

Análise imediata do bagaço de cana de açúcar para aplicação em fermentação escura

DOI: 10.5281/zenodo.22312800

Murilo Lino Roberto Barbosa^{*a}, Guilherme Fonseca Barbosa^a e Grace Ferreira Ghesti^a

The transition to renewable energy generation has driven the use of biomass as a strategic feedstock. Sugarcane bagasse stands out as an abundant substrate for biorefineries. Dark fermentation is a relevant route for its valorization, where process efficiency relates to substrate composition. Proximate analysis provides essential data regarding biodegradation potential. This study performs a proximate analysis of sugarcane bagasse to evaluate its viability for dark fermentation, aligning with UN Sustainable Development Goals (SDGs) 7, 8, and 12.

A transição para matrizes energéticas renováveis impulsiona o uso de biomassas residuais. O bagaço de cana-de-açúcar destaca-se como substrato promissor para valorização em biorrefinarias. A fermentação escura é uma rota relevante para esse reaproveitamento, cuja eficiência depende da composição físico-química do material. Dentre as etapas de caracterização, a análise imediata fornece parâmetros fundamentais sobre o potencial de biodegradação e teor de matéria orgânica útil da biomassa. O objetivo deste trabalho foi realizar a análise imediata do bagaço de cana-de-açúcar, avaliando sua viabilidade para aplicação em rotas de fermentação escura. Os resultados obtidos confirmam a estabilidade do resíduo e seu alinhamento aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) 7, 8 e 12 da ONU.

^aUniversidade de Brasília (UnB). Campus Darcy Ribeiro. Instituto de Química (IQ/UnB).

^{*}E-mail: muriloroberto.lino@gmail.com

Palavras-chave: Bagaço de cana-de-açúcar; Fermentação escura; Biocombustíveis.

Recebido em 16 de agosto de 2026,
Aprovado em 30 agosto de 2026,
Publicado em 04 de setembro de 2026.

Introdução

A economia circular propõe uma nova forma de pensar a produção e o consumo para enfrentar os problemas ambientais e econômicos atuais. Diferente do modelo tradicional que funciona na lógica de extrair recursos, fabricar produtos e descartar o lixo, a economia circular busca reaproveitar materiais, reduzir desperdício e regenerar os recursos naturais.¹ No Brasil, essa ideia é muito importante no setor agrícola e agroindustrial, que é um dos motores da economia do país, mas também gera uma quantidade enorme de resíduos orgânicos.

De acordo com o Plano Nacional de Resíduos Sólidos², o uso correto desses resíduos do campo e das indústrias é fundamental para diminuir os impactos ambientais e criar alternativas mais sustentáveis. Um dos principais resíduos gerados no país é o bagaço de cana-de-açúcar, produzido em grande quantidade nas usinas do setor sucroenergético.

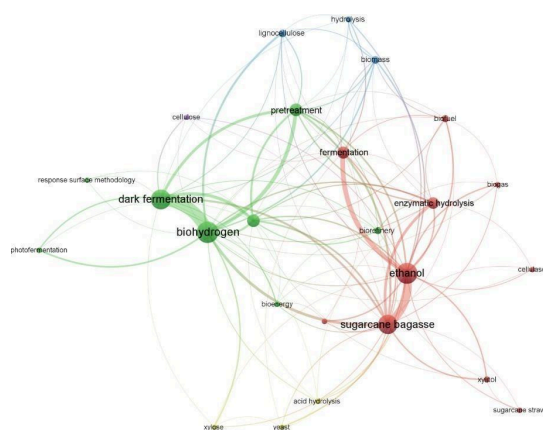
Esse material é formado principalmente por celulose, hemicelulose e lignina, componentes da estrutura vegetal, o que dá ao bagaço um grande potencial para ser usado como fonte de energia limpa ou na fabricação de novos produtos.

Nesse cenário, o bagaço de cana-de-açúcar destaca-se como uma das biomassas residuais mais abundantes do Brasil, mantendo propriedades estruturais e composicionais muito consistentes e padronizadas entre diferentes cultivares nacionais, o que facilita o seu processamento industrial.⁹

Além disso, o acoplamento da fermentação escura a rotas foto-fermentativas sequenciais surge como uma das estratégias biotecnológicas mais promissoras para superar as limitações termodinâmicas de rendimento e maximizar a produção biológica de hidrogênio.⁶

para embasar seu uso potencial em processos de fermentação escura.

