



REVISTA AIDIS

de Ingeniería y Ciencias Ambientales:
Investigación, desarrollo y práctica.

POTENCIAL ENERGÉTICO DO BIOGÁS GERADO A PARTIR DA BIODIGESTÃO DE RESÍDUOS DO PROCESSAMENTO INDUSTRIAL DE ERVA-MATE

Maurício Cabral Penteado ¹

Gabriel Menon de Lima ²

Felipe Rafael Zarpellon ³

Matheus Vitor Diniz Guerí ⁴

* Waldir Nagel Schirmer ²

ENERGY POTENTIAL OF BIOGAS GENERATED FROM WASTE BIODIGESTION OF THE YERBA MATE INDUSTRIAL PROCESSING

Recibido el 4 de febrero de 2020; Aceptado el 13 de enero de 2021

Abstract

Considering the high generation of residues and byproducts during the processing of yerba mate allied to the need to seek treatment technologies that enable the valorization of substrates of this nature, the objective of this study was to evaluate the potential of biogas generation from these residues and their energy use. It was possible to verify that the generation of biogas increased in proportion to the addition of inoculum to the environment; in this case, Treatment B, with a S/I ratio equal to 1:5 was the one that presented the greatest potential for biogas generation, 42.25 NmL.gsv⁻¹. However, despite the higher biogas generation among the evaluated scenarios, the low methane content of this treatment (23.1%) shows the low biodegradability of the substrates studied here. In addition to these results, in a later analysis and for the evaluated scenario, it was verified the nonviability of the biogas energy use, since the possible energy potential to be obtained represented only 1% of the energy demand of the evaluated industrial unit.

Keywords: anaerobic digestion, biomass; recovery of industrial waste; renewable energies.

¹ Programa de Pós-graduação Interdisciplinar em Energia e Sustentabilidade, Universidade Federal da Integração Latino-Americana, Brasil.

² Departamento de Engenharia Ambiental, Universidade Estadual do Centro Oeste (UNICENTRO), Brasil.

³ Leão Alimentos e Bebidas, Brasil.

⁴ Instituto Latino-Americano de Infraestrutura e Território, Universidade Federal da Integração Latino-Americana, Brasil.

* *Autor de correspondente:* Departamento de Engenharia Ambiental, Universidade Estadual do Centro-Oeste (UNICENTRO). Rua Professora Maria Roza Zanon de Almeida, Bairro Engenheiro Gurtierrez, Irati, Paraná, CEP 84505-677. Brasil.

Email: wanasch@hotmail.com

Resumo

Considerando a elevada geração de resíduos e subprodutos durante o processamento da erva-mate aliado à necessidade de se buscar tecnologias de tratamento que possibilitem a valorização de substratos desta natureza, o objetivo deste estudo foi avaliar o potencial de geração de biogás a partir destes resíduos e o seu aproveitamento energético. Para tanto, foram analisadas as características físico-químicas dos substratos, organizados em duas misturas com diferentes relações S/I (substrato/inóculo), aqui chamadas de tratamentos A e B, para que posteriormente fossem submetidos a testes de BMP e análise técnica do aproveitamento térmico do biogás. Foi possível verificar que a geração de biogás aumentou de forma proporcional à adição de inóculo ao meio; neste caso, o Tratamento B, com a relação S/I igual a 1:5 foi o mais representativo em termos de volume de biogás gerado, 42.25 NmL.gsv⁻¹. Porém, apesar da maior geração de biogás dentre os cenários avaliados, o baixo teor de metano deste tratamento (23.1%) evidencia a baixa biodegradabilidade dos substratos aqui estudados. Adicionalmente a estes resultados, em uma análise posterior e para o cenário avaliado, verificou-se a inviabilidade do aproveitamento energético do biogás, pois o potencial energético possível de ser obtido representou apenas 1% da demanda energética da unidade industrial avaliada.

Palavras chave: biomassa, digestão anaeróbica, energias renováveis, valorização de resíduos industriais.

Introdução

No processamento da erva-mate, são geradas quantidades significativas de resíduos, os quais são geralmente destinados para a agricultura (para uso como adubo) (Gonçalves *et al.*, 2007) ou mesmo queimados em caldeiras, como combustível alternativo. Visando ao atendimento de metas ambientais e econômicas cada vez mais restritivas e/ou exigentes, surge a necessidade de se buscar novas tecnologias de tratamento para resíduos desta natureza, já que as metodologias mais difundidas atualmente (compostagem ou disposição em aterros sanitários) são onerosas ou, ainda, podem não atender de forma satisfatória aos padrões ambientais de disposição final.

Diferentes compostos orgânicos, como resíduos alimentares e dejetos de animais vêm sendo muito utilizados como substrato para a digestão anaeróbica. Além disso, a biomassa lignocelulósica proveniente de resíduos florestais e agrícolas (palha de trigo, palha de milho e a própria erva-mate) também tem se destacado como importante substrato para a digestão anaeróbica, dado o seu elevado potencial energético (Ge *et al.*, 2016; Liew *et al.*, 2012; Zheng *et al.*, 2014).

A digestão anaeróbia é o processo que possibilita a conversão biológica da maioria dos resíduos orgânicos na ausência de oxigênio. A biodigestão acontece principalmente em quatro fases distintas, hidrólise, acidogênese, acetogênese e metanogênese, pela ação de *archae* metanogênicas que propiciam a degradação da matéria orgânica. Um dos produtos da digestão anaeróbia é o biogás, uma mistura de gases que apresenta alto poder energético (Aryal *et al.*, 2018; Gonzalez-Fernandez *et al.*, 2015; USEPA, 2013). O biogás apresenta variações em sua

composição, mas, em geral, é constituído por metano (CH₄, 60% v/v), dióxido de carbono (CO₂, 40% v/v) e outros componentes em nível de traço como o sulfeto de hidrogênio (H₂S), oxigênio (O₂), nitrogênio (N₂), monóxido de carbono (CO) e água (H₂O) (Cioabla *et al.*, 2012).

Para a avaliar a produção de biogás, o potencial bioquímico de metano (BMP) e a quantidade de substrato disponível devem ser considerados (Deublein e Steinhauser, 2008). O teste BMP é um ensaio de duração relativamente curto, que tem a finalidade de avaliar o potencial metanogênico e a respectiva degradação dos substratos. O tempo de biodigestão vai depender, por exemplo, do tipo de substrato (e seu grau de biodegradabilidade) e das condições do processo (pH, relação carbono/nitrogênio, temperatura, teor de sólidos voláteis, etc.). O pH é um dos principais fatores que influenciam a geração de biogás. Weiland (2010) relata que a faixa de pH mais favorável à geração de metano é de 6.5 a 8.5; porém, o intervalo ideal é entre 7.0 e 8.0. Outro importante parâmetro para avaliar a estabilidade da digestão anaeróbia é a relação dos macronutrientes Carbono/Nitrogênio (C/N).

