicialmente recuperados nas bases consultadas, 21 atenderam aos critérios de elegibilidade e foram incluídos na análise qualitativa. Dentre estes, apenas nove estudos apresentaram informações experimentais detalhadas e padronizadas sobre condições operacionais, características dos substratos e rendimentos de biogás ou metano, possibilitando sua inclusão na análise comparativa.

O procedimento adotado contribuiu para a construção de uma base bibliográfica representativa do estado atual do conhecimento sobre a digestão anaeróbia de resíduos de café, permitindo avaliar diferentes estratégias de otimização do processo, incluindo pré-tratamentos físicos, químicos e biológicos, bem como abordagens de codigestão. Dessa forma, foi possível realizar uma análise crítica dos fatores que influenciam a produção de biogás e metano e discutir as perspectivas de aproveitamento energético desses resíduos no contexto da economia circular.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Biomassa lignocelulósica e desafios para conversão anaeróbia

As biomassas lignocelulósicas constituem uma das principais fontes de matéria orgânica renovável disponíveis para processos de conversão energética, sendo amplamente distribuídas em resíduos agrícolas, agroindustriais e florestais. Esses materiais apresentam elevado potencial para produção de biocombustíveis, especialmente por meio da digestão anaeróbia, embora sua elevada complexidade estrutural represente um dos principais desafios para a conversão biológica (KUMAR; SHARMA, 2017).

A estrutura das biomassas lignocelulósicas é formada predominantemente por celulose, hemicelulose e lignina, componentes que desempenham funções estruturais distintas e influenciam diretamente a biodegradabilidade do material. A proporção desses constituintes varia conforme a espécie vegetal, as condições de

CC BY

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 17/07/2026 - **Accepted:** 12/08/2026
Vol: 13.18 - August
DOI: 10.66104/zfq4ar61
Pages: 1-48

cultivo, o estágio de desenvolvimento da planta e o tipo de resíduo gerado (MOURA et al., 2018).

A celulose é um polímero constituído por unidades de glicose organizadas em cadeias lineares unidas por ligações β-glicosídicas. Essa organização favorece a formação de regiões cristalinas, conferindo elevada resistência à degradação enzimática e microbiana. Apesar dessa característica, a celulose representa uma importante fonte de carbono, uma vez que sua hidrólise libera açúcares que podem ser posteriormente convertidos em compostos intermediários durante a digestão anaeróbia (MOURA et al., 2018).

A hemicelulose apresenta estrutura mais heterogênea que a celulose, sendo composta por diferentes açúcares, incluindo pentoses e hexoses. Em razão de sua menor organização estrutural, esse polímero é geralmente mais susceptível à degradação, contribuindo para a disponibilização de compostos fermentescíveis aos microrganismos anaeróbios (FARHAT et al., 2017).

Por outro lado, a lignina constitui o principal fator limitante para o aproveitamento energético de biomassas lignocelulósicas. Esse polímero aromático forma uma matriz tridimensional que protege a celulose e a hemicelulose da ação de enzimas e microrganismos, reduzindo a acessibilidade às frações biodegradáveis. Consequentemente, elevadas concentrações de lignina estão associadas à menor biodegradabilidade da biomassa e à redução da eficiência da digestão anaeróbia (WANG et al., 2019).

A interação entre celulose, hemicelulose e lignina torna a etapa de hidrólise uma das fases limitantes da digestão anaeróbia de resíduos lignocelulósicos. Como consequência, a conversão da matéria orgânica em biogás pode ocorrer de forma lenta quando não são adotadas estratégias capazes de aumentar a acessibilidade dos microrganismos às frações fermentescíveis da biomassa (SUN; CHENG, 2002).

Diante dessas limitações, a aplicação de pré-tratamentos torna-se uma estratégia importante para aumentar o potencial de conversão energética de resíduos

CC BY

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 17/07/2026 - **Accepted:** 12/08/2026
Vol: 13.18 - August
DOI: 10.66104/zfq4ar61
Pages: 1-48

lignocelulósicos. Esses processos promovem modificações estruturais na biomassa, favorecendo a ruptura parcial da matriz lignina-carboidratos, aumentando a área superficial disponível e facilitando o acesso dos microrganismos às frações biodegradáveis (ALVIRA et al., 2010).

Entre as principais alternativas destacam-se os pré-tratamentos físicos, como moagem, que promovem aumento da área de contato entre o substrato e os microrganismos, embora apresentem limitações relacionadas ao elevado consumo energético e à baixa eficiência na remoção de componentes estruturais mais resistentes (MONTGOMERY; BOCHMANN, 2014).

Os pré-tratamentos químicos, especialmente aqueles que utilizam agentes alcalinos, apresentam maior eficiência na modificação da estrutura da lignina, promovendo a ruptura de ligações entre lignina e carboidratos estruturais e aumentando a digestibilidade da biomassa (ZHOU et al., 2012).

Já os pré-tratamentos biológicos utilizam microrganismos ou enzimas capazes de degradar parcialmente estruturas recalcitrantes da biomassa. Embora apresentem menor formação de compostos inibidores e menor impacto ambiental, esses processos normalmente requerem tempos de operação mais prolongados, o que pode limitar sua aplicação em escala industrial (ATELGE et al., 2020).

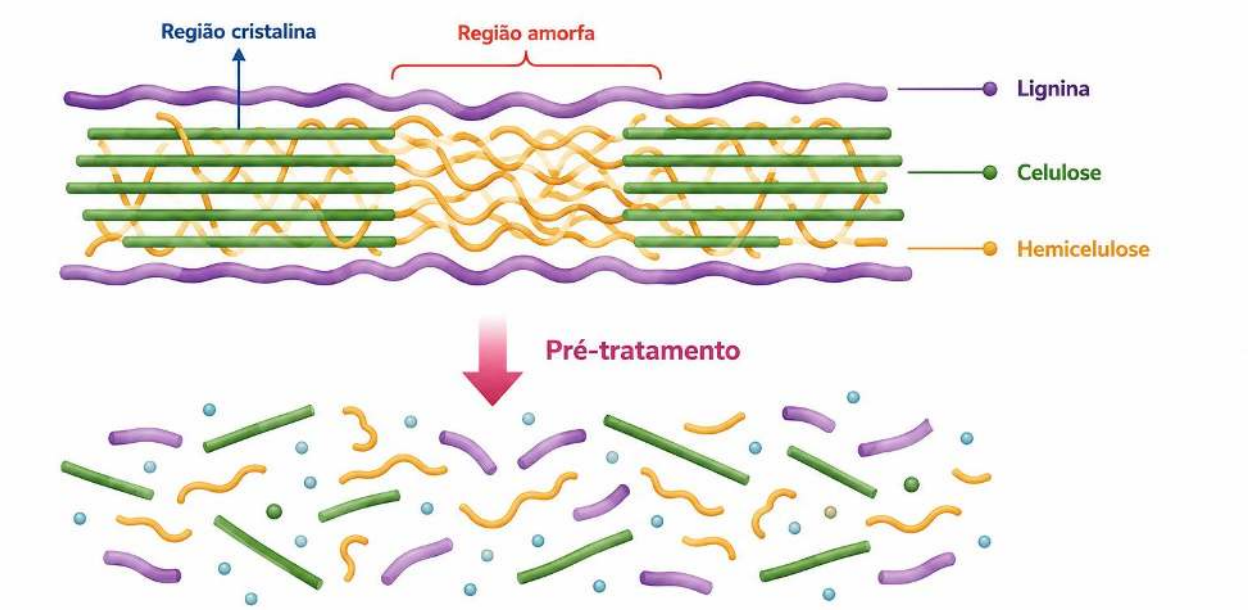
Conforme ilustrado na Figura 2, os pré-tratamentos promovem alterações estruturais que reduzem a recalcitrância da biomassa lignocelulósica, aumentando a disponibilidade da celulose e da hemicelulose para os microrganismos anaeróbios. Dessa forma, favorecem a etapa de hidrólise, considerada uma das principais limitações da digestão anaeróbia, contribuindo para maior conversão da matéria orgânica em biogás e metano.

CC BY

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 17/07/2026 - **Accepted:** 12/08/2026
Vol: 13.18 - August
DOI: 10.66104/zfq4ar61
Pages: 1-48

Figura 2 – Esquema simplificado da biomassa lignocelulósica e efeito do pré-tratamento na desorganização estrutural.



Fonte: Adaptado de Kumar e Sharma (2017)

As principais estratégias utilizadas para melhorar o aproveitamento de resíduos lignocelulósicos são apresentadas na Tabela 4.

Tabela 4 – Estratégias de pré-tratamento de resíduos lignocelulósicos

Tipo de pré-tratamento	Princípio	Benefício
Físico	Redução do tamanho das partículas	Aumento da área superficial
Alcalino	Solubilização da lignina	Maior acesso à celulose
Térmico	Alteração da estrutura celular	Melhora da hidrólise
Biológico	Uso de fungos/enzimas	Menor formação de inibidores

Fonte: **Sun e Cheng (2002); Mosier et al. (2005); Alvira et al. (2010); Montgomery e Bochmann (2014); Zhou et al. (2012); Atelge et al. (2020).**

CC BY

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 17/07/2026 - **Accepted:** 12/08/2026
Vol: 13.18 - August
DOI: 10.66104/zfq4ar61
Pages: 1-48

Assim, a escolha do pré-tratamento adequado deve considerar não apenas o aumento da biodegradabilidade, mas também fatores como custo operacional, geração de subprodutos indesejáveis e viabilidade ambiental. Para resíduos de café, estratégias combinadas podem representar uma alternativa promissora, permitindo maior aproveitamento energético e melhor desempenho da digestão anaeróbia.

Os resíduos provenientes da cadeia produtiva do café constituem um importante exemplo de biomassa lignocelulósica. Entretanto, além das limitações estruturais inerentes a esse tipo de material, esses resíduos apresentam características específicas, incluindo diferentes composições químicas e a presença de compostos potencialmente inibidores, aspectos que serão discutidos na seção seguinte.

