

## PRÉ-TRATAMENTO TÉRMICO NA DIGESTÃO ANAERÓBIA DOS RESÍDUOS DE FRUTAS E VERDURAS

ISADORA EMANUELI DA ROSA BERNARDI<sup>1</sup>, MARIANNA CÂMARA GOMES<sup>2</sup>,  
EDUARDO LUIZ BULIGON<sup>3</sup>, MÔNICA SAROLLI SILVA DE  
MENDONÇA COSTA<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Graduanda em Eng. Agrícola, Depto. de Engenharia Agrícola, UNIOESTE, Cascavel – PR, isadora.bernardi@unioeste.br.

<sup>2</sup> Eng. Agrícola, Mestranda em Engenharia Agrícola, Depto. de Engenharia Agrícola, UNIOESTE, Cascavel – PR.

<sup>3</sup> Eng. Agrícola, Doutorando em Engenharia Agrícola, Depto. de Engenharia Agrícola, UNIOESTE, Cascavel – PR.

<sup>4</sup> Eng. Agrícola, Prof. Adjunta, Doutora, Depto. de Engenharia Agrícola, UNIOESTE, Cascavel – PR.

Apresentado no  
LI Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola - CONBEA 2022  
27 a 29 de outubro de 2022 - Pelotas - RS, Brasil

**RESUMO:** A valorização dos resíduos de frutas e verduras (RFV) por meio da digestão anaeróbia (DA) tem sido estudada, uma vez que possibilita o aproveitamento energético dos RFV, a destinação ambientalmente favorável, diminuindo os impactos que estes resíduos causam ao meio ambiente, e ainda, gera biogás e o biofertilizante. Contudo, a DA dos RFV tem ponto crítico na fase de hidrólise, acarretando queda no pH e baixa produção de biogás. Desta forma, o objetivo deste trabalho foi avaliar o pré-tratamento térmico como alternativa para minimizar os efeitos da fase de hidrólise do processo de DA dos RFV, bem como o limite do sistema com relação a carga orgânica aplicada. Foi utilizado um reator anaeróbio tubular, com volume útil de 60L, em temperatura mesofílica e 30 dias de tempo de retenção hidráulica. A estabilidade do reator foi monitorada por meio das análises de alcalinidade, acidez volátil, ácidos graxos voláteis e pH. O pré-tratamento térmico favorece a produção de metano na DA de RFV, com produção máxima de  $0,29 \text{ m}^3\text{CH}_4 \text{ kgSVd}^{-1}$  e baixo acúmulo de ácidos graxos voláteis.

**PALAVRAS-CHAVE:** aproveitamento energético, hidrólise, reator anaeróbio.

### THERMAL PRETREATMENT IN THE ANAEROBIC DIGESTION OF FRUIT AND VEGETABLE WASTES

**ABSTRACT:** The recovery of fruit and vegetable wastes (FVW) through anaerobic digestion (AD) has been studied, since it allows the energy recovery, the environmentally favorable destination, reducing its impacts on the environment, and it also generates biogas and biofertilizer. However, the AD of FVW has a critical point in the hydrolysis phase, causing a drop in pH and low biogas production. Thus, the objective of this work was to evaluate the thermal pretreatment as an alternative to minimize the effects of the FVW AD process, as well as the system limit with respect to the applied organic load. A tubular anaerobic reactor was used, with a useful volume of 60L, at mesophilic temperature and 30 days of hydraulic retention time. The stability of the reactor was monitored through the analysis of alkalinity, volatile acidity, volatile fatty acids and pH. The thermal pretreatment favors the methane production in the FVW AD, with maximum production of  $0.29 \text{ m}^3\text{CH}_4 \text{ kgVSD}^{-1}$  and low accumulation of volatile fatty acids.