Para favorecer a biodigestão de um substrato, a relação C/N deve estar na faixa entre 25 e 35:1. Quando a relação é considerada “pobre” (menor que 25:1) devem ser adicionados materiais ricos em carbono, por outro lado, para relações “ricas” (valores maiores que 35:1) deve-se optar por adicionar substratos ricos em nitrogênio (Hernández e López, 2016). A análise de sólidos voláteis, por sua vez, também pode ser utilizada para determinar a biodegradabilidade de um resíduo (Bayard *et al.*, 2015); para esta análise, valores superiores a 70% são considerados altos e, na maioria das vezes, implicam em um maior potencial de geração de biogás de determinado substrato (Diesel *et al.*, 2002). A literatura tem reportado que a quase totalidade do metano gerado a partir de resíduos facilmente digeríveis dá-se em poucos dias de biodigestão (como resíduos alimentares e fração orgânica de resíduos sólidos urbanos, por exemplo) (Browne e Murphy, 2013; Schirmer *et al.*, 2014; Santos Filho *et al.*, 2020). As principais vantagens do teste BMP são simplicidade no desenvolvimento do ensaio, baixo custo, rapidez e precisão na obtenção de resultados (Kelly *et al.*, 2006; Labatut *et al.*, 2011).

Quando o biogás apresenta alta concentração de metano, o mesmo é utilizado como fonte de energia para diferentes processos. Cabe salientar que o uso de combustíveis renováveis contribui para a mitigação de poluentes atmosféricos e gases de efeito estufa (GEE) emitidos durante a combustão de derivados do petróleo. O Brasil é um dos países signatários da 21^a Conferência das Partes (COP-21); no acordo, o país comprometeu-se em reduzir 43% das emissões de GEE até 2030, adequando sua matriz energética a fim de que ela seja constituída por 45% de fontes renováveis (Brasil, 2015). A própria Política Nacional de Biocombustíveis (RenovaBio), lançada pelo Governo Federal em 2017, busca promover a produção de todos os tipos de biocombustíveis, para contribuir com as metas de descarbonização de modo a estabelecer uma matriz energética mais eficiente e limpa (Brasil, 2017).

A literatura tem reportado estudos sobre a utilização de resíduos da erva-mate para diferentes fins. Bortoluzzi (2019), por exemplo, avaliou as características energéticas de briquetes produzidos a partir destes resíduos. Cunha *et al.* (2019) analisaram a utilização destes materiais para produção de painéis de partículas. Sogari e Busso (2012) estudaram a digestão anaeróbia de resíduos alimentares com alto teor de resíduos de erva mate (60% v/v). O experimento foi conduzido em reatores de 7 L durante 50 dias em temperatura ambiente (25 a 30°C). A partir do 25º dia de experimentação, as amostras começaram a cessar a produção de biogás. Os autores obtiveram uma produção de metano de 2,64 NL_{CH₄}.kg_{sv}⁻¹ adicionado para a amostra com maior teor de resíduos de erva-mate e concluíram que há necessidade de alternativas técnicas que otimizem a digestibilidade do substrato e viabilizem o uso deste resíduo lignocelulósico no processo de digestão anaeróbia. Nesse sentido, Ferraz Jr. *et al.* (2020) estudaram o potencial de produção de biogás a partir deste substrato, com foco no pré-tratamento desse resíduo e sua influência na otimização da metanização da biomassa; os autores conduziram o experimento em batelada, utilizando reatores de 500 mL incubados em temperatura mesofílica (37°C). Os reatores receberam inóculo mesófilico aclimatado na razão substrato:inoculo de 0,5, totalizando uma carga orgânica de 10g_{sv}.L⁻¹. A produção de biogás cessou em 60 dias, apresentando como resultado uma produção acumulada de metano de 94 NL_{CH₄}.kg_{sv}⁻¹ adicionado. Além destes estudos (de Sogari e Busso e de Ferraz Jr. e colaboradores), importante ressaltar que não identificamos nenhum trabalho que, a exemplo do presente estudo, avaliou a co-digestão de resíduos de erva-mate *in natura* para verificar a sua viabilidade de uso em escala industrial.

Neste contexto, o presente trabalho se insere na proposta de valorização de resíduos orgânicos industriais, contribui para redução de emissões de gases de efeito estufa (GEE) e busca estudar o potencial de geração de biogás a partir da co-digestão de resíduos do processamento da erva-mate.

Metodologia

Caracterização dos substratos

Os substratos utilizados no presente estudo (pó-verde, borra, fibras da torração e efluente líquido do processamento de erva-mate) foram coletados na empresa, localizada no Estado do Paraná (Brasil). A unidade realiza o processamento da erva-mate e a posterior produção de bebidas derivadas da erva. O pó-verde é um subproduto resultante da padronização do corte das folhas; as fibras da torração são resíduos sólidos oriundos do processo de torrefação da erva-mate; já a borra é o resíduo da extração no processo produtivo (Figura 1). Esses resíduos são orgânicos e atualmente são utilizados como adubo em uma propriedade rural; já o subproduto é vendido ao mercado por um preço “simbólico” para produção de chimarrão. Dados da empresa de 2019 indicam uma geração de 363.410 kg de resíduos sólidos, o equivalente a pouco menos de 3% do total da erva-mate produzida nesse período.

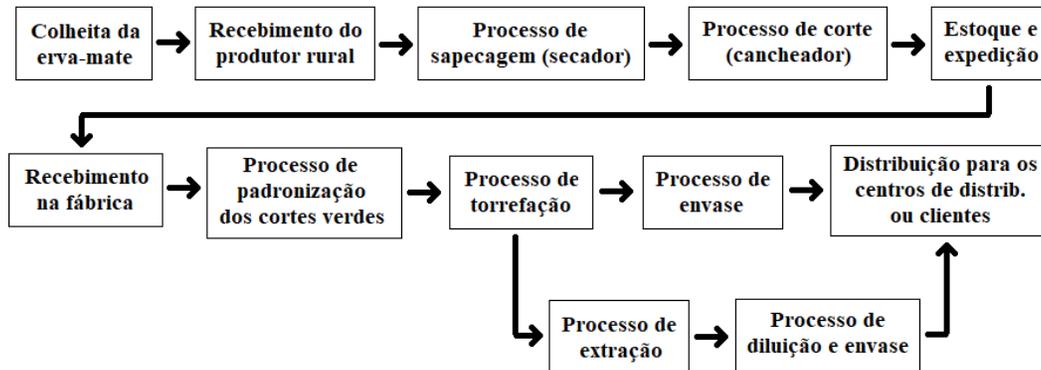


Figura 1. Fluxograma do processo de produção de erva-mate da empresa avaliada.

Fonte: Os autores.

Neste estudo, foram avaliados diferentes tratamentos dos substratos sólidos buscando identificar a melhor combinação em termos de potencial de geração de biogás. Neste contexto, os ensaios compreenderam as seguintes misturas de substratos: mistura (A) pó-verde + borra + fibras da torração + efluente líquido; mistura (B) pó-verde + borra + efluente líquido. O efluente líquido (efluente residual e sem valor comercial, destinado à estação de tratamento da indústria) foi utilizado para a padronização da umidade dos ensaios, mantida em $\approx 90\%$. Segundo Yuan *et al.* (2014), resíduos com elevados teores de umidade apresentam características mais favoráveis à biodigestão, implicando em uma maior geração de biogás.

De modo a relacionar a produção de biogás com as características dos substratos e suas misturas, foram realizadas análises de umidade, pH, sólidos totais (ST), sólidos voláteis (SV) de acordo com o Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (APHA, 2005) em todos os tratamentos antes e após a biodigestão (ensaios em regime de batelada). A análise de sólidos voláteis visa à determinação da presença de matéria orgânica biodegradável em um resíduo; complementarmente à análise de SV, buscando ratificar a biodegradabilidade do substrato, foi analisada a razão holocelulose/lignina de acordo com a metodologia descrita em Alves (2008). Além disso, foram determinados ainda os teores de Carbono Orgânico Total (COT) por meio do método volumétrico do dicromato de potássio e Nitrogênio Total (NT) utilizando o micrométodo de liga de Raney, ambos os procedimentos são considerados pelo Ministério da Agricultura como os mais adequados para determinação de COT e NT (Brasil, 2014).