3.2 Resíduos da cadeia produtiva do café e potencial de valorização energética

A produção de café representa uma das principais atividades agrícolas no cenário mundial, envolvendo uma cadeia produtiva complexa que compreende desde o cultivo até o processamento industrial e o consumo final. Durante essas etapas, diferentes resíduos são gerados, os quais apresentam composição química diversificada e potencial para serem incorporados em processos de aproveitamento energético (CONAB, 2022; CECAFÉ, 2022).

O processamento do café pode ocorrer por diferentes rotas tecnológicas, principalmente pelos métodos seco e úmido. A escolha do processo influencia diretamente a quantidade e as características dos resíduos gerados. No beneficiamento por via seca, ocorre a remoção das camadas externas do fruto após a secagem, resultando principalmente na geração de casca e outros materiais fibrosos. Já o processamento via úmida envolve a retirada da polpa e mucilagem, produzindo resíduos com maior concentração de compostos solúveis e matéria orgânica (MURTHY; NAIDU, 2012).

CC BY

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 17/07/2026 - **Accepted:** 12/08/2026
Vol: 13.18 - August
DOI: 10.66104/zfq4ar61
Pages: 1-48

Entre os resíduos gerados, a casca de café destaca-se pelo elevado potencial de aproveitamento energético. Por apresentar natureza lignocelulósica, sua composição é predominantemente formada por celulose, hemicelulose e lignina, cujas características estruturais e implicações para a digestão anaeróbia foram discutidas na seção anterior. A proporção desses constituintes varia de acordo com a espécie cultivada, as condições agrícolas, a localização do cultivo e o método empregado na determinação da composição química (BAÊTA et al., 2017). Embora tradicionalmente utilizada como fertilizante ou descartada diretamente no ambiente, a aplicação da casca de café nessas práticas pode apresentar limitações devido à presença de compostos como cafeína, taninos e polifenóis. Esses constituintes podem interferir na degradação biológica e, quando acumulados em excesso, causar efeitos negativos ao solo e aos sistemas naturais (BEKALO; REINHARDT, 2010; BLINOVÁ et al., 2017). As principais características dos resíduos da cadeia produtiva do café e suas possibilidades de aproveitamento são apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2 – Principais resíduos da cadeia produtiva do café e suas aplicações

Resíduo	Origem	Principais componentes	Potencial de uso
Casca de café	Beneficiamento do fruto	Celulose, hemicelulose, lignina	Produção de biogás, compostagem, bioenergia
Polpa de café	Processamento úmido	Carboidratos, compostos fenólicos	Fermentação e digestão anaeróbia
Borra de café	Consumo/indústria	Lipídios, fibras, matéria orgânica	Metano, biodiesel, produtos de valor agregado

Fonte: Adaptado de Murthy e Naidu (2012); Mussatto et al. (2011); Campos-Vega et al. (2015); Chala et al. (2018).

CC BY

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 17/07/2026 - **Accepted:** 12/08/2026
Vol: 13.18 - August
DOI: 10.66104/zfq4ar61
Pages: 1-48

Com o objetivo de sintetizar as principais características físico-químicas dos resíduos da cadeia produtiva do café reportadas na literatura, a Tabela 3 apresenta faixas típicas de composição para os resíduos mais frequentemente avaliados em estudos de digestão anaeróbia.

Tabela 3 – Composição típica dos principais resíduos da cadeia produtiva do café

Resíduo	Celulose (%)	Hemicelulose (%)	Lignina (%)	Lipídios (%)	Proteínas (%)	Relação C/N	Compostos inibidores
Casca de café	25–35	18–25	20–30	1–3	6–10	30–40	Cafeína, taninos e fenólicos
Polpa de café	18–25	12–20	10–18	1–3	8–12	18–30	Cafeína e fenólicos
Mucilagem	8–15	10–18	2–8	<1	4–8	15–25	Fenólicos solúveis
Pergaminho	30–40	15–25	25–35	<2	2–5	50–70	Baixa concentração
Borra de café	8–15	25–35	15–25	10–20	10–17	18–25	Cafeína, fenólicos e lipídios

Fonte: Adaptado de Murthy e Naidu (2012); Mussatto et al. (2011); Campos-Vega et al. (2015); Chala et al. (2018).

Conforme observado na Tabela 3, os resíduos da cadeia produtiva do café apresentam composições físico-químicas distintas, influenciando diretamente sua biodegradabilidade e potencial de produção de biogás. A mucilagem e a polpa

CC BY

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 17/07/2026 - **Accepted:** 12/08/2026
Vol: 13.18 - August
DOI: 10.66104/zfq4ar61
Pages: 1-48

apresentam maiores teores de compostos facilmente degradáveis, favorecendo a conversão anaeróbia. Em contrapartida, a casca e o pergaminho possuem maiores concentrações de lignina, característica que reduz a biodegradabilidade da biomassa e dificulta a etapa de hidrólise. A borra de café destaca-se pelo elevado teor de lipídios, o que pode aumentar o potencial energético do substrato, embora concentrações excessivas possam provocar acúmulo de ácidos graxos de cadeia longa e comprometer a estabilidade do processo.

Outro resíduo relevante da cadeia cafeeira é a borra de café, gerada após a extração dos compostos solúveis do café torrado e moído. Diferentemente da casca, esse resíduo apresenta elevada concentração de matéria orgânica residual, incluindo lipídios, fibras, proteínas e compostos antioxidantes, características que ampliam suas possibilidades de aplicação em processos biotecnológicos (CAMPOS-VEGA et al., 2015).

Além das limitações estruturais inerentes à biomassa lignocelulósica, os resíduos da cadeia produtiva do café podem conter compostos potencialmente inibidores da digestão anaeróbia, principalmente cafeína, taninos e compostos fenólicos. A presença dessas substâncias pode afetar diferentes grupos microbianos envolvidos na digestão anaeróbia, especialmente as arqueias metanogênicas, consideradas mais sensíveis às condições ambientais adversas (CHEN; CHENG; CREAMER, 2008).

Os compostos fenólicos apresentam ação antimicrobiana por interagirem com proteínas e componentes da membrana celular, podendo reduzir a atividade enzimática e comprometer as etapas de hidrólise, acidogênese e metanogênese (CHEN; CHENG; CREAMER, 2008). Os taninos podem formar complexos com proteínas e enzimas extracelulares, reduzindo a disponibilidade de nutrientes para os microrganismos. A cafeína, por sua vez, pode exercer efeitos tóxicos em elevadas concentrações, embora seu impacto dependa das características do inóculo e do período de adaptação microbiana (NEVES; OLIVEIRA; ALVES, 2006).

CC BY

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 17/07/2026 - **Accepted:** 12/08/2026
Vol: 13.18 - August
DOI: 10.66104/zfq4ar61
Pages: 1-48

Estudos relatam que o efeito desses compostos depende não apenas da concentração presente no substrato, mas também de fatores como tempo de exposição, composição da comunidade microbiana, temperatura operacional e estratégias de codigestão. Em muitos casos, a mistura dos resíduos de café com esterco bovino, lodo anaeróbio ou outros resíduos orgânicos promove um efeito de diluição dos compostos inibidores, aumentando a estabilidade do processo (CORRO et al., 2013; SOUZA et al., 2020).

Estratégias de mitigação incluem a aplicação de pré-tratamentos físicos, térmicos, químicos e biológicos, capazes de reduzir parcialmente a concentração de compostos fenólicos e aumentar a disponibilidade dos carboidratos estruturais (TAHERDANAKH; ZILOUBEI; KARIMI, 2014).

Além disso, o uso de materiais adsorventes, como o carvão ativado, tem sido reportado como alternativa para reduzir efeitos tóxicos e favorecer a atividade metanogênica (MUMME et al., 2017). Resultados obtidos por Santo et al. (2018) demonstraram que a adição de carvão ativado aumentou significativamente a produção de metano a partir da casca de café submetida à ozonização, evidenciando o potencial dessa estratégia para minimizar limitações associadas à presença de compostos inibidores.

A grande geração desses resíduos, especialmente em centros urbanos e indústrias de café solúvel, representa um desafio ambiental devido à rápida decomposição da matéria orgânica e ao potencial de emissão de gases quando descartados de forma inadequada. Entretanto, sua composição rica em carbono demonstra potencial para aplicações na produção de biocombustíveis, compostos de interesse industrial e geração de energia renovável (JANISSEN; HUYNH, 2017).

Entre as alternativas de valorização, a digestão anaeróbia destaca-se por possibilitar o aproveitamento da matéria orgânica presente nesses resíduos para a produção de biogás. Estudos indicam que a presença de lipídios e carboidratos na borra de café pode contribuir para o aumento da produção de metano, desde que

CC BY

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 17/07/2026 - **Accepted:** 12/08/2026
Vol: 13.18 - August
DOI: 10.66104/zfq4ar61
Pages: 1-48

sejam controlados fatores como a toxicidade causada por compostos fenólicos e o equilíbrio nutricional do sistema anaeróbio (KIM et al., 2017; LUZ et al., 2018).

Dessa forma, os resíduos provenientes da cadeia produtiva do café deixam de ser considerados apenas rejeitos e passam a ser reconhecidos como recursos renováveis com elevado potencial de valorização energética. Sua utilização em processos de digestão anaeróbia contribui para a redução dos impactos ambientais, o aproveitamento sustentável dos subprodutos agrícolas e o fortalecimento de estratégias baseadas nos princípios da economia circular.

3.3 Digestão anaeróbia de resíduos de café para produção de biogás e metano

A digestão anaeróbia é uma rota biotecnológica amplamente estudada para o tratamento e valorização de resíduos orgânicos, pois possibilita a conversão da matéria biodegradável em biogás por meio da ação conjunta de diferentes grupos de microrganismos. O biogás produzido apresenta como principais componentes o metano (CH_4) e o dióxido de carbono (CO_2), sendo o metano a fração de maior interesse devido ao seu potencial energético (MONTGOMERY; BOCHMANN, 2014).