**KEYWORDS:** energy recovery, hydrolysis, anaerobic reactor.

**INTRODUÇÃO:** A geração de resíduos sólidos urbanos (RSU) no Brasil, incluindo resíduos sólidos domiciliares e públicos, em 2020, foi 66,6 milhões de toneladas, cerca de 45,3% dos RSU são resíduos orgânicos, que podem ser estabilizados por meio da digestão anaeróbia (DA) e compostagem (ABRALPE, 2020; MINISTÉRIO DO DESENVOLVIMENTO REGIONAL, 2021). A fração orgânica dos RSU contém os resíduos de frutas e verduras (RFV), que possui características de putrescibilidade, alta biodegradabilidade e umidade, desse modo, a disposição final em aterros sanitários não é ambientalmente adequada, contribuindo para gases do efeito estufa, aumento da produção de lixiviado, diminuição do volume útil destes espaços, contaminação hídrica e geração de odores (BOUALLAGUI et al. 2004; GNAOUI et al., 2020). O processo biológico de digestão anaeróbia pode ser utilizado na estabilização dos RFV em reatores anaeróbios, gerando subprodutos de valor agregado como o biogás, fonte de energia renovável, e o biofertilizante, fertilizante orgânico. A DA é a degradação do material orgânico por microrganismos anaeróbios, produzindo sobretudo metano (CH<sub>4</sub>) e dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>). Os RFV são compostos principalmente por carboidratos de fácil degradação, que são rapidamente convertidos, na fase de hidrólise, em açúcares simples e fermentados a ácidos orgânicos, não sendo consumidos na mesma velocidade na fase acidogênica, causando queda no pH, diminuição na produção de biogás e inibição do processo (BOUALLAGUI et al., 2004; EDWIGES et al., 2018). As estratégias normalmente adotadas para minimizar os efeitos da fase de hidrólise incluem, adição de cosubstratos, principalmente dejetos animais já que são ricos em nitrogênio (BRES et al., 2018), pré-tratamentos químicos com adição de agentes de tamponamento e elementos traço (KESKIN et al., 2018) e a DA de dois estágios, com as duas fases anaeróbias (DINSDALE et al, 2000; BOUALLAGUI et al., 2004). Técnicas de pré-tratamento do substrato antes de sua utilização na DA tem sido amplamente estudada, podendo ser pré-tratamento químico, biológico ou físico. Dentre os pré-tratamentos físicos o térmico tem o intuito de otimizar o balanço energético, aumentar os teores de biogás e remover patógenos e compostos inibitórios (LI; JIN, 2015, GNOUAI et al., 2020). Quando utilizado antes do processo de DA pode aumentar a produção de metano, reduzir o tempo de retenção, e obter alta eficiência no processo (ZIA et al., 2020). Os pré-tratamentos comuns situam-se na gama dos 60°C a 180°C, pois a partir de 200°C pode ocorrer a formação de compostos refratários, tóxicos ou inibidores (FERRER et al., 2008; BORDELEAU e DROSTE, 2011; RODRIGUEZ-ABALDE et al., 2011). O pré-tratamento térmico ainda tem sido pouco estudado para os RFV, com isso objetivo deste estudo foi avaliar a influência do pré-tratamento térmico na DA dos RFV, bem como determinar qual a capacidade limite do sistema quanto a carga orgânica aplicada.

**MATERIAL E MÉTODOS:** O experimento foi conduzido no Laboratório de Análise de Resíduos Agroindustriais, anexo de reatores pertencente a Universidade Estadual do Oeste do Paraná – UNIOESTE, Campus de Cascavel – PR. O substrato utilizado foi RFV provenientes do banco de alimentos da Central de Abastecimento (CEASA) de Cascavel – PR. O banco de alimentos do CEASA recebe os produtos não comercializados pelos atacadistas por não possuírem valor comercial, mas que ainda estão próprios para consumo humano. Os produtos que não apresentarem condições de consumo humano são considerados resíduos e conforme a Instrução Normativa nº 81 de 19 de dezembro de 2018, capítulo IV, Art. 16 (BRASIL, 2018), não pode ser destinado para alimentação animal, dessa maneira são encaminhados para o aterro sanitário de Cascavel-PR. Dentre os hortigranjeiros enviados para o aterro foram selecionados 10 produtos para serem utilizados neste estudo, quais sejam, 21% de tomate, 20% de manga, 13,5% de mamão, 10,5% de banana, 9,5% de melancia e batata, 8% de cebola, 3% de cenoura

e chuchu e 2% de beterraba. O inóculo utilizado foi um biofertilizante proveniente de um reator semicontínuo, alimentado com as dejeções de vacas leiteiras, de uma unidade de produção de leite. Foi utilizado um reator anaeróbio de bancada, modelo tubular horizontal, confeccionado em tubo de PVC, com volume útil de 60 L e regime de alimentação semicontínuo (Figura 1).