Deve-se ressaltar que os autores optaram por não realizar um pré-tratamento para facilitar a biodigestão, de modo a verificar como os resíduos se comportariam em condições mais próximas à realidade do dia-a-dia operacional da empresa geradora dos substratos avaliados.

Teste BMP e monitoramento do bioqás

O BMP é um teste de biodegradabilidade do resíduo e consiste em utilizar reatores em escala de bancada em regime de batelada com uma pequena parcela do substrato sob condições controladas de temperatura, acompanhado de um inóculo rico em microrganismos anaeróbicos. O resultado é comumente expresso pela razão entre o volume de bioqás gerado (ou metano) e a quantidade de matéria orgânica adicionada ao reator (Owen *et al.*, 1979; Steinmetz *et al.*, 2016). Como biodigestores, utilizou-se frascos de borossilicato com volume total de 250 mL, dotados de tampas confeccionadas em nylon com manômetros para monitoramento e válvulas para descarga e coleta de bioqás (Figura 2).

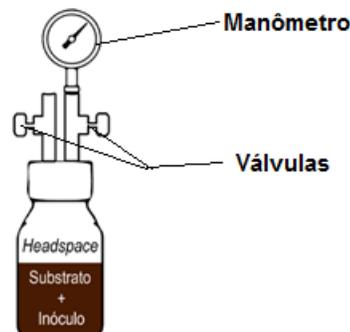


Figura 2. Esquema simplificado do reator utilizado no teste BMP.

Fonte: Os autores.

As misturas A e B foram avaliadas em diferentes proporções com o inóculo (relação substrato/inóculo em massa de sólidos voláteis): 5 g_{sv}:1 g_{sv}, 1 g_{sv}:1 g_{sv} e 1 g_{sv}:5 g_{sv}, todos em triplicata. Como inóculo, foi utilizado lodo coletado em reator UASB da estação de tratamento de efluentes domésticos da cidade de Irati-PR. O volume total de cada tratamento (misturas A e B com inóculos), foram preenchidos conforme mostra a tabela 1. Foram ainda adotados “brancos”, ou seja, frascos também em triplicata contendo apenas 100 mL de inóculo sem nenhum substrato, de modo a se obter a produção líquida de bioqás para cada mistura ao final do processo de biodigestão.

Tabela 1. Volume das misturas e inóculo para os tratamentos A e B

Tratamento	A		B	
	Mistura A (mL)	Inóculo (mL)	Mistura B (mL)	Inóculo (mL)
S/I 5:1	104	4	104	2
S/I 1:1	130	18	130	9
S/I 1:5	104	60	104	30

Antes da incubação, uma corrente de N_2 foi recirculada no headspace dos frascos durante 3 minutos de modo a manter a anaerobiose do sistema. Uma vez selados, os reatores foram incubados em um equipamento de banho-maria (QUIMIS®), sob temperatura constante de $37^\circ C$ durante todo o período de biodigestão (30 dias para cada tratamento, suas triplicatas e respectivos brancos), conforme a Figura 3. O biogás foi monitorado diariamente, com o objetivo de mensurar a geração de biogás. As variáveis controladas durante o período de incubação foram pressão manométrica e pressão atmosférica local, utilizando dados do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). A partir dessas informações, a pressão manométrica dos reatores foi convertida em volume de biogás gerado (acumulado no “headspace”) nas condições normais de temperatura e pressão (CNTP).



Figura 3. Reatores incubados em banho-maria.

Fonte: Os autores.

O biogás gerado em cada reator foi coletado com o auxílio de uma seringa de 60 mL e transferido para um analisador portátil de gases (*Columbus Instruments*®) para a determinação da concentração de metano em cada tratamento. Os dados obtidos nesta etapa foram necessários para a determinação do potencial energético do biogás gerado a partir de cada tratamento.

Análise do Potencial Térmico do Bio gás

O biogás proveniente do processo de biodigestão pode ser aproveitado na forma de energia térmica de duas formas: a partir do aproveitamento da perda de calor dos geradores (cogeração) ou através da sua queima direta (Bley Junior, 2015). Quando rico em metano, o biogás pode ser utilizado para substituir parcialmente os combustíveis de origem fóssil (Oliveira, 2004), como o

gás liquefeito de petróleo (GLP), gás natural (GNV), cavaco, etc., comumente utilizados na geração de energia no meio industrial. No presente estudo, o GLP é o combustível atualmente utilizado na geração de calor em caldeira durante o processamento da erva-mate; entretanto devido ao seu elevado custo e consumo, é necessário analisar alternativas para substituição deste combustível por outros de menor custo e, se possível, de origem renovável.

Para realizar uma análise técnica do aproveitamento de biogás produzido a partir da digestão anaeróbia dos resíduos gerados anualmente no processamento da erva-mate, utilizou-se as melhores condições identificadas durante os ensaios laboratoriais. A partir desses dados, foi realizada a estimativa do volume de biogás gerado anualmente a partir dos resíduos da empresa (Equação 1) (Kunz e Oliveira, 2006).

$$V_{\text{anual}} = P_{\text{BMP}} * SV * Q_{\text{anual}} \quad \text{Equação (1)}$$

Onde

V_{anual} : volume anual de biogás possível de ser gerado a partir das melhores condições identificadas no teste BMP ($\text{m}^3 \cdot \text{ano}^{-1}$)

P_{BMP} : maior potencial de geração de biogás entre os tratamentos analisados nos testes BMP ($\text{m}^3 \cdot \text{ton}_{\text{sv}}^{-1}$)

SV : concentração de sólidos voláteis do tratamento com maior potencial de geração de biogás identificado a partir do teste BMP

Q_{anual} : produção anual dos resíduos presentes no tratamento com maior potencial de geração de biogás ($\text{ton} \cdot \text{ano}^{-1}$).

A Equação 2, adaptada de Brasil (2013), foi utilizada para quantificar o potencial de energia instalada, ou seja, a quantidade máxima de energia que pode ser obtida por meio do biogás gerado a partir da biodigestão de resíduos do processamento da erva-mate.

$$E = PCI * \rho * V_{\text{anual}} \quad \text{Equação (2)}$$

Onde

E : potencial energético instalado (MJ)

PCI : poder calorífico inferior ($\text{MJ} \cdot \text{Kg}_{\text{biogás}}^{-1}$, calculado a partir da NBR 15.213)

ρ : densidade do biogás ($\text{Kg} \cdot \text{m}^{-3}$, calculada a partir da NBR 15.213)

V_{anual} : volume anual de biogás possível de ser gerado a partir das melhores condições identificadas no teste BMP ($\text{m}^3 \cdot \text{ano}^{-1}$).

O valor do potencial energético instalado foi comparado à quantidade de energia que é atualmente utilizada a partir do GLP. A partir desta comparação, foi possível verificar se o volume de biogás gerado anualmente é suficiente para suprir a demanda energética da empresa e, assim, substituir o GLP.