Metodologia



O bagaço de cana-de-açúcar utilizado neste estudo foi coletado na região de Planaltina (DF). Logo após a coleta, o material passou por uma etapa de preparação que incluiu a moagem e a padronização do tamanho dos grãos (granulometria), garantindo que a amostra ficasse homogênea para as análises em laboratório.

A caracterização do bagaço seguiu o procedimento da análise imediata, realizada em três determinações principais.

Primeiro, mediu-se o teor de umidade por meio da diferença de massa da amostra antes e depois de ir à estufa a 105 °C, o que permitiu quantificar a quantidade de água no material. A determinação do teor de umidade (U) foi calculada pela perda de massa após a secagem, conforme a Equação 1:

$$U(\%) = \frac{m_i - m_f}{m_i} \times 100 \quad (1)$$

Em que mi é a massa inicial da amostra úmida (g) e mf é a massa final da amostra seca (g).

$$MV(\%) = \frac{m_i - m_f}{m_i} \times 100 \quad (2)$$

Onde mi é a massa inicial da amostra (g) e mf é a massa residual da amostra após o aquecimento no forno mufla a 950 °C (g).

Por fim, o teor de cinzas foi determinado após a combustão completa da matéria orgânica em forno a 600 °C durante 4 horas, restando apenas os minerais inertes. O teor de cinzas (C) foi determinado pela razão entre a massa do resíduo inorgânico e a massa inicial da amostra seca, expresso pela Equação 3:

$$C(\%) = \frac{m_f}{m_i} \times 100 \quad (3)$$

Sendo mi a massa inicial da amostra (g) e mf a massa final do resíduo após a incineração (g).

Para garantir a confiabilidade e a precisão dos dados, todas as etapas foram feitas em triplicata, utilizando materiais de referência certificados e brancos analíticos. Como critério de qualidade, aceitou-se apenas um desvio relativo inferior a 5% entre as medições de cada réplica.

Para avançar no uso do bagaço em rotas menos exploradas, como a fermentação escura, primeiro é preciso conhecer bem as características do material. É aí que entra a análise imediata: um conjunto de testes em laboratório que mede a quantidade de umidade, cinzas, materiais voláteis e carbono fixo no bagaço. Esses dados são práticos e mostram como a biomassa se comporta no processamento e qual o seu potencial para servir de matéria-prima nesses bioprocessos.³

Estudar e caracterizar o bagaço de cana se encaixa diretamente nos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) da Organização das Nações Unidas (ONU),⁴ principalmente nos objetivos de garantir energia limpa e acessível (ODS 7), incentivar a inovação na indústria (ODS 9) e promover o consumo e a produção responsáveis (ODS 12). Assim, conhecer as propriedades desse resíduo ajuda a evitar o descarte inadequado e fornece os dados necessários para transformar o bagaço em um recurso valioso dentro da economia circular.⁴

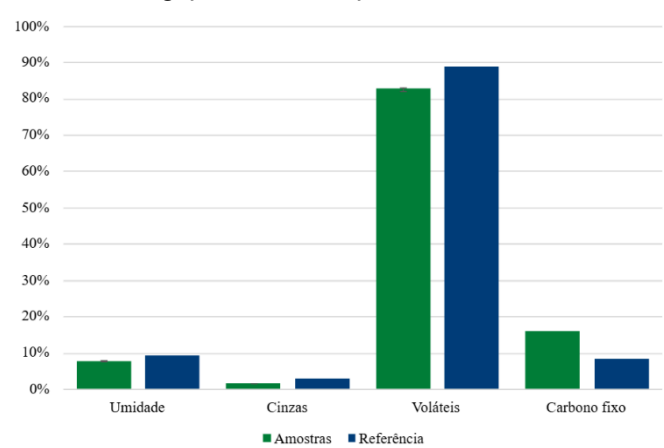
Deste modo, este trabalho tem como objetivo realizar a análise imediata do bagaço de cana-de-açúcar, avaliando suas características físico-químicas como etapa fundamental

Após a obtenção e o cálculo dos dados experimentais, os resultados foram comparados com valores relatados na literatura científica para biomassas semelhantes. Para isso, consultaram-se trabalhos anteriores, apresentados na seção a seguir, avaliando se os teores de umidade, materiais voláteis e cinzas obtidos estavam coerentes e dentro da faixa esperada para o bagaço de cana-de-açúcar.