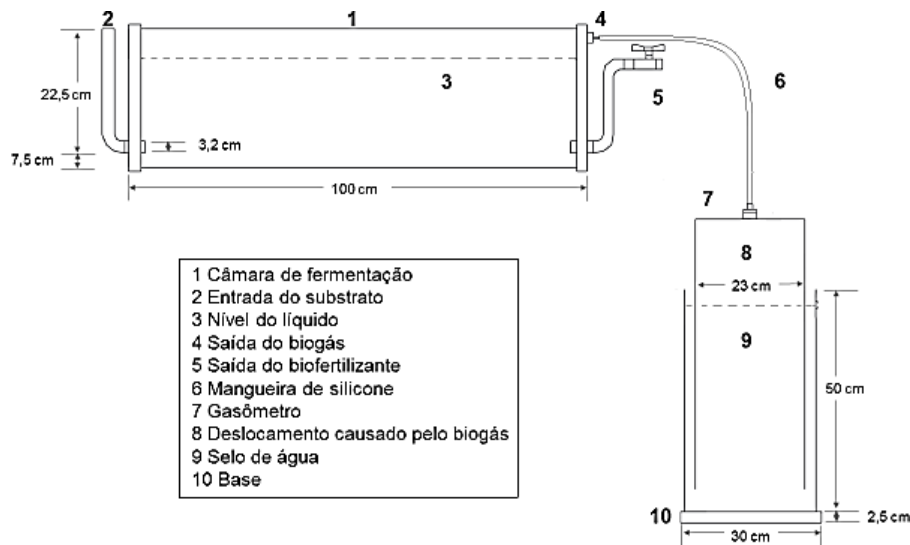


FIGURA 1. Desenho esquemático do corte transversal do reator modelo semicontínuo.

O reator foi abastecido inicialmente com 1,0% de sólidos totais (ST), por 10 dias, apenas para aclimatação da biomassa microbiana com os resíduos orgânicos. Em seguida, houveram cinco progressões de cargas, 1,5, 2, 2,5, 3 e 3,5%ST, de 0,5 em 0,5%ST. Assim que a produção de biogás apresentava coeficiente de variação menor que 10%, a DA era conduzida por mais 10 dias, para avaliação da estabilidade do sistema e produção de biogás. Em seguida, era realizado o aumento de ST na carga. O TRH adotado foi de 30 dias. O pré-tratamento térmico (PTT) constituiu-se do cozimento dos RFV a 70°C em uma panela com auxílio de um bico de Bunsen. As cargas diárias foram de 2 L, compostas por reciclo, água e RFV pré-tratado. O reciclo utilizado foi o biofertilizante do dia anterior e os RFV foram triturados em triturador de resíduos orgânicos com tamanho de partícula máximo de 0,5 cm. O volume de biogás produzido foi monitorado diariamente, sendo mensurado pelo deslocamento vertical dos gasômetros. Como a área da seção transversal é conhecida, multiplicando-a pelo comprimento deslocado, obteve o volume de biogás produzido no reator. A correção do volume de biogás para as condições de 1 atm e 20°C, será efetuada segundo CAETANO (1985), o qual verificou que pelo fator de compressibilidade (Z), o biogás apresentou comportamento próximo ao ideal. Partindo deste pressuposto SANTOS (2001) utilizou a Equação 1, resultante das leis de Boyle e Gay-Lussac, para corrigir o volume de biogás.

$$\frac{V_0 * P_0}{T_0} = \frac{V_1 * P_1}{T_1}$$

Em que:

- $V_0$  = Volume do biogás corrigido, m<sup>3</sup>;
- $P_0$  = Pressão corrigida do biogás, 10.322,72 mm de H<sub>2</sub>O;
- $T_0$  = Temperatura corrigida do biogás, 293,15 °K;
- $V_1$  = Volume do gás no gasômetro;
- $P_1$  = Pressão do biogás no instante da leitura, em mm de H<sub>2</sub>O, e
- $T_1$  = Temperatura do biogás no instante da leitura, em °K.