Posteriormente, para complementar a avaliação da intercambialidade do biogás gerado a partir da digestão anaeróbia dos resíduos da erva-mate e o GLP, atualmente utilizado no processamento industrial, foram determinados os parâmetros poder calorífico superior e índice de Wobbe,

através da metodologia estabelecida pela NBR 15213 (ABNT, 2008), que normatiza a determinação destas propriedades dos combustíveis gasosos. Esta é uma análise importante uma vez que, o índice de Wobbe representa o potencial de aquecimento de um gás e indica a intercambialidade entre gases (Sandfort *et al.*, 2017), enquanto o poder calorífico superior, é o total de energia liberada como calor após a combustão completa do gás (ABNT, 2008), ou seja, quanto maior o valor do poder calorífico maior será o potencial de utilização de um gás como combustível.

Resultados e discussão

Caracterização físico-química dos resíduos(substratos)

A Tabela 2 apresenta os valores da caracterização físico-química dos substratos (individuais) utilizados neste estudo. Os baixos teores de sólidos voláteis apresentados na Tabela 2 podem ser explicados pelo fato de que, mesmo se tratando de resíduos orgânicos, os mesmos são resultado de intenso processamento industrial, ou seja, podem ter sido submetidos a etapas da industrialização que implicam na redução de matéria orgânica da biomassa remanescente. Ainda assim, apesar de serem reduzidos, os valores de sólidos voláteis sugerem que ainda há matéria orgânica disponível para biodigestão, uma vez que um resíduo só pode ser considerado estável quando apresenta teor de sólidos voláteis entre 10 a 17,4% (Decottignies *et al.*, 2005).

Tabela 2. Caracterização físico-química dos resíduos e inóculo.

Parâmetro	Pó verde	Borra	Fibras Torração	Efluente líquido
Umidade (%)	9.1	62.7	2	-
Ph	5.93 *	5.88 *	6.96 *	6.8
Sólidos Voláteis (%)	29.34	22.85	24.63	0

* Dados fornecidos pela empresa.

Caracterização físico-química das misturas pré e pós biodigestão

A tabela 3 apresenta a caracterização físico-química inicial e final dos biodigestores para os diferentes tratamentos (misturas A e B com inóculo) nas três proporções (razão S/I - substrato/inóculo) avaliadas. Vê-se que todos ensaios possuíam pH próximo à neutralidade antes do início da incubação. Durante a biodigestão, na etapa de acidogênese, são formados ácidos que reduzem o pH do tratamento (Weiland, 2010); contudo, durante as fases posteriores do processo, o excesso de ácido é consumido e o pH é reestabelecido próximo à neutralidade (Deublein e Steinhauser, 2008). Com exceção do tratamento B 1:5, esse comportamento, de fato, pode ser observado nos valores iniciais e finais de pH dos biodigestores contendo apenas inóculo. Por outro lado, considerando a natureza lignocelulósica dos resíduos utilizados nos tratamentos A e B, é provável que o tempo adotado para os ensaios (30 dias) não foi suficiente para contemplar

todas as etapas da digestão, o que impossibilitou a neutralização completa dos ácidos formados nas fases iniciais do processo. Dada a difícil degradação de resíduos lignocelulósicos, deve-se adotar um tempo maior para que a digestão ocorra de forma adequada (Pohl *et al.*, 2013) e o pH seja reestabelecido à neutralidade. Destaca-se que o objetivo do presente trabalho não foi otimizar os tempos de biodegradação em escala laboratorial, mas sim verificar a viabilidade de digerir este substrato *in natura* em escala industrial, portanto, não foram testados tempos maiores de digestão.

Tabela 3. Caracterização inicial e final dos biodigestores para todos os ensaios

Proporção	S/I 5:1					
	Pré-Ensaio			Pós-Ensaio		
	Trat. A	Trat. B	Inóculo	Trat. A	Trat. B	Inóculo
Umidade (%)	89.1	90.4	88.9	89.5	90.7	91.0
Ph	6.5	6.7	6.5	5.5	5.5	7.3
Sólidos Voláteis (%)	73	73	52	73	72	49
Proporção	S/I 1:1					
	Pré-Ensaio			Pós-Ensaio		
	Trat. A	Trat. B	Inóculo	Trat. A	Trat. B	Inóculo
Umidade (%)	89.4	90.1	89.1	90.1	91.1	92.1
Ph	6.5	6.6	6.7	5.7	5.5	7.0
Sólidos Voláteis (%)	78	79	50	76	77	49
Proporção	S/I 1:5					
	Pré-Ensaio			Pós-Ensaio		
	Trat. A	Trat. B	Inóculo	Trat. A	Trat. B	Inóculo
Umidade (%)	89.3	90.2	92.1	92.1	91.1	89.6
Ph	6.8	6.9	6.6	5.8	5.6	8.5
Sólidos Voláteis(%)	84	87	49	67.7	75.1	43.1

Em relação à razão C/N, no presente estudo, os valores obtidos nesta análise foram de 27:1 e 40:1 para as misturas A e B, respectivamente. Reffatti *et al.* (2006), ao analisarem resíduos de erva-mate (folhas e caule) reportam valores semelhantes aos encontrados no presente estudo; os autores ainda destacam que estes substratos apresentam uma relação C/N rica, situada no intervalo de 28 a 50:1. Considerando os elevados teores de carbono nos resíduos do processamento da erva-mate, pode-se afirmar que a mistura destes resíduos com lodo de esgoto é positiva para o balanceamento dos macronutrientes da digestão anaeróbia, pois o lodo de esgoto, utilizado como inóculo nos tratamentos A e B, é um substrato rico em nitrogênio com relação C/N de 6:1 (Deublein e Steinhauser, 2008).

A análise de sólidos voláteis é um importante parâmetro na avaliação da biodegradabilidade de um resíduo. Porém, é importante ressaltar que embora os ensaios de sólidos voláteis sejam utilizados, muitas vezes, para determinar a biodegradabilidade de um resíduo, esta avaliação não pode ser generalizada para todos os tipos de substratos, pois ela não considera a natureza recalcitrante de alguns compostos em condições anaeróbias (Rodriguez *et al.*, 2005). Os valores de sólidos voláteis obtidos no presente estudo apresentados na Tabela 3 são similares àqueles obtidos por Silva *et al.* (2017) que, ao analisarem amostras de erva-mate, reportam teores de sólidos voláteis próximos a 80%; neste caso, estes valores correspondem às porções de baixa biodegradabilidade do substrato formadas principalmente por lignina e celulose. Um exemplo de resíduos com baixa biodegradabilidade são os lignocelulosócos, constituídos principalmente de lignina, celulose e hemicelulose (Cheng e Liu, 2010; Zheng *et al.*, 2014), como é o caso dos resíduos aqui estudados. Deste modo, é necessário buscar outros métodos complementares aos sólidos voláteis para avaliar de forma mais precisa a biodegradabilidade deste substrato. Segundo Achour (2008), o potencial de biodegradação de um substrato pode ser determinado por meio da relação Holocelulose/Lignina (H:L). Os resultados das análises de Holocelulose (Celulose + Hemi-Celulose) e Lignina realizadas para os tratamentos A e B, bem como a respectiva relação H:L estão dispostos na tabela 4.