Resultados e discussão

Os resultados obtidos na análise imediata do bagaço de cana-de-açúcar apresentaram boa concordância geral com os valores de referência compilados na literatura. De modo geral, o gráfico de caracterização confirma que a biomassa analisada possui um perfil adequado, com parâmetros estáveis e dentro dos padrões típicos esperados para resíduos agrícolas.

Figura 2. Comparação dos teores da análise imediata entre as amostras de bagaço de cana-de-açúcar e valores de referência.



Para consolidar as observações gráficas, a Tabela 1 apresenta os valores médios exatos e seus respectivos desvios, evidenciando a precisão das triplicatas experimentais realizadas.

Tabela 1. Resultados médios obtidos na análise imediata do bagaço de cana-de-açúcar.

Parâmetro	Média (%)	Desvio Padrão (%)	Desvio Relativo (%)
Umidade*	7,675	0,155	2,020
Materiais Voláteis**	82,566	0,606	0,734
Cinzas**	1,661	0,072	4,339
Carbono Fixo**	15,773	—	—

[*] Base Úmida (b.u.). [**] Base Seca (b.s.).

Para a correta interpretação dos resultados obtidos na análise imediata do bagaço de cana-de-açúcar, é fundamental distinguir as bases de cálculo empregadas na apresentação dos

dados, expressas em base úmida (b.u.) e base seca (b.s.). A base úmida avalia a amostra integral em seu estado original de recebimento, incluindo a umidade residual de 7, 675% ± 0, 155%. Sob esta condição, o balanço de massa global exige que a soma de todos os constituintes centesimais, umidade (7, 675%), materiais voláteis (82, 566%), cinzas (1, 661%) e o carbono fixo corrigido para base úmida (8, 098%), resulte em exatamente 100, 00%. Por outro lado, a base seca desconsidera a fração hídrica para expressar as concentrações dos componentes orgânicos e minerais exclusivamente na matéria seca, o que facilita a comparação direta com outras biomassas lignocelulósicas. Sob esta perspectiva recomendada para a caracterização química, a umidade é reportada isoladamente (7,675% b.u.), enquanto a soma dos componentes secos, materiais voláteis (82,566%), cinzas (1, 661%) e carbono fixo (15,773%), fecha o balanço matemático em exatamente 100,00%.

A avaliação do teor de umidade indicou um valor médio de 7,675%, ligeiramente inferior à faixa de 9% a 10% frequentemente reportada na literatura.⁵ Do ponto de vista do processamento, essa característica é altamente favorável. O baixo teor de umidade atua como um fator de preservação da biomassa, inibindo a proliferação de microrganismos deteriorantes (como fungos) durante o armazenamento em pátios industriais. Além disso, em rotas que exigem pré-tratamentos termoquímicos, a biomassa mais seca reduz a penalidade energética associada a evaporação da água intrínseca, otimizando o balanço de massa e energia do sistema.

O teor de cinzas determinado foi de 1,661%, situando-se abaixo da referência típica de 3%. As cinzas representam a fração inorgânica da biomassa, composta predominantemente por sílica e metais alcalinos. Um reduzido teor de cinzas é um indicador de alta qualidade para o substrato, pois minimiza o risco de incrustações e desgaste abrasivo em equipamentos. No contexto da biotecnologia, o baixo conteúdo mineral é crucial para evitar a inibição osmótica e a toxicidade aos consórcios microbianos, maximizando o volume de sólidos voláteis efetivamente disponíveis para a hidrólise enzimática. A fração de materiais voláteis, que atingiu a marca de 82,566%, reflete a parcela da biomassa que se decompõe e vaporiza termicamente. Embora ligeiramente inferior à referência literária (cerca de 88%), essa alta proporção atesta que a maciça maioria da estrutura do bagaço é constituída por matéria orgânica lábil e reativa, majoritariamente holo celulose (celulose e hemicelulose). É justamente essa fração que fornece os carboidratos e açúcares

fermentescíveis primários que atuarão como fonte de carbono no metabolismo bacteriano.

Por fim, o teor de carbono fixo, calculado por diferença em base seca, conforme a Equação 4, foi de 15,773%, um valor superior aos 8% típicos da literatura.

$$CF (\%) = 100\% - (\%V + \%C) \quad (4)$$

O carbono fixo está intimamente associado à fração mais recalcitrante da biomassa vegetal, como a lignina e porções altamente cristalinas da celulose, que não volatilizam nas temperaturas de ensaio. Este enriquecimento relativo no carbono fixo justifica cientificamente a necessidade e a importância da aplicação de métodos de pré-tratamento (sejam eles químicos, físicos ou biológicos) para desestruturar a matriz lignocelulósica do bagaço, rompendo a barreira da lignina e facilitando o acesso das enzimas aos açúcares.