(1)

Semanalmente, coletava-se amostra de biogás com uma seringa (10 mL) específica para coleta de gás, para análise de composição do biogás ( $H_2$ ,  $CH_4$  e  $CO_2$ ), sendo determinada por meio de cromatógrafo a gás (modelo CG-2014, Shimadzu®). Posteriormente, abria-se o registro de gás do gasômetro e o mesmo era descartado. As leituras de pH foram realizadas com peagômetro de bancada. A alcalinidade total (AT) e acidez volátil (AV) foram determinadas pelo método titulométrico, segundo RIPLEY et al. (1986). Os ácidos graxos voláteis (AGVs) foram determinados conforme o método proposto por Penteadó (2012), por cromatografia gasosa de alta eficiência (CLAE) em sistema Shimadzu®. Os ST e sólidos voláteis (SV) e a demanda química de oxigênio (DQO) foram analisados conforme metodologia da APHA (2005). E o carbono orgânico total (COT) foi obtido pela divisão da porcentagem de SV por 1,8, de acordo com recomendações JIMÉNEZ e GARCÍA (1992).

**RESULTADOS E DISCUSSÃO:** Os RFV analisados possuem elevado teor de SV, 87,6%, ressaltando o potencial de transformação destes resíduos na DA. Contudo o baixo pH de 4,2 e alcalinidade total aproximada menor que  $20 \text{ mg L}^{-1}$  indica a necessidade de estratégias para alcalinizar o meio e viabilizar o uso dos RFV na DA. Desse modo, neste estudo, 40% do volume de água necessário para diluir os sólidos da carga, foi de biofertilizante, para alcalinizar o meio. Para verificar a capacidade limite do sistema em relação a carga orgânica aplicada, foi adicionado gradualmente 0,5%ST a carga. À medida que a concentração de ST da carga foi gradativamente aumentada de 1,5 a 3%, observou-se aumento na produção de biogás (Figura 2). No entanto, o volume de biogás apresentou decréscimo ao aumentar a concentração de ST da carga para 3,5%, indicando capacidade limite do sistema.

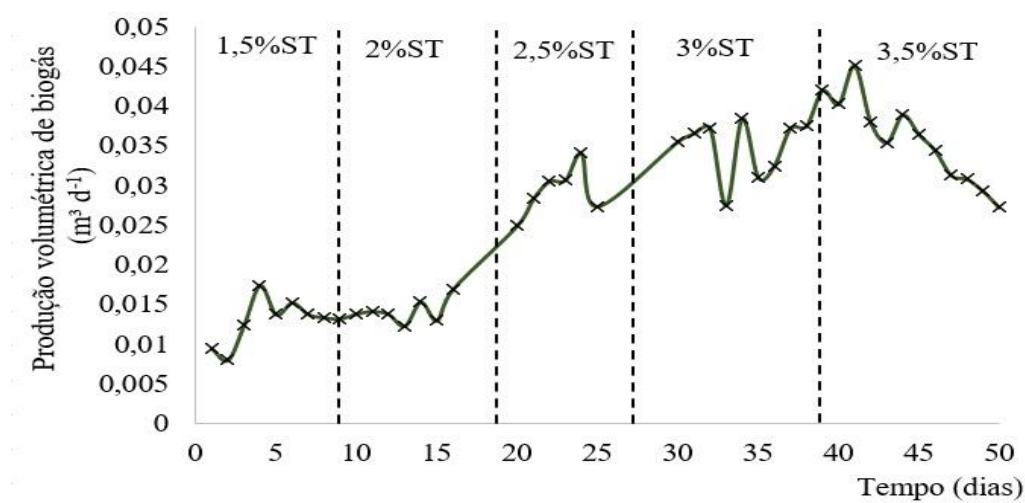


FIGURA 2. Produção volumétrica de biogás conforme o aumento da concentração de ST da carga adicionada.

A produção máxima de biogás e melhor estabilidade do sistema foi observada com 3% ST ( $0,036 \text{ m}^3 \text{ d}^{-1}$ ), equivalente a  $0,91 \text{ g SV L}^{-1} \text{ d}^{-1}$  de carga orgânica aplicada. Desse modo, foi conduzida a digestão anaeróbia dos RFV com pré-tratamento térmico por 30 dias com 3% ST. Na Figura 3 estão apresentados os dados de produção específica de biogás e metano.