O processo anaeróbio ocorre por etapas sequenciais envolvendo hidrólise, acidogênese, acetogênese e metanogênese, conforme apresentado na Figura 3. Inicialmente, compostos orgânicos complexos presentes no substrato, como carboidratos, proteínas e lipídios, são hidrolisados por ação enzimática, sendo convertidos em moléculas menores e mais facilmente assimiláveis pelos microrganismos. Posteriormente, na etapa de acidogênese, esses compostos são transformados em ácidos orgânicos, álcoois, dióxido de carbono (CO_2) e hidrogênio (H_2). Na acetogênese, ocorre a conversão desses intermediários em compostos como acetato, CO_2 e H_2, que posteriormente são utilizados pelas arqueias

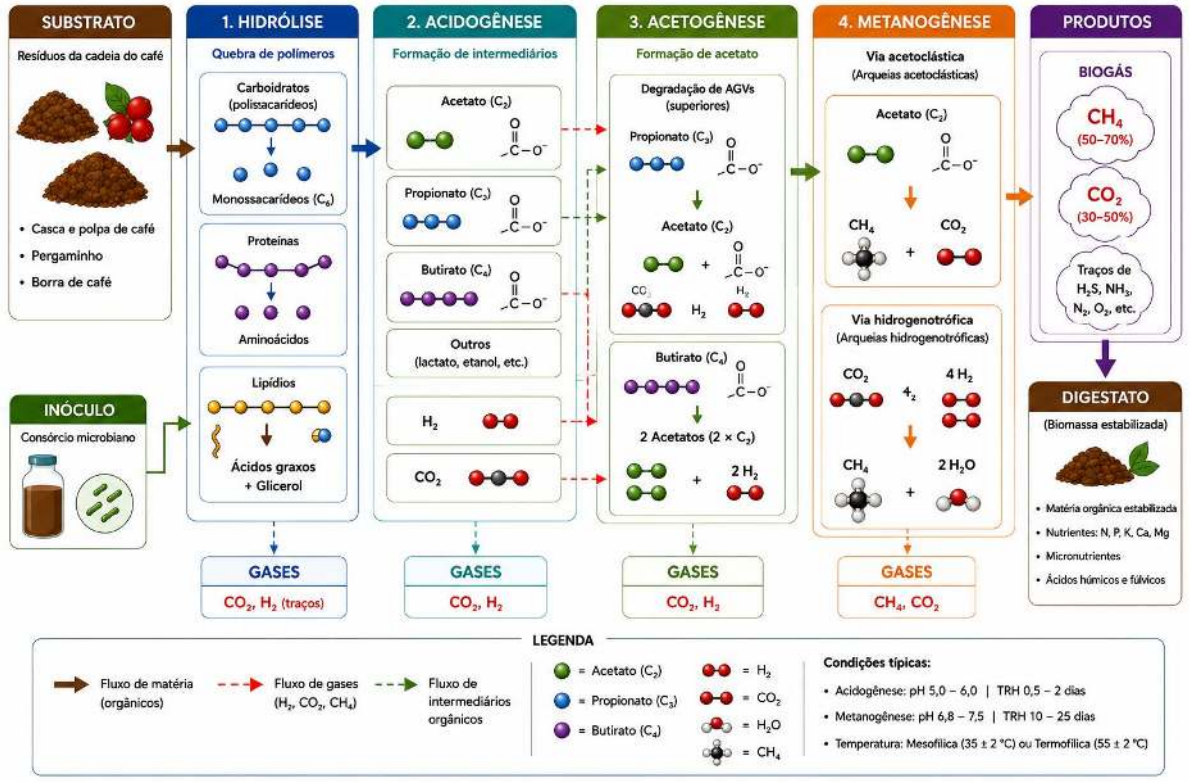
CC BY

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 17/07/2026 - **Accepted:** 12/08/2026
Vol: 13.18 - August
DOI: 10.66104/zfq4ar61
Pages: 1-48

metanogênicas durante a etapa final do processo, responsável pela formação de metano (CH_4) (GUERI et al., 2018).

Figura 3 – Etapas da digestão anaeróbia e formação de biogás a partir de resíduos orgânicos.



Fonte: Adaptado de Batstone et al. (2002) **e** Deublein e Steinhauser (2011).

Cada etapa da digestão anaeróbia depende da atuação conjunta de diferentes grupos microbianos. As bactérias hidrolíticas são responsáveis pela quebra inicial da matéria orgânica complexa, enquanto bactérias acidogênicas e acetogênicas realizam a conversão dos compostos intermediários. Na fase final, as arqueias metanogênicas utilizam principalmente acetato, hidrogênio e dióxido de carbono para produzir biogás, composto majoritariamente por metano e dióxido de carbono. O equilíbrio entre essas etapas é fundamental para evitar o acúmulo de compostos intermediários e garantir maior eficiência na conversão dos resíduos de café em energia renovável.

CC BY

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 17/07/2026 - **Accepted:** 12/08/2026
Vol: 13.18 - August
DOI: 10.66104/zfq4ar61
Pages: 1-48

No caso dos resíduos de café, a digestão anaeróbia apresenta grande potencial devido à elevada quantidade de matéria orgânica disponível. A presença de carboidratos estruturais, compostos solúveis e lipídios fornece fontes de carbono capazes de sustentar a atividade microbiana e favorecer a geração de biogás (MURTHY; NAIDU, 2012).

Entretanto, a aplicação desses resíduos em biodigestores apresenta desafios relacionados à sua composição química. A baixa biodegradabilidade de algumas frações lignocelulósicas, associada à presença de compostos como cafeína, taninos e compostos fenólicos, pode provocar redução da atividade das comunidades microbianas e limitar o rendimento de metano (FERNANDES et al., 2017).

A casca de café, por apresentar elevada quantidade de fibras estruturais, necessita frequentemente de estratégias capazes de melhorar sua conversão biológica. Estudos demonstram que alterações na estrutura da biomassa, por meio de pré-tratamentos, podem aumentar a disponibilidade dos carboidratos e favorecer a produção de biogás (BAÊTA et al., 2017).

Processos como explosão a vapor, tratamento alcalino e aplicação de água quente têm sido investigados como alternativas para modificar a estrutura lignocelulósica dos resíduos de café. Essas técnicas promovem alterações na organização da parede celular vegetal, reduzindo a resistência causada pela lignina e facilitando a ação dos microrganismos anaeróbios (SANTOS et al., 2018).

Além dos pré-tratamentos, a codigestão surge como uma estratégia eficiente para melhorar o desempenho do processo anaeróbio. A mistura de resíduos de café com outros substratos orgânicos pode proporcionar melhor relação carbono/nitrogênio, diluição de compostos inibidores e maior estabilidade microbiológica do sistema (LUZ et al., 2018).

A borra de café apresenta características particularmente interessantes para produção de biogás devido ao seu conteúdo de lipídios e matéria orgânica residual. Embora os lipídios possam contribuir para maior produção de metano devido à sua

CC BY

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 17/07/2026 - **Accepted:** 12/08/2026
Vol: 13.18 - August
DOI: 10.66104/zfq4ar61
Pages: 1-48

elevada densidade energética, concentrações excessivas podem causar acúmulo de ácidos graxos de cadeia longa, prejudicando a atividade microbiana (KIM et al., 2017).

Dessa forma, o aproveitamento energético dos resíduos de café por digestão anaeróbia depende do equilíbrio entre a composição do substrato, as condições operacionais do reator e as estratégias empregadas para aumentar a biodegradabilidade da biomassa. Além da aplicação de pré-tratamentos e da codigestão, fatores ambientais e nutricionais exercem influência direta sobre a atividade da comunidade microbiana responsável pela conversão da matéria orgânica em biogás. Parâmetros como pH, temperatura, relação carbono/nitrogênio (C/N), presença de compostos inibidores e disponibilidade do substrato podem determinar a estabilidade do processo e o rendimento de metano. Nesse contexto, a compreensão desses fatores é essencial para otimizar os sistemas anaeróbios aplicados aos resíduos da cadeia cafeeira, conforme apresentado na Tabela 5.

Tabela 5 – Fatores que influenciam a produção de biogás

Fator	Efeito no processo
Ph	Influencia atividade microbiana
Temperatura	Afeta crescimento dos microrganismos
Relação C/N	Controla equilíbrio nutricional
Compostos fenólicos	Podem causar inibição
Pré-tratamento	Aumenta disponibilidade do substrato

Fonte: Chen, Cheng e Creamer (2008); Deublein e Steinhauser (2011); Angelidaki et al. (2011); Kumar e Sharma (2017).

Entre os parâmetros operacionais, o controle do pH e da temperatura é fundamental para garantir condições adequadas ao desenvolvimento dos microrganismos hidrolíticos, acidogênicos e metanogênicos. A relação C/N influencia a disponibilidade de nutrientes no meio, enquanto compostos fenólicos e

CC BY

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 17/07/2026 - **Accepted:** 12/08/2026
Vol: 13.18 - August
DOI: 10.66104/zfq4ar61
Pages: 1-48

outros metabólitos presentes nos resíduos de café podem atuar como agentes inibidores quando atingem concentrações elevadas. Assim, o ajuste desses fatores, associado ao uso de pré-tratamentos adequados, contribui para aumentar a eficiência da digestão anaeróbia e favorecer a produção sustentável de biogás.

Além da produção de biogás, a digestão anaeróbia contribui para uma abordagem de economia circular, pois reduz a quantidade de resíduos destinados ao descarte e gera produtos adicionais, como o digestato, que pode retornar ao setor agrícola como fonte de nutrientes. Assim, o aproveitamento dos resíduos de café em sistemas anaeróbios representa uma alternativa capaz de integrar gestão ambiental, geração energética e sustentabilidade econômica.

3.4 Estudos da literatura sobre produção de biogás a partir de resíduos da cadeia do café

O aproveitamento energético dos resíduos provenientes da cadeia produtiva do café tem sido investigado por diferentes grupos de pesquisa devido à elevada disponibilidade desses materiais e ao seu conteúdo de matéria orgânica biodegradável.