Tabela 4. Análise de Holocelulose e Lignina para os tratamentos A e B

Parâmetro	Tratamento A	Tratamento B
Holocelulose (%)	51.03	48.07
Lignina (%)	36.43	29.31
H:L	1.4	1.64

Caracterizando amostras de resíduo do processo produtivo de bebidas à base de erva mate, Sozim *et al.* (2011) encontraram valores semelhantes aos obtidos no presente estudo (48.42% e 41.94%, para holocelulose e lignina, respectivamente). A relação H:L apresenta valores mais altos quando o analito possui maior concentração de substâncias facilmente biodegradáveis, ou seja, quanto maior for a relação H:L mais alta será a geração de biogás (Alves, 2008). Wang *et al.* (1997) utilizaram a relação H:L para analisar o grau de estabilidade de resíduos alimentares, reportando valores de 5,86 antes dos substratos serem biodigeridos, e 0.57 após estabilizados.

Considerando que no presente estudo, a análise dos parâmetros de Holocelulose e Lignina foram realizadas antes da biodigestão dos tratamentos, pode se afirmar que os valores da relação H:L apresentados na tabela 4 ratificam a baixa biodegradabilidade dos tratamentos analisados, pois mesmo antes de serem biodigeridos, já possuem valores próximos aos considerados como estabilizados por Wang *et al.* (1997).

Geração de biogás resultados quantitativos e qualitativos

Na Figura 4 estão apresentadas as curvas de geração diária líquida de biogás (desprezando os valores de geração de biogás a partir do inóculo) para os dois tratamentos (A e B), dentro do período de 30 dias do ensaio.

A geração líquida diária máxima foi igual a $5.04 \text{ NmL.gsv}^{-1}$ e $12.32 \text{ NmL.gsv}^{-1}$, para os tratamentos A e B, respectivamente. Pela figura 4 é possível observar que em todos os ensaios, os tratamentos apresentaram maior volume de geração de biogás nos primeiros dias de digestão; após o quinto dia de incubação, a geração diária de biogás caiu consideravelmente para todos os ensaios. De fato, segundo Cremonez (2015), é nos primeiros dias da biodigestão em que ocorre a degradação de forma rápida dos compostos com maior biodegradabilidade; a reação desacelera quando começa a ser degradada a parcela do substrato que contém celulose e hemicelulose.

A Figura 5 apresenta o volume acumulado líquido de biogás (em NmL.gsv^{-1}) para cada tratamento analisado nos 30 dias de seus respectivos ensaios. Vê-se que os maiores potenciais de geração de biogás para o Tratamento A foi de $14.25 \text{ NmL.gsv}^{-1}$, e de $42.25 \text{ NmL.gsv}^{-1}$ para o Tratamento B, ambos na proporção S/I de 1/5. Segundo Angelidaki *et al.* (2009), a relação substrato/inóculo deve ser estudada caso a caso, pois, a razão ideal para cada substrato depende da biodegradabilidade do resíduo e concentração do inóculo. Deste modo, destaca-se que nem sempre uma maior concentração de inóculo resultará em um aumento na geração de biogás (Neves *et al.*, 2004).

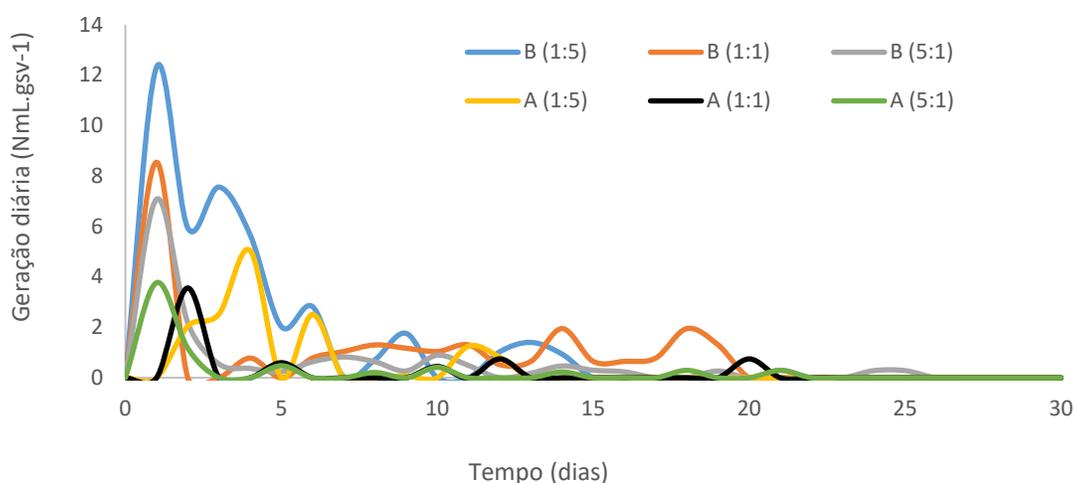


Figura 4. Geração diária líquida média para cada tratamento
Fonte: Os autores.

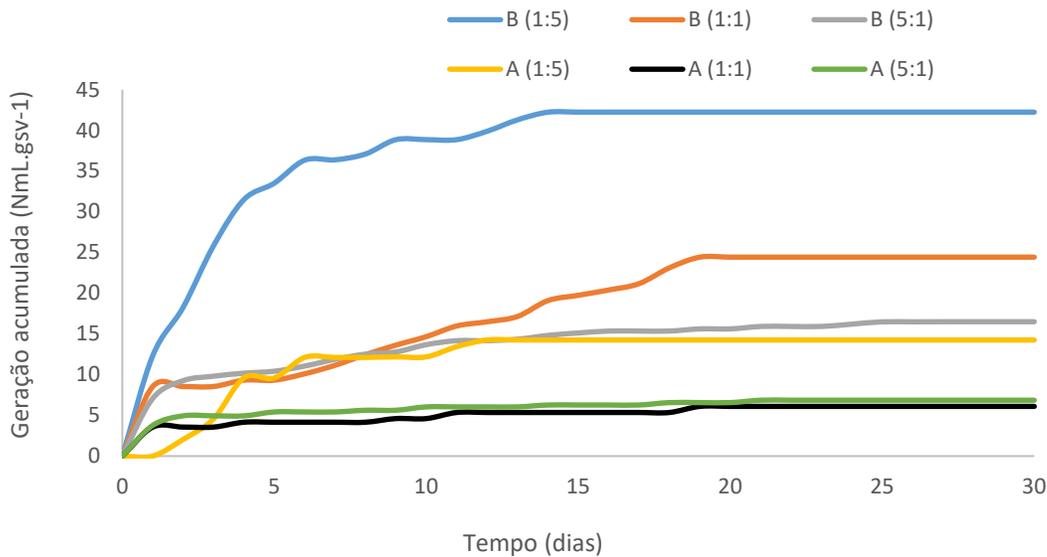


Figura 5. Geração acumulada líquida média em cada tratamento

Fonte: Os autores.

Quando comparado a outros estudos, o potencial de produção de biogás dos substratos aqui estudados (e nas condições adotadas no presente trabalho) é considerado baixo. Souza *et al.* (2010), por exemplo, avaliaram o potencial de produção de biogás a partir de biomassas lignocelulósicas provenientes da bananicultura, reportando uma geração acumulada de biogás de 244 NmL.gsv^{-1} em 35 dias de ensaio; valores substancialmente superiores aos encontrados no presente estudo. O diferencial do estudo feito por Souza *et al.* (2010) com relação a este trabalho, é o emprego de um pré-tratamento (hidrólise) buscando facilitar a geração do biogás. Tal procedimento prévio é bastante difundido na literatura, porém, não foi aqui empregado, a fim de analisar a viabilidade da produzir de biogás a partir do uso *in natura* do substrato estudado. Numa breve comparação com outros resíduos industriais, destaca-se o estudo realizado por Caillet e Adelard (2019), que teve como objetivo analisar o potencial metanogênico da vinhaça, resíduo do processamento da cana de açúcar. Os autores reportaram um potencial de geração de metano igual a $322.95 \text{ NmLCH}_4.\text{gsv}^{-1}$ após 50 dias de ensaio, novamente, valor muito superior ao obtido no presente estudo levando em consideração ainda que o teor de metano determinado por Caillet e Adelard (2019) foi de 65 %.