Estudos de otimização revelam que o pré-tratamento com ácidos diluídos ou hidrotérmicos é fundamental para contornar essa recalcitrância e liberar frações concentradas de glicose e xilose, maximizando a eficiência de conversão por microflora termofílica e minimizando a geração de compostos inibidores.¹⁰ Adicionalmente, o mapeamento preciso dessas frações abre caminho para a aplicação de modelos metabólicos em escala genômica aplicados à otimização e ao desenho de linhagens industriais mais robustas para processos consolidados.¹³

Em suma, o balanço entre baixa umidade, reduzido teor de cinzas e a predominância de materiais voláteis assegura a viabilidade e a alta qualidade do bagaço de cana-de-açúcar analisado. O perfil físico-químico obtido atesta seu grande potencial como substrato robusto para processos de bioconversão, em especial como matéria-prima na produção de biohidrogênio por meio de reatores de fermentação escura.

Conclusões

A caracterização física e química do bagaço de cana-de-açúcar por meio da análise imediata cumpriu o objetivo científico de estabelecer parâmetros analíticos essenciais que validam o potencial biotecnológico deste coproduto lignocelulósico como substrato estável e de alta reatividade para processos de fermentação escura.

A importância estratégica desta investigação fundamenta-se em preencher uma lacuna crítica na literatura recente, uma vez que o mapeamento bibliométrico de

palavras-chave revela que, embora o bagaço de cana-de-açúcar esteja historicamente consolidado como matéria-prima para a produção de bioetanol, a sua rota biológica de conversão para biohidrogênio por fermentação escura ainda é fracamente explorada e carece de dados de partida padronizados que deem suporte à engenharia de processos.

Um dos fatores determinantes para a eficiência e aplicabilidade prática dos dados obtidos reside no controle e na discussão do teor de umidade da biomassa, estabelecido nesta pesquisa em $7,675\% \pm 0,155\%$. Na prática agroindustrial e logística brasileira, o bagaço é descarregado das moendas industriais em condições de saturação hídrica extrema, apresentando teores de umidade típicos de 45% a 50% em base úmida. A estocagem direta dessa biomassa úmida em grandes pilhas ao ar livre nos pátios das usinas desencadeia uma rápida fermentação exotérmica de açúcares residuais, elevando a temperatura interna para cerca de 60 °C, o que provoca o acúmulo de gases combustíveis sob risco iminente de incêndios e autocombustão. Além disso, a alta umidade atrai fungos causadores de podridão branca, que degrada os carboidratos e açúcares fermentescíveis primários que degradam aceleradamente os polissacarídeos estruturais (celulose, hemicelulose e lignina), acarretando perdas severas de até 15% em massa vegetal útil antes do processamento

Em rotas termoquímicas concorrentes, como a combustão e a gaseificação, a presença de água intrínseca consome uma fração expressiva da energia térmica útil do combustível exclusivamente para sua evaporação, reduzindo de forma drástica a eficiência operacional do sistema,^{5,12} razão pela qual as políticas de resíduos sólidos priorizam a queima apenas de biomassas com baixos teores de água (próximos a 8%).

Sob a ótica bioquímica da fermentação escura, a manutenção e a padronização da biomassa com umidade controlada de aproximadamente 7,6% desempenham um papel crucial de preservação biológica, inibindo o apodrecimento e a biodegradação precoce das frações lignocelulósicas durante o armazenamento. Isso garante uma matéria-prima de alta qualidade composicional e com sólidos orgânicos altamente concentrados, reduzindo a penalidade energética nas etapas subsequentes de pré-tratamento hidrotérmico e hidrólise enzimática. A robustez e a alta precisão das triplicatas experimentais realizadas nesta pesquisa foram consolidadas pela comparação minuciosa de seus parâmetros analíticos com dados reportados

por múltiplos autores na literatura científica:

- **Materiais Voláteis (82,566% ± 0, 606%):** O teor de voláteis determinado neste estudo apresentou excelente consonância com os 83, 98% ± 1, 48% obtidos em bagaço bruto⁹ (*in natura*) coletado na região central de São Paulo, superando de forma expressiva os 79, 29% ± 0, 71% descritos no estado de Goiás,⁵ e os 69, 99% reportados em análises na África do Sul.¹² Uma vez que a matéria volátil da biomassa representa a fração orgânica que se vaporiza e se decompõe sob aquecimento térmico, sendo composta majoritariamente por hemicelulose e celulose, esse expressivo teor obtido (superior a 82%) comprova que a maior parte da parede celular do bagaço analisado constituído por material analisado passou por um processo eficiente de lavagem e moagem que minimizou a contaminação por sílica e óxidos inorgânicos do solo, que tendem a se acumular nas frações de menor tamanho de partícula nas moendas industriais.³
- **Carbono Fixo (15,773%):** O teor de carbono fixo determinado por diferença assemelhou-se aos 16, 14% ± 0,84%⁵ encontrados, aos 16,39%,¹² superando o índice de 12,56% ± 1,11%.⁹ Como o carbono fixo representa a porção carbonácea sólida que resiste à volatilização térmica imediata, ele está intimamente correlacionado aos componentes de maior recalcitrância física e estabilidade térmica da parede celular, especificamente a lignina e as regiões de celulose altamente cristalina. A presença dessa fração recalcitrante de cerca de 15,7% atesta que a biomassa possui uma barreira física robusta à penetração enzimática. Isso justifica, sob o ponto de vista biotecnológico, a indispensabilidade do acoplamento de tratamentos prévios (físicos, químicos ou enzimáticos) capazes de desestruturar a blindagem da lignina para expor a holo celulose ao ataque microbiano.¹⁰

Em suma, a análise imediata desenvolvida neste trabalho fornece um diagnóstico físico-químico padronizado da biomassa, essencial para que engenheiros e biotecnólogos possam calcular balanços de massa e dimensionar adequadamente as etapas de pré-tratamento e carregamento orgânico de reatores fermentativos. O reaproveitamento energético desse coproduto agroindustrial alinha-se de forma direta com as diretrizes do Plano Nacional de Resíduos Sólidos,² com as premissas da transição para a economia circular restaurativa e com os Objetivos de

Desenvolvimento Sustentável (ODS) da Organização das Nações Unidas (ONU),⁴ especificamente no que tange às metas de Energia Limpa e Acessível (ODS 7), Indústria, Inovação e Infraestrutura (ODS 9) e Consumo e Produção Responsáveis (ODS 12).

intuída por matéria orgânica lábil e altamente reativa. Essa característica é de suma importância para a digestão anaeróbica, pois assegura que a estrutura lignocelulósica, após desestruturação preliminar, fornecerá uma quantidade abundante de carboidratos livres para o metabolismo microbiano produtor de hidrogênio.

- **Teor de Cinzas (1,661% ± 0,072%):** O índice mineral residual verificado nesta pesquisa posicionou-se abaixo da referência média típica de 3% aceita na literatura para o bagaço de cana. Este resultado é notavelmente inferior aos índices de cinzas reportados de 4,55% ± 0,16%,⁵ de 3,56% ± 0,82%,⁹ e extraordinariamente menor do que resíduos agrícolas altamente mineralizados como a casca ou palha de arroz, que frequentemente ultrapassam a marca de 18% de cinzas inertes. A obtenção de um baixo conteúdo mineral é um indicador de alta pureza e qualidade da biomassa. Na engenharia de bioprocessos, a minimização de cinzas é fundamental para prevenir o desgaste físico abrasivo de bombas e tubulações, evitar fenômenos corrosivos e de incrustação e, sob o aspecto microbiológico, impedir a inibição osmótica e efeitos de toxicidade de cátions minerais sobre os consórcios de bactérias fermentativas anaeróbicas, maximizando o rendimento biológico global do biorreator. Esse resultado também evidencia que

Seção experimental

A descrição dos procedimentos experimentais a seguir visa fornecer o detalhamento necessário para garantir a reprodutibilidade do estudo por outros pesquisadores. A preparação da biomassa e a determinação dos parâmetros da análise imediata seguiram os métodos operacionais padronizados por Moraes, Rosa e Marconcini.³ e Inicialmente, o bagaço de cana-de-açúcar passou por um processo de preparação para assegurar a homogeneidade do material, compreendendo etapas de secagem ao ar, moagem em moinho de facas e peneiramento para padronização da granulometria das partículas antes dos ensaios.