Os estudos disponíveis demonstram que resíduos de café apresentam comportamentos distintos durante a digestão anaeróbia. Materiais com maior concentração de compostos facilmente degradáveis, como polpa e mucilagem, geralmente apresentam maior conversão em metano quando comparados a frações mais lignificadas, como casca e pergaminho.

Com base nos critérios de elegibilidade adotados, foram selecionados 21 estudos para compor a revisão qualitativa. A Tabela 7 apresenta a relação dos trabalhos incluídos, indicando os principais resíduos avaliados e o foco de cada investigação. Dentre esses estudos, nove trabalhos disponibilizaram informações experimentais suficientemente detalhadas e comparáveis sobre condições operacionais e rendimentos de biogás ou metano, sendo posteriormente utilizados na análise comparativa apresentada na Tabela 6.

CC BY

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 17/07/2026 - **Accepted:** 12/08/2026
Vol: 13.18 - August
DOI: 10.66104/zfq4ar61
Pages: 1-48

Tabela 6 – Comparação dos estudos sobre digestão anaeróbia de resíduos de café –

Autor	Resíduo	Estratégia	Produção de biogás	Produção de metano	Teor de CH_4 (%)	Unidade/Base	Observação
Nava-Valente et al. (2023)	Polpa de café	Pré-tratamento térmico	0,92	—	79,8	L biogás g^{-1} SV	Maior solubilização da matéria orgânica
Luz et al. (2017)	Borra + esterco bovino	Codigestão	—	254	—	mL CH_4 g^{-1} SV	Melhor equilíbrio nutricional
Chala et al. (2018)	Casca, polpa, pergaminho e mucilagem	Digestão anaeróbia	31,1–294,5	—	—	L biogás kg^{-1} SV	Resíduos menos lignificados apresentaram maior rendimento
Batista et al. (2016)	Resíduos de café	Pré-tratamento alcalino	18	—	~80	NL biogás L^{-1}	Remoção parcial da lignina favoreceu a conversão
Du et al. (2020)	Casca de café	Digestão anaeróbia	3359,6	2127,3	—	mL acumulados	Resultado dependente da escala experimental
Vítěz et al.	Borra de café	Digestão anaeróbia	—	0,271–0,325	—	m^3 CH_4 kg^{-1} MOS	Potencial energético

CC BY

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 17/07/2026 - **Accepted:** 12/08/2026
Vol: 13.18 - August
DOI: 10.66104/zfq4ar61
Pages: 1-48

(2016)							promissor
Luz et al. (2018)	Borra de café	Hidrocarvão + codigestão	—	491	—	mL CH_4 g^{-1} SV	Maior produção de metano
Passos et al. (2018)	Casca de café	Explosão a vapor	—	196,1	—	mL CH_4 g^{-1} SSV	Aumento da biodegradabilidade
Santo et al. (2018)	Casca de café	Ozônio	—	86	—	NmL CH_4 g^{-1} CH	Redução das limitações do processo

Nota: Os estudos incluídos utilizaram diferentes bases de normalização e formas de expressar os resultados da digestão anaeróbia. Sempre que possível, os rendimentos foram comparados considerando métricas equivalentes. Entretanto, devido à ausência de informações suficientes para conversão de todas as unidades para uma base comum, parte dos resultados foi mantida em sua forma original e interpretada de maneira qualitativa.

Nava-Valente et al. (2023) avaliaram a influência de pré-tratamentos aplicados à polpa de café para aumentar a biodegradabilidade anaeróbia. O tratamento térmico a 90 °C promoveu maior solubilização da matéria orgânica e favoreceu a etapa de hidrólise, resultando em produção de 0,92 L g^{-1} de sólidos voláteis, com concentração de 79,8% de metano no biogás. Os autores destacaram que a modificação da estrutura do resíduo contribuiu para maior disponibilidade dos compostos orgânicos para os microrganismos anaeróbios.

Luz et al. (2017) avaliaram a codigestão da borra de café com esterco bovino, observando produção específica de 254 mL CH_4 g^{-1} SV. O estudo demonstrou que a combinação entre resíduos pode melhorar o equilíbrio nutricional do processo, reduzindo limitações relacionadas à composição isolada da borra de café.

CC BY

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 17/07/2026 - **Accepted:** 12/08/2026
Vol: 13.18 - August
DOI: 10.66104/zfq4ar61
Pages: 1-48

Chala et al. (2018) compararam diferentes resíduos do processamento do café e verificaram diferenças significativas no potencial energético. A casca apresentou rendimento de 159,4 ± 1,8 L kg^{-1} SV, enquanto a polpa atingiu 244,7 ± 6,4 L kg^{-1} SV e a mucilagem apresentou o maior desempenho, com 294,5 ± 9,6 L kg^{-1} SV. Esses resultados foram associados à maior disponibilidade de compostos biodegradáveis nas frações menos resistentes da biomassa.

Batista et al. (2016) investigaram tratamentos químicos aplicados aos resíduos de café e observaram que o tratamento alcalino contribuiu para a quebra parcial da matriz lignocelulósica. Após o tratamento, foi obtida produção de 18 NL L^{-1} de biogás, com aproximadamente 80% de metano, evidenciando o efeito positivo da remoção da resistência estrutural da biomassa.

Du et al. (2020) estudaram a digestão anaeróbia da casca de café em condições mesofílicas. O sistema alcançou produção de 3359,6 mL de biogás, contendo 2127,3 mL de metano, utilizando pH inicial próximo da neutralidade e relação C/N igual a 30. Os resultados indicaram que o controle das condições operacionais influencia diretamente a atividade das arqueias metanogênicas.

Vítěz et al. (2016) avaliaram a utilização da borra de café proveniente de cafeterias como substrato energético. Os autores obtiveram produção de biogás entre 0,500 e 0,598 m^3 kg^{-1} de matéria orgânica seca, com concentração de metano variando entre 55 e 61%, demonstrando a viabilidade do resíduo urbano como fonte complementar para produção de energia renovável.

Luz et al. (2018) investigaram o uso de hidrocarvão produzido a partir de borra de café como material auxiliar na digestão anaeróbia. O tratamento termoquímico gerou um material capaz de melhorar a produção de metano, alcançando 491 mL g^{-1} SV, com aproximadamente 70% de metano no biogás.

Passos et al. (2018) avaliaram a casca de café submetida à explosão a vapor. O resíduo sem tratamento apresentou produção de 100 mL CH_4 g^{-1} SSV, enquanto a combinação do tratamento com codigestão proporcionou aumento para 196,1 mL CH_4 g^{-1} SSV, demonstrando a importância da abertura da estrutura lignocelulósica.

CC BY

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 17/07/2026 - **Accepted:** 12/08/2026
Vol: 13.18 - August
DOI: 10.66104/zfq4ar61
Pages: 1-48

Santo et al. (2018) aplicaram ozônio como estratégia de pré-tratamento na casca de café. O processo em dois estágios produziu 49 NmL CH_4 g^{-1} CH, enquanto a utilização de carvão ativado elevou a produção para 86 NmL CH_4 g^{-1} CH, indicando que materiais auxiliares podem reduzir efeitos inibitórios durante a digestão.

Os resultados compilados na Tabela 6 refletem uma heterogeneidade inerente aos estudos de digestão anaeróbia de resíduos de café, decorrente da diversidade de escalas experimentais empregadas. É importante notar que a maior parte da literatura consultada baseia-se em estudos conduzidos em escala laboratorial, sob regimes de batelada (lotes) e condições de controle rigorosas, o que permite avaliar o potencial bioquímico máximo dos substratos, como verificado nos trabalhos de Nava-Valente et al. (2023), Luz et al. (2017), Chala et al. (2018), Batista et al. (2016), Du et al. (2020), Luz et al. (2018), Passos et al. (2018) e Santo et al. (2018). Em contraste, o estudo de Vítěz et al. (2016) destaca-se por sua execução em escala piloto, operando sob condições de fluxo contínuo que mimetizam as restrições da realidade industrial, tais como limitações de transferência de massa, heterogeneidade da mistura e flutuações na carga orgânica.

Consequentemente, as disparidades nos rendimentos reportados não devem ser interpretadas apenas como variação na qualidade do resíduo, mas principalmente como reflexo dos distintos níveis de escalonamento e dos desafios cinéticos impostos por cada configuração experimental. Assim, a Tabela 6 deve ser interpretada considerando que a performance energética é uma variável dependente tanto da natureza da biomassa quanto do arranjo operacional e da escala de processamento adotada.

De forma geral, os estudos avaliados demonstram que os resíduos provenientes da cadeia produtiva do café apresentam elevado potencial para produção de biogás e metano, porém o desempenho do processo está diretamente relacionado às características do substrato e às estratégias empregadas para aumentar sua biodegradabilidade. Resíduos com maior disponibilidade de compostos solúveis, como polpa e mucilagem, tendem a apresentar maiores rendimentos de metano, enquanto materiais mais resistentes, como casca e pergaminho, exigem

CC BY

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 17/07/2026 - **Accepted:** 12/08/2026
Vol: 13.18 - August
DOI: 10.66104/zfq4ar61
Pages: 1-48

frequentemente a aplicação de pré-tratamentos para reduzir os efeitos da estrutura lignocelulósica.

Além disso, os resultados indicam que a codigestão representa uma alternativa eficiente para melhorar a estabilidade do processo anaeróbio, promovendo melhor equilíbrio nutricional e redução de possíveis efeitos inibitórios. Estratégias como tratamentos térmicos, alcalinos, ozonização e uso de materiais auxiliares demonstram capacidade de aumentar a conversão da matéria orgânica em biogás.

Entretanto, ainda existem desafios relacionados à padronização das condições experimentais, comparação entre diferentes resíduos e escalonamento das tecnologias para aplicações industriais. Dessa forma, futuras pesquisas devem considerar não apenas o aumento da produção de metano, mas também aspectos econômicos, ambientais e a integração desses processos em sistemas de economia circular, permitindo transformar resíduos da cadeia cafeeira em fontes renováveis de energia e novos produtos de valor agregado.