A Figura 6 expressa os teores de CH_4 e CO_2 obtidos de todos os ensaios. As análises foram realizadas no primeiro, décimo quinto e no último dia de incubação, uma vez que a determinação da composição do biogás das amostras dependia do acúmulo de biogás nos biodigestores.

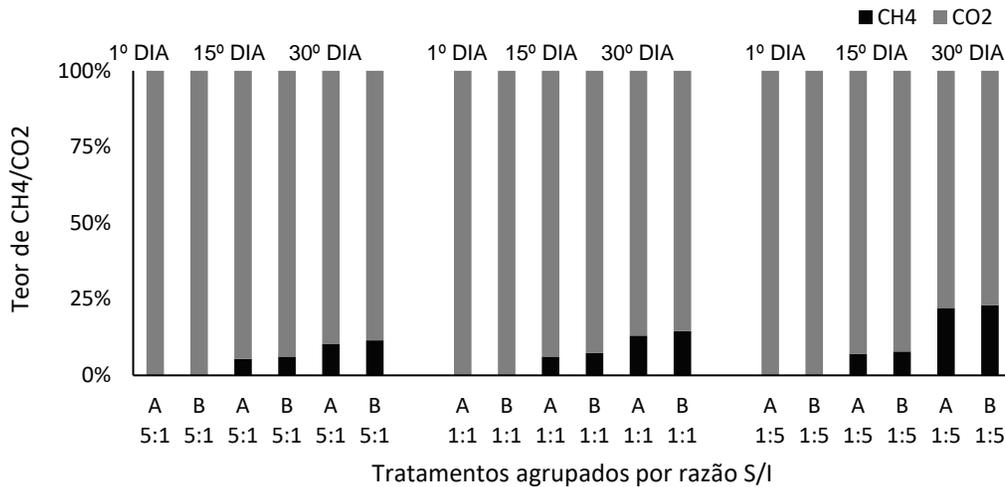


Figura 6. Teores de CH₄ e CO₂ durante os ensaios.

Fonte: Os autores.

A partir da figura 6, é possível verificar que o ensaio com maior teor de metano corresponde à relação substrato/inoculo igual a 1:5, tanto para o tratamento A (22%) como para o tratamento B (23%). Deste modo, é possível afirmar que mesmo nas melhores condições, o biogás estudado no presente estudo apresentou baixo teor de metano, pois, na maioria dos casos, sua concentração no biogás é de aproximadamente 60% (Cioabla *et al.*, 2012). Deve-se destacar que a reduzida concentração de metano no biogás está relacionada à baixa biodegradabilidade dos resíduos lignocelulósicos aqui estudados, fato que está ligado à natureza recalcitrante de compostos como a lignina (Cremones *et al.*, 2013). Além disso, observando a Figura 6, é possível perceber o aumento na concentração de metano ao longo dos ensaios. Souza *et al.* (2010) ao analisar a geração de metano a partir de resíduos lignocelulósicos, reportam que o acréscimo no teor de metano ao decorrer do tempo se deve ao período de adaptação do inóculo ao substrato utilizado.

Análise técnica de aproveitamento térmico do biogás

Para a análise técnica da viabilidade de substituição do GLP pelo biogás gerado a partir da digestão anaeróbica dos resíduos do processamento da erva-mate, foram considerados os valores de geração anual de resíduos, concentração de sólidos voláteis, potencial de produção de biogás e concentração de metano, referentes ao tratamento B com a relação S/I igual 1:5, pois este foi o ensaio que apresentou maior potencial de geração de biogás.

Deste modo, considerando que a geração anual dos resíduos que compõem o tratamento B é de aproximadamente 3,1 mil toneladas por ano (dado fornecido pela empresa), estimou-se que o volume anual de biogás passível de ser gerado a partir destes substratos é de 5.12 mil m³ por ano. Adicionalmente, utilizando o teor de metano presente no biogás aqui estudado, foram determinados por meio da NBR 15.213, os valores de densidade 1.56 Kg_{biogás}.m_{biogás}⁻³ e PCI 4.94 MJ.Kg_{biogás}⁻¹. A partir destes parâmetros, foi possível verificar que o potencial energético instalado no empreendimento é de aproximadamente 39.6 mil MJ.ano⁻¹, ou seja, este é o valor máximo de energia térmica possível de ser obtida a partir do volume anual de biogás estimado anteriormente. Quando comparado à atual demanda energética da empresa, 3.8 milhões de MJ.ano⁻¹ (dado fornecido pela empresa), vê-se que o potencial energético instalado representa apenas 1% da demanda energética total do empreendimento, valores este que evidenciam a inviabilidade do biogás substituir o GLP neste processo produtivo e para o cenário avaliado.

Complementarmente à esta análise, foram observados outros parâmetros do biogás, já que a sua utilização em queima direta é menos restritiva com relação aos seus parâmetros qualitativos quando comparada a outros usos mais nobres (como a conversão do biogás para biometano para geração de energia elétrica). No Brasil, os requisitos mínimos para classificação do biogás como biometano são definidos pela Resolução da Agência Nacional de Petróleo nº 8, de 2015, onde constam os teores máximos e mínimos para algumas variáveis como CH₄ (%), CO₂ (%), Poder Calorífico Superior (kJ/m³) e índice de Wobbe (kJ/m³) (ANP, 2015). Nesta resolução, o teor mínimo de CH₄ requerido é de 90% e o máximo de CO₂ é de 3 %, valores bastante distintos dos encontrados no presente estudo (para o metano as concentrações máximas foram de 22 e 23% nos tratamentos A e B, respectivamente, ambos na proporção S/I de 1:5). Já no caso da queima direta, o pré-requisito fundamental para utilização é que a qualidade do gás se mantenha constante e possua teor de metano superior a 50 % (Probiogás, 2016). Deste modo, é possível observar que, também em termos qualitativos, mesmo nas melhores condições do presente estudo, a utilização do biogás gerado a partir de resíduos da erva-mate fica sujeita à purificação para atender aos pré-requisitos de aproveitamento via queima direta.

A partir do teor de metano do tratamento B 1:5, também foi calculado o Índice de Wobbe, o que resultou em 7533.1 kJ/m³. Considerando que este valor é cerca de seis vezes menor do que os 46500 kJ/m³ correspondentes ao GLP, é evidente que o biogás gerado no presente estudo apresenta menor potencial energético que o atual combustível utilizado na empresa, o que, na prática, implicaria em uma baixa intercambialidade entre esses combustíveis (ANP, 2008; Sandfort *et al.*, 2017). Além disso, o Poder Calorífico Superior (PCS) calculado para o tratamento B 1:5 foi de 5482 kJ/m³, valor bem abaixo dos 35000 kJ/m³ referentes ao GLP (ANP, 2008). Deste modo, o baixo PCS indica que, para gerar quantidades equivalentes de energia em queima direta, seria consumido um volume muito maior de biogás do que de GLP (Lobato, 2011).