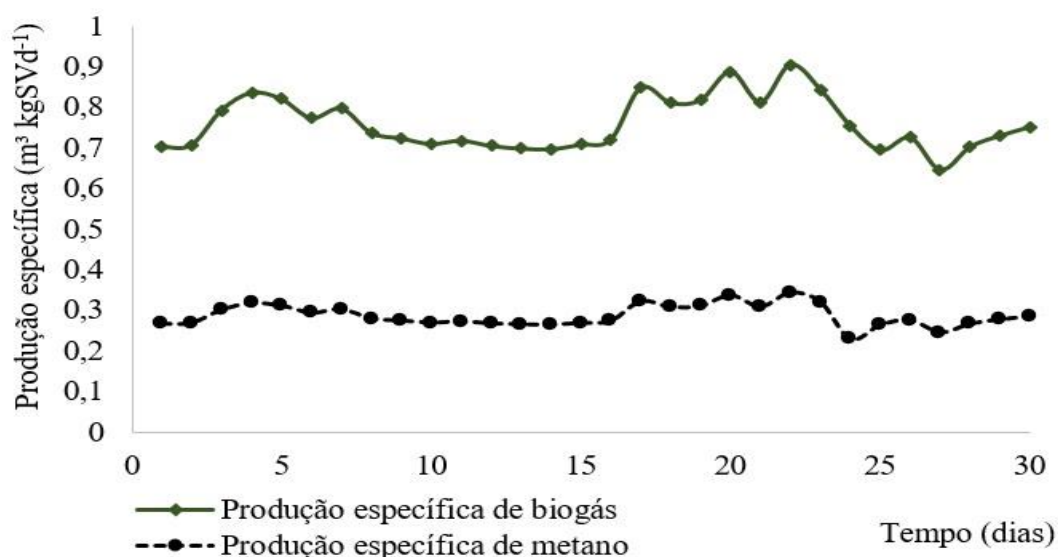


FIGURA 3. Produção específica de biogás e metano.

A média de produção de biogás observada foi de  $0,76 \text{ m}^3 \text{ kgSVd}^{-1}$  e  $0,29 \text{ m}^3 \text{ CH}_4 \text{ kgSVd}^{-1}$  de metano. EDWIGES et al. (2018) obteve  $0,214 \text{ m}^3 \text{ CH}_4 \text{ kgSVd}^{-1}$ , produção ligeiramente inferior à deste estudo para COV de  $1 \text{ g SV L}^{-1} \text{ d}^{-1}$ , contudo foi utilizada uma composição maior de frutas e verduras, e não houve pré-tratamento do substrato. GNAOUI et al. (2020) observaram  $0,383 \text{ m}^3 \text{ CH}_4 \text{ kgSV}^{-1}$  na digestão anaeróbia de resíduos de alimentos pré-tratados a  $100^\circ\text{C}$ , um aumento de 23,68% em relação ao substrato sem pré-tratamento térmico. Os resultados indicam que o pré-tratamento térmico otimiza a produção de metano devido à deflocação das macromoléculas, provocando o aumento da área superficial do substrato, o que favorece contato entre substrato e microrganismos (AUDREY et al., 2011). Estão apresentados na Tabela 1 os dados das concentrações de AT, AV, AGV, relação AV/AT e pH do biofertilizante.

TABELA 1. Concentrações finais de AT, AV, AGV, relação AV/AT e pH.

Alcalinidade total ( $\text{mg CaCO}_3 \text{ L}^{-1}$ )	Acidez volátil ( $\text{mg L}^{-1}$ )	Relação AV/AT	AGV ( $\text{mg L}^{-1}$ )	pH
$2327,8 \pm 59$	$1306,7 \pm 62$	$0,56 \pm 0$	$335,4 \pm 100$	$7,9 \pm 0$

Durante todo o período o pH manteve-se entre 7,8 e 8, faixa ótima para a metanogênese, conforme DEUBLEIN e STEINHAUSER (2008). O reciclo de 40% do biofertilizante com pH neutro promoveu o aumento da alcalinidade total, contribuindo para o equilíbrio do sistema e evitando acúmulo de AGVs no meio e conseqüentemente para a estabilidade do processo, minimizando a acidificação causada pelos carboidratos dos RFV. ALINO (2020) relatou um aumento de 21% na alcalinidade total da CoDA de RFV, apra de grama e esgoto sanitário, com o reciclo do biofertilizante. O PTT promove a redução do acúmulo de AGVs no meio, por meio da redução dos ácidos graxos de cadeia longa a ácidos graxos de menor peso molecular, pelo aumento da temperatura (LI; JIN, 2015). Além disso, foi obtida 80,4%, 87,5% e 82,5% de redução de ST, SV e DQO, demonstrando elevada capacidade da digestão anaeróbia, considerando a conversão dos RFV em biogás.