Com o objetivo de complementar a análise comparativa apresentada na Tabela 6, a Tabela 7 reúne os estudos incluídos nesta revisão, destacando os principais resíduos avaliados e o foco de cada investigação. Essa síntese permite uma visão geral das abordagens empregadas na literatura e evidencia a diversidade de aplicações da digestão anaeróbia para resíduos da cadeia produtiva do café.

Tabela 7– Estudos incluídos na revisão qualitativa

Autor	Ano	Resíduo avaliado	Tema principal
Neves et al.	2015	Resíduos da indústria do café instantâneo	Codigestão anaeróbia
Vítěz et al.	2016	Borra de café	Potencial metanogênico
Batista et al.	2016	Resíduos de café	Pré-tratamento

CC BY

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 17/07/2026 - **Accepted:** 12/08/2026
Vol: 13.18 - August
DOI: 10.66104/zfq4ar61
Pages: 1-48

			alcalino
Luz et al.	2017	Borra de café + esterco bovino	Codigestão
Girotto et al.	2017	Borra de café	Pré-tratamento alcalino
Chala et al.	2018	Casca, polpa, pergaminho e mucilagem	Potencial de metano
Luz et al.	2018	Hidrocarvão de borra de café	Digestão anaeróbia
Passos et al.	2018	Casca de café	Explosão a vapor
Santo et al.	2018	Casca de café	Ozonização
Kim et al.	2018	Borra de café	Pré-tratamento termoalcalino
Du et al.	2020	Casca de café	Condições operacionais
Pin et al.	2020	Água residuária do café	Produção de biogás
Budiyono et al.	2023	Borra de café e casca de arroz	Relação C/N
Nava-Valente et al.	2023	Polpa de café	Pré-tratamento térmico
Kampioti e Dimitrios	2022	Resíduos de café	Codigestão
Nascimento et al.	2020	Resíduos lignocelulósicos do café	Revisão de pré-tratamentos

CC BY

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 17/07/2026 - **Accepted:** 12/08/2026
Vol: 13.18 - August
DOI: 10.66104/zfq4ar61
Pages: 1-48

Atelge et al.	2020	Biomassa lignocelulósica aplicada ao café	Pré-tratamento biológico
Gueri et al.	2021	Biomassa lignocelulósica	Avaliação BMP
Montgomery e Bochmann	2014	Biomassa lignocelulósica	Digestão anaeróbia
Brissac et al.	2018	Biomassa lignocelulósica	Efeitos dos pré-tratamentos
Frassatto	2020	Biomassa residual agroindustrial	Conversão energética

3.5 Integração de Resíduos na Economia Circular: Modelo Conceitual e Fluxos de Cadeia

Conforme comentado nos itens anteriores a codigestão é importante para o balancamento dos nutrientes, e um possível substrato é o glicerol proveniente da produção do biodiesel. Assim, nessa etapa é integrado dois resíduos para obtenção de bioenergia: os resíduos do café e da indústria do biodiesel.

A aplicação dos preceitos de economia circular à cadeia do café e do biodiesel não deve ser vista de forma genérica, mas sim mapeada por meio de rotas tecnológicas específicas, balanços de rendimento e cenários operacionais concretos. Propõe-se um modelo conceitual de integração circular baseado na Digestão Anaeróbica em Dois Estágios (DAB) como biorrefinaria descentralizada, estruturado a partir da origem dos resíduos, rotas de conversão e barreiras de mercado.

A Figura 4 apresenta o modelo conceitual de integração circular proposto, no qual resíduos agroindustriais e urbanos são convertidos em produtos energéticos e agrícolas de valor agregado por meio da digestão anaeróbica em dois estágios. O

CC BY

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 17/07/2026 - **Accepted:** 12/08/2026
Vol: 13.18 - August
DOI: 10.66104/zfq4ar61
Pages: 1-48

sistema integra diferentes correntes residuais, incluindo cascas e polpas de café oriundas do campo, borra de café proveniente de ambientes urbanos, glicerol residual gerado na produção de biodiesel e lodo de estação de tratamento de efluentes (ETE), utilizado como fonte de inóculo microbiológico.

No primeiro estágio da digestão anaeróbica ocorre a acidogênese, operando em faixa de pH entre 5 e 6 e com baixo tempo de retenção hidráulica (TRH). Nesta etapa, a matéria orgânica é convertida em ácidos graxos voláteis (AGVs), hidrogênio (H_2) e outros metabólitos intermediários. Em seguida, esses compostos são direcionados ao segundo estágio, a metanogênese, conduzida em condições mais próximas da neutralidade (pH entre 6,8 e 7,5), favorecendo a produção de metano (CH_4) e biogás.

Os produtos resultantes da biorrefinaria incluem hidrogênio renovável, que pode ser purificado para aplicações em células a combustível, biogás ou biometano, destinados à geração de energia térmica, elétrica ou combustível veicular, além do digestato estabilizado, passível de utilização como biofertilizante agrícola. A integração entre esses fluxos energéticos amplia a eficiência do sistema e reduz perdas de carbono ao longo da cadeia produtiva.

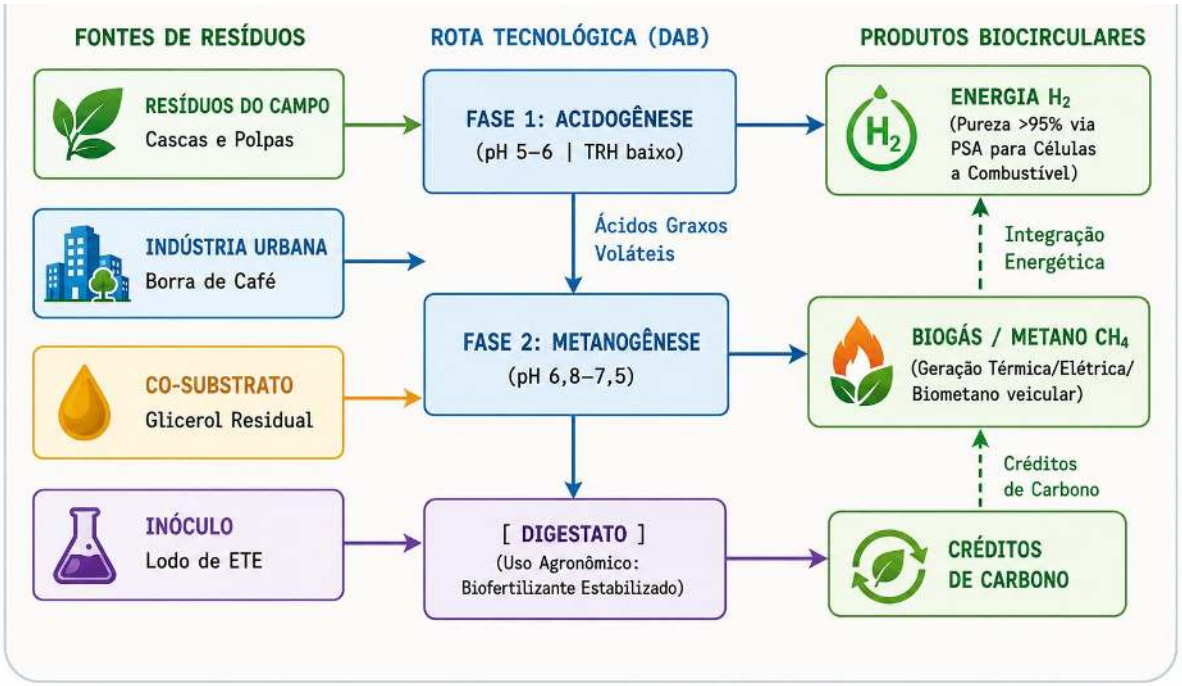
Além dos produtos físicos, o modelo evidencia a geração potencial de créditos de carbono, decorrentes da mitigação das emissões de gases de efeito estufa associadas ao manejo inadequado dos resíduos e à substituição parcial de combustíveis fósseis. Dessa forma, a DAB atua simultaneamente como tecnologia de tratamento de resíduos, plataforma de recuperação de recursos e mecanismo de inserção dos setores cafeeiro e de biodiesel em uma lógica de bioeconomia circular.

CC BY

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 17/07/2026 - **Accepted:** 12/08/2026
Vol: 13.18 - August
DOI: 10.66104/zfq4ar61
Pages: 1-48

Figura 4– Modelo conceitual de integração circular para valorização de resíduos do café e do biodiesel



A. Mapeamento e Diferenciação dos Resíduos da Cadeia

O modelo circular divide os fluxos de biomassa residual em três origens distintas dentro do cenário nacional:

- Resíduos gerados no campo e beneficiamento: Durante o processamento do café, são gerados resíduos sólidos como cascas e polpas, que representam até 45% do volume total do grão beneficiado (GRAÇA; CALDAS, 2017). Trata-se de uma biomassa lignocelulósica complexa composta pelas camadas de endocarpo, epiderme e endosperma, ricas estruturalmente em celulose, hemicelulose e lignina (ROTTA et al., 2021; IRIONDO-DEHOND et al., 2019).
- Borra urbana e industrial: Nas etapas de torrefação e extração industriais para a produção de café solúvel, é gerado um volume expressivo de borra residual, estimado em cerca de 480 kg para cada 1 tonelada de café cru processado (DURÁN et al., 2017). Esse resíduo também se

CC BY

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 17/07/2026 - **Accepted:** 12/08/2026
Vol: 13.18 - August
DOI: 10.66104/zfq4ar61
Pages: 1-48

acumula em cafeterias urbanas, constituindo um passivo concentrado de alto potencial biotecnológico para conversão energética.

- Co-substratos industriais e inóculos: O glicerol residual, principal subproduto da transesterificação do biodiesel, é gerado na proporção exata de 1 tonelada para cada 10 toneladas de biocombustível líquido produzido (DECARPIGNY et al., 2022; PRAUCHNER et al., 2023). Paralelamente, o lodo de estações de tratamento de esgoto (ETE) atua de forma complementar fornecendo o consórcio microbiano necessário como inóculo biológico para o sistema (WOŁEJKO et al., 2025; KIM et al., 2017).