A caracterização físico-química abrangeu a determinação dos teores de umidade, cinzas, materiais

voláteis e carbono fixo. O teor de umidade foi determinado pela perda de massa após a secagem da biomassa em estufa mantida a 105°C ($\pm 2^\circ\text{C}$) até a obtenção de massa constante. O conteúdo de cinzas foi avaliado pela calcinação da matéria orgânica em forno mufla a 600°C (25°C) até a obtenção do resíduo mineral inerte. Para a mensuração das matérias voláteis, a amostra desidratada foi submetida ao aquecimento em forno mufla a 900°C ($\pm 20^\circ\text{C}$) por 7 minutos em cadinho fechado, prevenindo a combustão direta.

Para assegurar a precisão e a confiabilidade estatística dos dados permitindo sua futura replicação e citação por outros trabalhos todas as determinações analíticas foram realizadas em triplicata, sendo os resultados tabulados e expressos por meio da média aritmética acompanhada do desvio padrão.

Contribuições por Autor

A realização deste trabalho foi executada pelo autor do artigo, cujos experimentos foram conduzidos ao longo de seis meses, durante o segundo semestre de 2025, no Laboratório de Bioprocessos, Materiais e Combustíveis. O aluno de graduação em Engenharia Química Murilo Lino Roberto Barbosa foi responsável pela execução prática dos ensaios de análise imediata do bagaço de cana-de-açúcar, pelo tratamento dos dados, pelo levantamento bibliográfico e pela redação inicial do manuscrito. O aluno de mestrado Guilherme Fonseca Barbosa atuou no suporte metodológico e operacional das atividades de laboratório, no auxílio à interpretação dos resultados físico-químicos e na revisão crítica do texto. A professora doutora Grace Ferreira Ghesti respondeu pela concepção do estudo, orientação e supervisão geral do projeto.

Conflito de interesse

Não há conflito de interesses.

Agradecimentos

Agradeço à Universidade de Brasília (UnB) e ao Laboratório de Bioprocessos, Materiais e Combustíveis (LMCERVA) pela infraestrutura concedida..

Notas e referências

- 1 Ellen MacArthur Foundation, *Towards the circular economy* Vol. 1: an economic and business rationale

for an accelerated transition}, Ellen MacArthur Foundation, Cowes, 2013.

- 2 Ministério do Meio Ambiente (MMA), *Plano Nacional de Resíduos Sólidos – Planares*, MMA, Brasília, 2022.
- 3 J. P. S. Morais, M. F. Rosa and J. M. Marconcini, *Procedimentos para análise lignocelulósica*, Embrapa, Campina Grande, 1st edn., 2010.
- 4 Organização das Nações Unidas (ONU), *Objetivos de Desenvolvimento Sustentável*, ONU, Brasília, 2024.
- 5 D. C. Arantes, *Potencial de produção de biogás a partir do bagaço de cana-de-açúcar*, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2014.
- 6 S. Gupta, A. Fernandes, A. Lopes, L. Grasa and J. Salafranca, *Appl. Sci.*, 2024, **14**, 10789.
- 7 E. K. Holwerda, K. D. Hirst and L. R. Lynd, *J. Ind. Microbiol. Biotechnol.*, 2012, **39**, 943--947.
- 8 S. Sharma, S. Basu, N. P. Shetti and T. M. Aminabhavi, *Sci. Total Environ.*, 2020, **713**, 136633.
- 9 N. P. Pérez, J. A. R. Travieso, E. D. Shelton, D. T. Pedroso, E. B. Machin, C. E. Tuna and J. L. Silveira, *Bioresources and Bioprocessing*, 2025, **12**, 60.
- 10 Z. Lai, M. Zhu, X. Yang, J. Wang and S. Li, *Biotechnol. Biofuels*, 2014, **7**, 119.
- 11 A. Sluiter, B. Hames, R. Ruiz, C. Scarlata, J. Sluiter, D. Templeton and D. Crocker, *Determination of Structural Carbohydrates and Lignin in Biomass: Laboratory Analytical Procedure (LAP)*, National Renewable Energy Laboratory, 2012.
- 12 A. Anukam, S. Mamphweli, E. Meyer and O. Okoh, *J. Energy*, 2014, **2014**, 713054.
- 13 R. A. Thompson, S. Dahal, S. Garcia, I. Nookaew and C. T. Trinh, *Biotechnol. Biofuels*, 2016, **9**, 194