Considerações finais

O presente estudo teve como objetivo central avaliar o potencial de geração de biogás a partir da biodigestão anaeróbia de resíduos de uma indústria de processamento de erva-mate. A análise da razão holocelulose/lignina retratou de forma satisfatória a baixa biodegradabilidade dos substratos, fato este que pode ser evidenciado pela baixa geração de biogás para os dois tratamentos estudados; o Tratamento B possuiu o maior potencial de geração de biogás alcançando apenas 42.25 NmL.gsv⁻¹ em 30 dias de ensaio, com respectivo teor de metano de 23.1%.

As análises aqui realizadas ratificam a inviabilidade de substituir o GLP pelo biogás gerado a partir de resíduos do processamento da erva-mate. Deste modo, deve-se buscar soluções alternativas para disposição e tratamento destes resíduos, principalmente tecnologias de pré-tratamento da biomassa que favoreçam a biodigestão do substrato e que estejam dentro de um horizonte tecnicamente possível e economicamente viável. Além disso, segundo Sozim *et al.* (2011), outro método adequado para dispor estes substratos é a compostagem, pois estes resíduos apresentam alto teor de carbono e contribuem para o balanço de nutrientes no solo.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao Ministério da Educação no âmbito do Programa de Educação Tutorial pela bolsa de estudos concedida.

Referências bibliográficas

- ABNT, Associação Brasileira De Normas Técnicas. (2008) *NBR 15213: Gás natural e outros combustíveis gasosos - Cálculo do poder calorífico, densidade absoluta, densidade relativa e índice de Wobbe a partir da composição*. Rio de Janeiro (RJ), 45 pp.
- Achour, F. (2008) *Caractérisation de la matière organique dans les ordures ménagères. Recherche d'indicateurs de stabilité*. Tese de Doutorado. (Sciences de l'Environnement Industriel et Urbain) Universidade de Lyon, 173 pp.
- Alves, I.R.F.S. (2008) *Análise Experimental do Potencial de Geração de Biogás em Resíduos Sólidos Urbanos*. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Pernambuco, 2008, 118 pp.
- Angelidaki, I., Alves, M., Bolzonella, D., Borzacconi, L, Campos, J. L, Guwy, A.J., Kalyuzhnyi, S, Jenicek, P., van Lier, J. B. (2009) Defining the biomethane potential (BMP) of solid organic wastes and energy crops: a proposed protocol for batch assays. *Water Science and Technology*, **59**(5), 927–934.
- ANP, Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (2008) *Resolução ANP Nº 16, de 17 de junho de 2008*. Acesso: 26 jul. 2021, disponível em <https://atosoficiais.com.br/anp/resolucao-n-16-2008?origin=instituicao&q=16>
- ANP, Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (2015) *Resolução ANP nº 08, de 30 de janeiro de 2015*. Acesso: 26 jul. 2021, disponível em <https://www.in.gov.br/en/web/dou/-/resolucao-n-8-de-30-de-janeiro-de-2015-32367532>

- APHA, American Public Health Association. (2005) *Standard Methods For The Examination Of Water And Wastewater*, 21st Ed.: American Public Health Association, American Water Works Association, Water Environment Federation. Washington, DC.
- Aryal, N., Kvist, T., Ammam, F., Pant, D., Ottosen, L.D.M. (2018) An overview of microbial biogas enrichment. *Bioresource Technology*, 264(Sept.),359-369.
- Bayard, R., Gonzalez-Ramirez, L., Guendouz, J., Benbelkacem, H., Buffière, P., Gourdon, R. (2015) Statistical Analysis to Correlate Bio-physical and Chemical Characteristics of Organic Wastes and Digestates to Their Anaerobic Biodegradability. *Waste and Biomass Valorization*, 6(5),759–769.
- Bley Junior, C. (2015) *Biogás: A energia invisível*. 2ª ed., CIBIOGAS: São Paulo, 231 pp.
- Bortoluzzi, C. M. (2019) Propriedades Energéticas de Briquetes de Resíduos de Erva-mate (*Ilex paraguariensis*). *Revista Gestão & Sustentabilidade*, 1(1),149-161.
- Brasil (2017) *Lei nº 13.576, de 26 de dezembro de 2017 - Dispõe sobre a Política Nacional de Biocombustíveis (RenovaBio) e dá outras providências*. Presidência da República. Acesso em 07 abr. 2019, disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/ato2015-2018/2017/lei/l13576.htm
- Brasil (2015) *Pretendida contribuição nacionalmente determinada para consecução do objetivo da convenção-quadro das nações unidas sobre mudança do clima*. 2015. Acesso: 29 mar. 2019, disponível em: http://www.itamaraty.gov.br/images/ed_desenvsust/BRASIL-iNDC-portugues.pdf
- Brasil (2014) Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. *Manual de métodos analíticos oficiais para fertilizantes e corretivos*. Brasília, DF. 220 pp.
- Brasil (2013) *Guia Prático do Biogás: geração e utilização*, Ministério do Desenvolvimento Regional, Brasília, 2013. Acesso: 26 jul. 2021, disponível em: <https://antigo.mdr.gov.br/saneamento/proeesa/redes-de-aprendizagem/90-secretaria-nacional-de-saneamento/publicacoes-probiogas/1386-guia-pratico-do-biogas-geracao-e-utilizacao>
- Browne, J. D., Murphy, J. D. (2013) Assessment of the resource associated with biomethane from food waste, *Applied Energy*, 104(Apr.), 170-177.
- Caillet, H., Adelard, L. (2019) Start-up strategy and process performance of semi-continuous anaerobic digestion of raw sugarcane vinasse. In: *International Conference on Energy, Environment and Climate*, 20 pp.
- Cheng, X.-Y., Liu, C.-Z. (2010) Enhanced biogas production from herbal-extraction process residues by microwave-assisted alkaline pretreatment. *Journal of Chemical Technology & Biotechnology*, 85(1), 127–131.
- Cioabla, A., Ionel, I., Dumitrel, G.-A., Popescu, F. (2012) Comparative study on factors affecting anaerobic digestion of agricultural vegetal residues. *Biotechnology for Biofuels*, 5(1),1-9.
- Cremonez, P. A. (2015) *Digestão anaeróbia de polímero orgânico a base de fécula de mandioca*. Dissertação de mestrado, Programa de Engenharia de Energia na Agricultura, Universidade Estadual do Oeste do Paraná. 93 pp.
- Cremonez, P. A., Feiden, A, Zenatti, D. C., Camargo, M. P., Nadaleti, W. C., Rossi, E., Antonelli, J. (2013) Biodigestão anaeróbia no tratamento de resíduos lignocelulósicos. *Revista Brasileira de Energias Renováveis*, 2(4), 21-35.
- Cunha, A. B., Carvalho, C., Buss, R., Borges, D. W., Barnasky, R. R. S., Henne, R. A., Antunes, R. (2019) Potencial de utilização de resíduos do beneficiamento da erva mate (*Ilex paraguariensis*) na produção de painéis de partículas. *Scientia Forestalis*, 47(124), 724-732.
- Decottignies, V., Galtier, L., Lefebvre, X. and Villerio, T. (2005) Comparison of analytical methods to determine the stability of municipal solid waste and related wastes. In: *Proceedings Sardinia, Tenth International Waste Management and Landfill Symposium* Deublein, D., Steinhäuser, A. (2008) *Biogas from waste and renewable resources*. WILEY-VCH Verlag GmbH e Co. KGaA, 443 pp.
- Diesel, R., Miranda, C. R., Perdomo, C. C. (2002) Coletânea de tecnologias sobre dejetos suínos. *Boletim Informativo - BIPERS*, 10(14), 4-28.