B. Rendimento Energético das Rotas (Unifásico vs. Dois estágios)

A viabilidade técnica do modelo se consolida através do aumento na eficiência de conversão dos Sólidos Voláteis (SV) em vetores energéticos gasosos. O sistema em dois estágios fraciona o processo, mitigando as limitações cinéticas das estruturas do café através de condições operacionais otimizadas, superando o modelo unifásico convencional:

- Fase 1 (Acidogênese): Conduzida sob condições de pH ácido entre 5,0 e 6,0 e tempos de retenção hidráulica (TRH) reduzidos, essa etapa inibe os microrganismos metanogênicos e favorece a via butírica de fermentação, liberando hidrogênio com pureza inicial de 40% a 60% (LOPEZ-HIDALGO et al., 2022; RAJESH BANU et al., 2021).

- Fase 2 (Metanogênese): Os ácidos graxos voláteis (AGVs) remanescentes da primeira etapa são convertidos de forma altamente estável e controlada sob pH neutro (entre 6,8 e 7,5), reduzindo drasticamente o risco de acidificação ou travamento do sistema (ZHENG; LI, 2024).

- Efeito Sinergico da Codigestão: O glicerol residual atua como fonte de carbono de fácil acesso, elevando significativamente as taxas de

CC BY

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 17/07/2026 - **Accepted:** 12/08/2026
Vol: 13.18 - August
DOI: 10.66104/zfq4ar61
Pages: 1-48

hidrólise e acidificação (DA SILVA et al., 2024). Em regimes de codigestão binária balanceada, a adição desse substrato gera um aumento de até 337% no potencial de produção de metano se comparada à digestão isolada da biomassa (DA SILVA et al., 2024).

Quantitativamente, o balanço de rendimento por quilograma de matéria orgânica alimentada consolida as vantagens comparativas registradas na literatura (MARTÍNEZ-MENDOZA et al., 2024). Nesse contexto, a Tabela 1 sintetiza a comparação entre o sistema unifásico clássico e o sistema em dois estágios (DAB) otimizado, evidenciando diferenças operacionais e de desempenho energético.

Tabela 8 – Comparação entre sistema unifásico clássico e sistema bifásico (DAB) otimizado na digestão anaeróbia

Critério Operacional e de Rendimento	Sistema Unifásico Clássico	Sistema em dois estágios (DAB) Otimizado
Rendimento médio de metano (CH_4)	0,380 m³ CH_4/kg SV (Grimberg et al., 2015)	0,446 m³ CH_4/kg SV (ganho de 17% a 36%) (Grimberg et al., 2015)
Recuperação de vetores energéticos	Apenas metano (CH_4) (Cremonez et al., 2013)	Produção simultânea: hidrogênio (H_2) na fase 1 e metano (CH_4) na fase 2 (Ta et al., 2020)
Eficiência na degradação de lignocelulose	Moderada; propenso à instabilidade por sobrecarga orgânica	Alta; separação de reatores melhora a proteção das arqueias acetoclásticas
Estabilidade e controle de pH	Sistema único e mais instável, com risco de acidificação global	Fases separadas, maior estabilidade e melhor controle do pH

A análise comparativa apresentada na Tabela 8 evidencia que o sistema em dois (DAB) não representa apenas uma melhoria operacional em relação ao modelo

CC BY

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 17/07/2026 - **Accepted:** 12/08/2026
Vol: 13.18 - August
DOI: 10.66104/zfq4ar61
Pages: 1-48

unifásico, mas também uma evolução no aproveitamento energético da biomassa residual. Essa maior eficiência de conversão, aliada à recuperação simultânea de diferentes vetores energéticos, fortalece a proposta de integração desses sistemas dentro de uma lógica de economia circular.

Nesse contexto, a economia circular aplicada à cadeia do café baseia-se na valorização contínua de resíduos, transformando passivos ambientais em insumos para novos processos produtivos. Em vez de uma cadeia linear na qual os resíduos seriam descartados após o processamento, o modelo circular propõe o reuso e a reconversão desses materiais em energia renovável, especialmente por meio da digestão anaeróbia bifásica.

Dessa forma, resíduos como cascas de café, borra e borra de café deixam de ser subprodutos sem valor agregado e passam a integrar uma biorrefinaria descentralizada, na qual a produção de hidrogênio e metano contribui simultaneamente para a geração de energia e redução do impacto ambiental. Assim, o sistema se alinha aos princípios da economia circular ao maximizar o aproveitamento de recursos, reduzir desperdícios e promover a sustentabilidade energética ao longo de toda a cadeia produtiva.

C. Destinação Circular dos Subprodutos: Uso Energético e Agronômico

- **Uso Energético (Vapor e Combustível):** O metano contido no biogás purificado apresenta elevado poder calorífico, podendo ser direcionado diretamente para a geração combinada de eletricidade e calor térmico industrial (SCHULTZ; SOARES, 2014). Simultaneamente, quando o hidrogênio biológico (H_2) gerado na primeira etapa é submetido à tecnologia de adsorção com variação de pressão (*Pressure Swing Adsorption* - PSA), remove-se seletivamente o CO_2 e impurezas, alcançando purezas superiores a 95%, o que o torna viável para o abastecimento de células a combustível ou transporte (KANG *et al.*, 2024; KRÓL *et al.*, 2024).
- **Uso Agronômico (Cadeia Fechada):** Além dos efluentes gasosos, o processo resulta na geração de um efluente líquido com baixa carga

CC BY

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 17/07/2026 - **Accepted:** 12/08/2026
Vol: 13.18 - August
DOI: 10.66104/zfq4ar61
Pages: 1-48

poluente e um lodo biológico totalmente estabilizado (DEMIRER; CHEN, 2005). Devido ao seu elevado teor de macro e micronutrientes, esse digestato atua como um biofertilizante de alto valor agregado para retorno direto ao solo agrícola das propriedades cafeeiras, promovendo a substituição de insumos minerais de base fóssil (BEZERRA, 2024).

D. Barreiras Logísticas, Econômicas e Regulatórias do Cenário Nacional

Para transpor o plano puramente conceitual, a implementação industrial do modelo enfrenta desafios reais inerentes ao mercado nacional:

- **Barreira Econômica (CAPEX Elevado):** Por demandar uma infraestrutura complexa com múltiplos biorreatores operando de forma independente, maiores sistemas de automação de processos e unidades de purificação física de gases (como colunas de PSA), os sistemas bifásicos exigem um custo de investimento inicial (CAPEX) de até 50% superior aos arranjos unifásicos tradicionais (MARTÍNEZ-MENDOZA *et al.*, 2024; GRIMBERG *et al.*, 2015).
- **Barreira Logística e Operacional:** A variabilidade físico-química dos resíduos e os picos de safra geram flutuações severas no abastecimento contínuo. Enquanto instalações centralizadas demandam arranjos logísticos robustos por meio de cooperativas regionais, a viabilidade descentralizada depende do desenvolvimento tecnológico de sistemas modulares adaptáveis e de monitoramento simplificado (IBRO *et al.*, 2022; WANG *et al.*, 2025).
- **Gargalos Regulatórios e Financeiros:** A inserção do hidrogênio biológico e de novas rotas de biometano ainda carece de marcos regulatórios nacionais perfeitamente desburocratizados para acelerar o licenciamento ambiental de pequenas e médias plantas descentralizadas (BRASIL, 2022) No entanto, a viabilização financeira de longo prazo pode ser impulsionada pela integração dessas biorrefinarias ao mercado de créditos de descarbonização (como a emissão de CBIOs no âmbito do programa federal RenovaBio), aproveitando que a correta destinação desses resíduos mitiga severamente a liberação de

CC BY

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 17/07/2026 - **Accepted:** 12/08/2026
Vol: 13.18 - August
DOI: 10.66104/zfq4ar61
Pages: 1-48

gases de efeito estufa se comparada ao descarte convencional sem tratamento (SILVA FRANCHI *et al.*, 2022)

4 Conclusões

Os estudos analisados demonstram que os resíduos da cadeia produtiva do café apresentam potencial significativo para produção de biogás e metano por meio da digestão anaeróbia, embora o desempenho varie consideravelmente em função das características físico-químicas de cada substrato. Entre os resíduos avaliados, a mucilagem e a polpa de café apresentaram os maiores potenciais de conversão, devido à maior disponibilidade de compostos biodegradáveis e menor teor de lignina. Em contraste, a casca e o pergaminho mostraram menor biodegradabilidade, exigindo estratégias adicionais para viabilizar sua conversão energética.

Os resultados evidenciam que os pré-tratamentos constituem uma etapa fundamental para aumentar a eficiência da digestão anaeróbia de resíduos lignocelulósicos. Entre as estratégias avaliadas, destacaram-se os tratamentos térmicos, alcalinos e a explosão a vapor, capazes de promover a desestruturação parcial da matriz lignocelulósica e aumentar a disponibilidade dos carboidratos fermentescíveis. Além disso, a codigestão com substratos complementares, como esterco bovino e outros resíduos orgânicos, mostrou-se uma alternativa eficaz para melhorar o equilíbrio nutricional do sistema, reduzir efeitos inibitórios e aumentar os rendimentos de metano.

Entretanto, a comparação direta entre os estudos ainda é limitada pela elevada heterogeneidade metodológica observada na literatura. Diferenças nas características dos resíduos, condições operacionais, configurações dos reatores, tipos de inóculo e unidades utilizadas para expressar os rendimentos dificultam a padronização dos resultados e a identificação precisa das estratégias mais eficientes.

CC BY

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 17/07/2026 - **Accepted:** 12/08/2026
Vol: 13.18 - August
DOI: 10.66104/zfq4ar61
Pages: 1-48

Outro aspecto relevante é a predominância de pesquisas conduzidas em escala laboratorial ou em ensaios de potencial bioquímico de metano (BMP). Ainda são escassos os estudos em escala piloto e industrial que permitam avaliar a estabilidade operacional, os custos de implementação e a viabilidade técnica de longo prazo dos sistemas aplicados aos resíduos da cadeia cafeeira.

Dessa forma, pesquisas futuras devem priorizar o escalonamento das tecnologias mais promissoras, a padronização dos métodos experimentais e a integração de avaliações tecnoeconômicas e ambientais. Adicionalmente, a investigação de sistemas de codigestão e digestão anaeróbia em dois estágios representa uma oportunidade para aumentar a recuperação energética e ampliar a inserção desses resíduos em modelos de bioeconomia e economia circular. Nesse contexto, a valorização energética dos resíduos do café pode contribuir simultaneamente para a gestão sustentável de resíduos, a geração de energia renovável e a redução dos impactos ambientais associados à cadeia produtiva cafeeira.

Agradecimentos

Os autores agradecem à Fundação de Amparo à Pesquisa e Inovação do Espírito Santo (FAPES), à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e à Universidade Federal do Espírito Santo (UFES) pelo apoio institucional e pelo suporte à pesquisa.

Referências bibliográficas

ALVES, Aldivan Rodrigues et al. Fibra para ruminantes: Aspecto nutricional, metodológico e funcional. **Pubvet**, v. 10, p. 513-579, 2006.

ALVIRA, Petal et al. Pretreatment technologies for an efficient bioethanol production process based on enzymatic hydrolysis: a review. **Bioresource technology**, v. 101, n. 13, p. 4851-4861, 2010.

ATELGE, M. R. et al. A critical review of pretreatment technologies to enhance anaerobic digestion and energy recovery. **Fuel**, v. 270, p. 117494, 2020.

CC BY

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 17/07/2026 - **Accepted:** 12/08/2026
Vol: 13.18 - August
DOI: 10.66104/zfq4ar61
Pages: 1-48

BAÊTA, Bruno Eduardo Lobo et al. Steam explosion pretreatment improved the biomethanization of coffee husks. **Bioresource Technology**, v. 245, p. 66-72, 2017.

BATTISTA, Federico; FINO, Debora; MANCINI, Giuseppe. Optimization of biogas production from coffee production waste. **Bioresource technology**, v. 200, p. 884-890, 2016.

BEKALO, Samson Ayele; REINHARDT, Hans-Wolf. Fibers of coffee husk and hulls for the production of particleboard. **Materials and structures**, v. 43, n. 8, p. 1049-1060, 2010.

BEZERRA, E. G. S.; PILATTI, M. C.; MEDEIROS, G. Técnicas de logística reversa do chorume de aterro sanitário como medida de controle de contaminação e impacto à saúde: uma revisão bibliográfica. ***Revista Brasileira de Educação e Inovação da Univel*** *(REBEIS)*, v. 1, n. 7, 2024.

BLINOVÁ, L., Sirotiak, M., Bartošová, A., & Soldán, M. (2017). **Faculty of materials science and technology in trnava review : utilization of waste from coffee production**, 25(40), 91–101.

BRASIL. Lei 14.300/2022 - **Marco legal da microgeração e minigeração distribuída, o Sistema de Compensação de Energia Elétrica (SCEE) e o Programa de Energia Renovável Social** (PERS), 2022.

BUDIYONO, Budiyono et al. Effect of pretreatment and C/N ratio in anaerobic digestion on biogas production from coffee grounds and rice husk mixtures. **International Journal of Renewable Energy Development**, v. 12, n. 1, p. 209, 2023.

CAMPOS-VEGA, Rocio et al. Spent coffee grounds: A review on current research and future prospects. **Trends in Food Science & Technology**, v. 45, n. 1, p. 24-36, 2015.

CECAFÉ – CONSELHO DOS EXPORTADORES DE CAFÉ DO BRASIL**. Relatório mensal: exportação entre 1º/01/2022 e 30/04/2022. 2022.** Disponível em: https://www.cecafe.com.br/dados-estatisticos/exportacoes-brasileiras/. Acesso em: 19 jul. 2023.

CECAFÉ. Relatório do Conselho dos Exportadores de Café do Brasil. São Paulo: CECAFÉ, 2022.

CHALA, Bilhate et al. Biogas potential of coffee processing waste in Ethiopia. **Sustainability**, v. 10, n. 8, p. 2678, 2018.

CHEN, Ye; CHENG, Jay J.; CREAMER, Kurt S. Inhibition of anaerobic digestion process: a review. **Bioresource technology**, v. 99, n. 10, p. 4044-4064, 2008.

CC BY

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 17/07/2026 - **Accepted:** 12/08/2026
Vol: 13.18 - August
DOI: 10.66104/zfq4ar61
Pages: 1-48

CHEN, Rong et al. Energy recovery potential of thermophilic high-solids co-digestion of coffee processing wastewater and waste activated sludge by anaerobic membrane bioreactor. **Bioresource technology**, v. 274, p. 127-133, 2019.

CONAB – COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Informações agropecuárias – Safras – Observatório agrícola – Acompanhamento da safra brasileira** – café. 2022. Disponível em: https://www.conab.gov.br/info-agro/safras. Acesso em: 22 jun. 2023.

CONAB – COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Safra brasileira de café.** [2020]. Disponível em: https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/cafe. Acesso em: 19 jun. 2023.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO (CONAB). *Acompanhamento da safra brasileira de café*. Brasília: CONAB, 2022. Disponível em: https://www.gov.br/conab/pt-br/atuacao/informacoes-agropecuarias/safras/safra-de-cafe. Acesso em: 17 jun. 2026.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO (CONAB). *Com maior safra de conilon, produção de café é estimada em 56,5 milhões de sacas em 2025*. Brasília: CONAB, 2025. Disponível em: https://www.gov.br/conab. Acesso em: 17 jun. 2026.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO (CONAB). *Produção de café apresenta recuperação de 2,7% em 2025, estimada em 55,7 milhões de sacas*. Brasília: CONAB, 2025. Disponível em: https://www.gov.br/conab. Acesso em: 17 jun. 2026.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO (CONAB). *Estimativa atualiza produção de café para 55,2 milhões de sacas na safra 2025*. Brasília: CONAB, 2025. Disponível em: https://www.gov.br/conab. Acesso em: 17 jun. 2026.

CONSELHO DOS EXPORTADORES DE CAFÉ DO BRASIL (CECAFÉ). Estatísticas e relatórios de exportação de café do Brasil. São Paulo, 2025.

CREMONEZ, P.A., *et al.*Biodigestão anaeróbia no tratamento de resíduos lignocelulósicos1. **Revista Brasileira de Energias Renováveis**, v. 2, p. 21–35, 2013.

DAI, Yingjie et al. New use for spent coffee ground as an adsorbent for tetracycline removal in water. **Chemosphere**, v. 215, p. 163-172, 2019.

DA SILVA, E. M. et al. Anaerobic co-digestion of microalgal biomass, sugarcane vinasse, and residual glycerol from biodiesel using simplex-centroid mixture design: methane potential, synergic effect, and microbial diversity. ***Environmental Science and Pollution Research***, v. 32, n. 28, p. 16627–16639, 2024. Disponível em: https://doi.org/10.1007/s11356-024-33193-1.

CC BY

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 17/07/2026 - **Accepted:** 12/08/2026
Vol: 13.18 - August
DOI: 10.66104/zfq4ar61
Pages: 1-48

DECARPIGNY, C. et al. Bioprocesses for the biodiesel production from waste oils and valorization of glycerol. ***Energies***, v. 15, n. 9, p. 3381, 2022.

DEMIRER, G. N.; CHEN, S. Two-phase anaerobic digestion of unscreened dairy manure. ***Process Biochemistry***, v. 40, n. 4, p. 3542-3549, 2005.

DURÁN, Carlos A. A. et al. Coffee: general aspects and its use beyond drink. Revista Virtual de Química, [s.l.], v. 9, n. 1, p. 107-134, 2017. **(Sociedade Brasileira de Química – SBQ).** Disponível em: http://dx.doi.org/10.21577/1984-6835.20170010. Acesso em: 20 jul. 2023.

EMBRAPA. Produção mundial de café foi estimada em 176,2 milhões de sacas de 60kg para a safra 2024–2025. Disponível em: https://www.embrapa.br/agropensa/busca-de-noticias/-/noticia/91004784/artigo---producao-mundial-de-cafe-foi-estimada-em-1762-milhoes-de-sacas-de-60kg-para-a-safra-20242025Artigo. Acesso em: 21 set. 2024.

Embrapa. (2021). **Ciência e Tecnologia Tornaram o Brasil um dos Maiores Produtores Mundiais de Alimentos.** Disponível em: https://www.embrapa.br/busca-de-noticias/-/noticia/75085849/ciencia-e-tecnologia-tornaram-o-brasil-um-dos-maiores-produtores-mundiais-dealimentos#:~:text=Brasil%20na%20lideran%C3%A7a%20da%20produ%C3%A7%C3%A3o,%2C%20com%2010%2C5%25. Acesso em: 14 de set. de 2023.

FARHAT, W. et al. A Review of Water-Resistant Hemicellulose-Based Materials: Processing and Applications. **Chemsuschem**, v. 10, n. 2, p.305-323, 2017.

FERNANDES, A. S. et al. Impacts of discarded coffee waste on human and environmental health. **Ecotoxicology and environmental safety**, v. 141, p. 30-36, 2017.

FRASSATTO, Priscila Aparecida Casciatori. **Formulação de coquetéis de enzimas produzidas por fungos em cultivo sólido e aplicação na hidrólise de bagaço de cana-de-açúcar.** 2020. 181 f. Tese (Doutorado em Química) — Instituto de Biociências, Letras e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", São José do Rio Preto, 2020.

GE, Huoqing; JENSEN, Paul D.; BATSTONE, Damien J. Temperature phased anaerobic digestion increases apparent hydrolysis rate for waste activated sludge. **water research**, v. 45, n. 4, p. 1597-1606, 2011.

GE, Xumeng; XU, Fuqing; LI, Yebo. Solid-state anaerobic digestion of lignocellulosic biomass: Recent progress and perspectives. **Bioresource Technology**, v. 205, p. 239-249, 2016.