- Ferraz Jr., A. D. N., Etchelet, M. I., Braga, A. F. M., Clavijo, L., Loaces, I., Noya, F., Etchebehere, C. (2020) Alkaline pretreatment of yerba mate (*Ilex paraguariensis*) waste for unlocking low-cost cellulosic biofuel. *Fuel*, **266**, 1-10.
- Ge, X., Xu, F., Li, Y., (2016) Solid-state anaerobic digestion of lignocellulosic biomass: Recent progress and perspectives. *Bioresource Technology*, **205**(Apr.), 239-249.
- Gonçalves, M., Guerreiro, M.C., Bianchi, M.L., Oliveira, L.C.A., Pereira, E.I., Dallago, R.M. (2007) Produção de carvão a partir de resíduo de erva-mate para a remoção de contaminantes orgânicos de meio aquoso. *Ciência e Agrotecnologia*, **31**(5), 1386–1391.
- Gonzalez-Fernandez, C., Sialve, B., Molinuevo-Salces, B. (2015) Anaerobic digestion of microalgal biomass: Challenges, opportunities and research needs. *Bioresource Technology*, **198**(Dec.), 896-906.
- Hernández, C. M. M., López, Y. G. (2016) Use of basic and specific pre-treatments for the biogas production. Revision and analysis. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, **25**(3), 81–92.
- Kelly, R. J., Shearer, B. D., Kim, J., Goldsmith, C.D., Hater, G.R., Novak, J.T. (2006) Relationships between analytical methods utilized as tools in the evaluation of landfill waste stability. *Waste Management*, **26**(12), 1349-1356.
- Kunz, A., Oliveira, P. A. V. (2006) Aproveitamento de dejetos de animais para geração de biogás. *Revista de Política Agrícola*, **15**(3), 28-35.
- Labatut, R. A., Angenent, L. T., Scott, N. R. (2011) Biochemical methane potential and biodegradability of complex organic substrates. *Bioresource Technology*, **102**(3), 2255–2264.
- Liew, L. N., Shi, J., Li, Y. (2012) Methane production from solid-state anaerobic digestion of lignocellulosic biomass. *Biomass and Bioenergy*, **46**, 125–132.
- Lobato, L. C. S. (2011) *Aproveitamento energético de biogás gerado em reatores UASB tratando esgoto doméstico*. Tese de Doutorado. Programa de Pós-graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos, Universidade Federal de Minas Gerais, 184 pp.
- Neves, L., Oliveira, R., Alves, M. M. (2004) Influence of inoculum activity on the bio-methanization of a kitchen waste under different waste/inoculum ratios. *Process Biochemistry*, **39**(12), 2019–2024.
- Oliveira, P. A. (2004) Tecnologias para o manejo de resíduos na produção de suínos: manual de boas práticas. *Embrapa Suínos e Aves*. 109 pp.
- Owen, W. F., Stuckey, D. C., Healy Jr. J. B., Young, L. Y., McCarty, P. L. (1979) Bioassay for monitoring biochemical methane potential and anaerobic toxicity. *Water Research*, **13**(6), 485-492.
- Pohl, M., Heeg, K., Mumme, J. (2013) Anaerobic digestion of wheat straw – Performance of continuous solid-state digestion. *Bioresource Technology*, **146**, 408–415.
- PROBIOGÁS (2016) *Conceitos para o licenciamento ambiental de usinas de biogás*. Ministério das Cidades, Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit GmbH GIZ, 151 pp.
- Reffatti, P. F., Lorenzetti, E., Rodrigues, M. B. (2006) Caracterização de resíduos de erva-mate - para produção axênica de cogumelos. *Synergismus Scientifica*, **01**(01), 92-98.
- Rodriguez, C., Hiligsmann, S., Ongena, M., Charlier, R., Thonart, P. (2005) Development of an enzymatic assay for the determination of cellulose bioavailability in municipal solid waste. *Biodegradation*, **16**(5), 415-422.
- Sandfort, V., Trabold, B. M., Abdolvand, A., Bolwien, C., Russell, P. S. J., Wöllenstein, J., Palzer, S. (2017) Monitoring the Wobbe Index of Natural Gas Using Fiber-Enhanced Raman Spectroscopy. *Sensors (Basel)*, **17**(12), 2714.
- Santos Filho, D. A., Oliveira, L. R. G., Penteado, M. C., Schirmer, W. N., Motta Sobrinho, M. A., Jucá, J. F. T. (2020) Energy sustainability of supply centers from the codigestion of organic waste. *Detritus Journal*, **09**, 76-82.
- Silva, L. L., Ribeiro, L. C. N., Santacruz, G., Arcaro, S., Alves, A. K., Bergmann, C.P. (2017) Glass foams produced from glass and yerba mate (*Ilex paraguayensis*) waste. *FME Transaction*, **46**(1), 70–79.
- Schirmer, W. N., Jucá, J. F. T., Schuler, A. R. P., Holanda, S., Jesus, L. L. (2014) Methane production in anaerobic digestion of organic waste from Recife (Brazil) Landfill: evaluation in refuse of different ages. *Brazilian Journal of Chemical Engineering*, **31**(02), 373-384.

- Sogari, N., Busso, A. (2012) Analisis de las propiedades físico químicas del biogás obtenido de la degradacion anaeróbica de residuos orgânicos. *Revista de la Asociación Argentina de Energias Renovables y Ambiente*, **2**(5), 17-21.
- Souza, O., Federizzi, M., Coelho, B., Wagner, T. M., Wisbeck, E. (2010) Biodegradação de resíduos lignocelulósicos gerados na bananicultura e sua valorização para a produção de biogás. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, **14**(4), 438-443.
- Sozim, R., Lombardi, K. C., Guiotoku, M., Maia, C. M. B. F. (2011) Caracterização e pirólise de resíduo de chá-mate tostado para obtenção de biocarvão. *Anais do IX Encontro Brasileiro de Substâncias Húmicas*. 4 pp.
- Steinmetz, R.L.R., Mezzari, M.P., da Silva, M.L.B, Kunz, A., Amaral, A.C., Tápparo, D.C., Soares, H.M. (2016) Enrichment and acclimation of an anaerobic mesophilic microorganism's inoculum for standardization of BMP assays. *Bioresource Technology*, **219**(November), 21–28.
- USEPA, United States Environmental Protection Agency (2013). Global Mitigation of Non-CO₂ Greenhouse gases: 2010-2030. Office of Atmospheric Programs, Washington (DC), EPA-430-R-13-011.
- Wang, Y. (1997) Methane potential of food waste and anaerobic toxicity of leachate produced during food waste decomposition. *Waste Management & Research*, **15**(2), 149–167.
- Weiland, P. (2010) Biogas production: current state and perspectives. *Applied Microbiology and Biotechnology*, **85**(4), 849-860.
- Yuan, H., Zhang, Y., Li, X., Meng, Y., Liu, C., Zou, D., Liu, Y. (2014) Effects of ammoniation pretreatment at low moisture content on anaerobic digestion performance of rice straw. *BioResources*, **9**(4), 6707–6718.
- Zheng, Y., Zhao, J., Xu, F., Li, Y. (2014) Pretreatment of lignocellulosic biomass for enhanced biogás production. *Progress in Energy and Combustion Science*, **42**(Jun.), 35-53.