GIROTTO, Francesca; LAVAGNOLO, Maria Cristina; PIVATO, Alberto. Spent coffee grounds alkaline pre-treatment as biorefinery option to enhance their anaerobic digestion yield. **Waste and Biomass Valorization**, v. 9, p. 2565-2570, 2017.

CC BY

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 17/07/2026 - **Accepted:** 12/08/2026
Vol: 13.18 - August
DOI: 10.66104/zfq4ar61
Pages: 1-48

GRAÇA, Carlos Henrique da; CALDAS, Rafaela Maria Figueiredo. Estimativa da quantidade de resíduos (casca e polpa) produzidos durante o processo de beneficiamento do café no município de Varginha – MG**. Revista Geonorte**, [s.l.], v. 8, n. 30, p. 104-117, 22 dez. 2017.

GRIMBERG, S. J. et al. Anaerobic digestion of food waste through the operation of a mesophilic two-phase pilot scale digester: assessment of variable loadings on system performance. ***Bioresource Technology***, v. 178, p. 226–229, 2015. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.biortech.2014.09.001

GUERI, M. V. D. *et al*;. Digestão anaeróbia de resíduos alimentares utilizando ensaios BMP**. Biofix Scientific Journal**, v. 3, n. 1, p. 08-16, 2018.

GUERI, Matheus Vitor Diniz et al. Pré-tratamentos de resíduos lignocelulósicos visando ao aumento da geração de metano nos processos de digestão anaeróbia: uma revisão. **Revista Geama**, v. 7, n. 3, p. 13-27, 2021.

HE, Yanfeng et al. Physicochemical characterization of rice straw pretreated with sodium hydroxide in the solid state for enhancing biogas production. **Energy & Fuels**, v. 22, n. 4, p. 2775-2781, 2008.

IRIONDO-DEHOND, Amaia et al. Validation of coffee by-products as novel food ingredients. **Innovative Food Science & Emerging Technologies**, v. 51, p. 194-204, 2019.

JANISSEN, B.; HUYNH, T. T. Chemical composition and value-adding applications of coffee industry byproducts: A review. **Resources, Conservation & Recycling**, v.128, p. 110-117, 2017.

KAMPIOTI, Anastasia; KOMILIS, Dimitrios. Anaerobic co-digestion of coffee waste with other organic substrates: A mixture experimental design. **Chemosphere**, v. 297, p. 134124, 2022.

KANG, S. et al. Simultaneously enhancing H2 recovery and CO2 captured pressure during the hydrogen purification process of medium-temperature shifting gas by coupled wet CO2 separation-PSA technology: From laboratory to industrial scale test. ***International Journal of Greenhouse Gas Control***, v. 136, p. 104014, 2024.

KRÓL, A. et al. Hydrogen purification technologies in the context of its utilization. *Energies*, v. 17, n. 15, p. 3794, 2024. Disponível em: https://doi.org/10.3390/en17153794

KIM, Jaai et al. Anaerobic co-digestion of spent coffee grounds with different waste feedstocks for biogas production. **Waste Management**, v. 60, p. 322-328, 2017.

KIM, Danbee; KIM, Jaai; LEE, Changsoo. Effect of mild-temperature thermo-alkaline pretreatment on the solubilization and anaerobic digestion of spent coffee grounds. **Energies**, v. 11, n. 4, p. 865, 2018.

CC BY

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 17/07/2026 - **Accepted:** 12/08/2026
Vol: 13.18 - August
DOI: 10.66104/zfq4ar61
Pages: 1-48

KUMAR, A. K.; SHARMA, S. Recent updates on different methods of pretreatment of lignocellulosic feedstocks: a review. **Bioresources and Bioprocessing**, 2017, v. 4, n. 7, p. 1- 19.

LI, Y. *et al*. **The Study of Enzyme Hydrolysis Saccharification Process of Stems and Leaves of Banana**. **Energ. Procedia**, v.16, p. 223-228, 2012.

LI, X.; STREZOV, V.; KAN, T. Energy recovery potential analysis of spent coffee grounds pyrolysis products. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis,** v. 110, n.1, p. 79-87, 2014.

LOPEZ-HIDALGO, A. M.; SMOLIŃSKI, A.; SANCHEZ, A. A meta-analysis of research trends on hydrogen production via dark fermentation. ***International Journal of Hydrogen Energy***, 2022.

LUZ, F. C et al. Anaerobic digestion of liquid fraction coffee grounds at laboratory scale: evaluation of the biogas yield. **Energy Procedia**, v. 105, p. 1096-1101, 2017.

LUZ, Fábio Codignole et al. Spent coffee enhanced biomethane potential via an integrated hydrothermal carbonization-anaerobic digestion process. **Bioresource technology**, v. 256, p. 102-109, 2018.

MARTÍNEZ-MENDOZA, L. J.; MUÑOZ, R.; GARCÍA-DEPRAECT, O. Enhanced methane production from food waste: A systematic comparison between conventional single-stage and lactate-based two-stage anaerobic digestion processes. ***Biomass and Bioenergy***, 2024.

MONTGOMERY, Lucy FR; BOCHMANN, Günther. **Pretreatment of feedstock for enhanced biogas production**. Ireland: IEA Bioenergy, 2014.

MOURA, H. O. M. A.; CAMPOS, L. M. A.; SILVA, V. L.; ANDRADE, J. C. F; ASSUMPÇÃO, S. M. N.; PONTES, L. A. M.; CARVALHO, L. S. Investigating acid/peroxide-alkali pretreatment of sugarcane bagasse to isolate high accessibility cellulose applied in acetylation reactions. **Cellulose**, 2018, v. 25, n. 10, p. 5669–5685.

MURTHY, P. S.; NAIDU, M. M. Sustainable management of coffee industry by-products and value addition - A review. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 66, p. 45–58, 2012.

NASCIMENTO, T.L.D,S.D; FERREIRA, V.P. Quantificação teorica e experimental do biogás produzido durante a remoção anaeróbia de matéria orgânica de efluente doméstico. **Brazilian Journal of Development**, v. 6, n. 2, p. 6716-6734, 2020.

CC BY

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 17/07/2026 - **Accepted:** 12/08/2026
Vol: 13.18 - August
DOI: 10.66104/zfq4ar61
Pages: 1-48

NAVA-VALENTE, Noemi et al. Effect of thermal and acid pre-treatment on increasing organic loading rate of anaerobic digestion of coffee pulp for biogas production. **Biomass Conversion and Biorefinery**, v. 13, n. 6, p. 4817-4830, 2023.

OIC – ORGANIZAÇÃO INTERNACIONAL DO CAFÉ. **Produção do ano. London, 2021**. Disponível em: https://www.ico.org/prices/po-production.pdf. Acesso em: 19. jun. 2023.

PASSOS, Fabiana et al. Anaerobic co-digestion of coffee husks and microalgal biomass after thermal hydrolysis. **Bioresource technology**, v. 253, p. 49-54, 2018.

PRAUCHNER, M. J. et al. Combustíveis hidrocarbonetos alternativos, com ênfase para os combustíveis sustentáveis para aviação. ***Revista Virtual de Química***, p. 1–21, 2023.

RAJESH BANU, J. et al. Integrated biorefinery routes of biohydrogen: possible utilization of acidogenic fermentative effluent. ***Bioresource Technology***, v. 319, p. 124181, 2021.

ROTTA, N. M. et al. A comprehensive analysis of operations and mass flows in postharvest processing of washed coffee. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 170, n. March, p. 105554, jul. 2021

SANTOS, L. C. dos, Adarme, O. F. H., Baêta, B. E. L., Gurgel, L. V. A., & Aquino, S. F. de. (2018). **Production of biogas (methane and hydrogen) from anaerobic digestion of hemicellulosic hydrolysate generated in the oxidative pretreatment of coffee husks. Bioresource Technology**, 263(May), 601–612.

SCHULTZ, E. L.; SOARES, I. P. Reforma do biogás – revisão. ***Circular Técnica*, Brasília**, DF, v. 13, n. 1, p. 1-9, 1 ago. 2014.

SILVA FRANCHI, R.A.D; DA SILVA, B.M.R; BARBOSA, T. G. G. Mapeamento Patentário de Utilização de Resíduos do Café no Brasil, na América Latina e no Mundo. **Cadernos de Prospecção**, v. 15, n. 4, p. 1158-1176, 2022.

SUN, Ye; CHENG, Jiayang. Hydrolysis of lignocellulosic materials for ethanol production: a review. **Bioresource technology**, v. 83, n. 1, p. 1-11, 2002.

TAHERDANAK, Mohsen; ZILOUEI, Hamid. Improving biogas production from wheat plant using alkaline pretreatment. **Fuel**, v. 115, p. 714-719, 2014

WANG, J. et al. Anaerobic digestion of lignocellulosic biomass: process intensification and artificial intelligence**.** ***Renewable and Sustainable Energy Reviews***, v. 210, p. 115264, 2025. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.rser.2024.115264

CC BY

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 17/07/2026 - **Accepted:** 12/08/2026
Vol: 13.18 - August
DOI: 10.66104/zfq4ar61
Pages: 1-48

WANG, D., XIN, Y., SHI, H., AI, P., YU, L., LI, X., CHEN, S. **Closing ammonia loop in efficient biogas production: recycling ammonia pretreatment of wheat straw**. Biosyst. 2019.

WOŁEJKO, E. et al. Enzymatic activity in the anaerobic co-digestion of cavitated coffee waste and sewage sludge. ***Energies*****,** v. 18, n. 1, p. 187, 2025. Disponível em: https://doi.org/10.3390/en18010187.

ZHENG, X.; LI, R. Critical review on two-stage anaerobic digestion with H2 and CH4 production from various wastes. ***Water*****,** 2024.

ZHOU S; Zhang Y; DONG Y. Pretreatment for biogas production by anaerobic fermentation of mixed corn stover and cow dung. **Energ**,;46(1):644–8, 2012.

CC BY