**CONCLUSÕES:** Considerando os objetivos propostos é possível concluir que, o pré-tratamento térmico atenua os efeitos da fase de hidrólise e favorece a produção de metano na digestão anaeróbia de resíduos de frutas e verduras. O melhor desempenho foi alcançado com carga de 3% ST, com produção máxima de metano de  $0,29 \text{ m}^3\text{CH}_4 \text{ kgSVd}^{-1}$  e 87,5% de remoção de SV.

## **REFERÊNCIAS:**

ABRELPE. Associação Brasileira de Empresas de Limpezas Públicas e Resíduos Especiais. **Panorama dos resíduos sólidos no Brasil**. São Paulo, 2020.

APHA. AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION. **Standard Methods for the examination of water and waste water**. 18a. ed., Washington, 2005.

ARIUNBAATAR, J., PANICO, A., ESPOSITO, G., PIROZZI, F. & LENS, P. N. L. Pretreatment methods to enhance anaerobic digestion of organic solid waste. **Applied Energy** 123, p. 143-156, 2014.

ALINO, J. H. L. **Codigestão de resíduos de apra de grama, resíduos de frutas e vegetais e esgoto sanitário: efeito do pré-tratamento e recirculação do digestato**. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, UTFPR, Medianeira, 2020, 84 p.

AUDREY, P; JULIEN, L; CHRISTOPHE, D; PATRICK, L. Sludge disintegration during heat treatment at low temperature: a better understanding of involved mechanisms with a multiparametric approach. **Biochemical Engineering Journal**, v. 54, n. 3, p. 178-184, 2011.

BORDELEAU, E.L; DROSTE, R.L. Comprehensive review and compilation of pretreatments for mesophilic and thermophilic anaerobic digestion. **Water Science and Technology**, v. 63, p. 291-296. 2011.

BOUALLAGUI, H.; TORRIJOS, M.; GODON, J. J.; MOLETTA, R.; CHEIKH, R. B.; TOUHAMI, Y.; DELGENES, J. P.; HAMDY, M. Two-phases anaerobic digestion of fruit and vegetable wastes: bioreactors performance. **Biochemical engineering journal**, v. 21, n. 2, p. 193-197, 2004.

BRASIL. Ministério do Desenvolvimento Regional. Diagnóstico do Manejo de Resíduos Sólidos Urbanos – 2020. Brasília: SNS/MDR, 2021.

CAETANO, L. **Proposição de um sistema modificado para quantificação de biogás**. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Agronomia, Universidade Estadual Paulista, 1985.

DEUBLEIN, D.; STEINHAUSER, A. Biogas from waste and renewable resources. **Weinheim: Wiley-VCH**, p. 450. 2008.

DINSDALE, R. M.; PREMIER, G. C.; HAWKES, F. R.; HAWKES, D. L. Two-stage anaerobic co-digestion of waste activated sludge and fruit/vegetable waste using inclined tubular digesters. **Bioresource technology**, v. 72, n. 2, p. 159-168, 2000.

EDWIGES, T.; FRARE, L. M.; ALINO, J. H. L.; TRIOLO, J. M.; FLOTATS, X.; COSTA, M. S. S. M. Methane potential of fruit and vegetable waste: an evaluation of the semicontinuous anaerobic mono-digestion. **Environmental Technology**. 2018.

FERRER, I.; PONSÁ, S.; VAZQUEZ, F.; FONT, X. Increasing biogas production by thermal (70 degrees C) sludge pre-treatment prior to thermophilic anaerobic digestion. **Biochemical Engineering Journal**, v. 42, p.186-192. 2008.

GNAOUI, E. Y; KAROUACH, F; BAKRAOUI, M; BARZ, M; BARI, E. H. Mesophilic anaerobic digestion of food waste: Effect of thermal pretreatment on improvement of anaerobic digestion process. **Energy Reports**, v. 6, n. 2, p. 417-422, 2020.

KESKIN, T; ARSLAN, K.; ABUBACKAR, H. N.; VURAL, C.; EROGLU, D.; KARALP, D.; YANIK, J.; OZDEMIR, G.; AZBAR, N. Determining the effect of trace elements on biohydrogen production from fruit and vegetable wastes. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 43, n. 23, p. 10666-10677, 2018.

JIMÉNEZ, E. I.; GARCÍA, V. P. Relationships between organic carbon and total organic matter in municipal solid wastes and city refuse composts. **Bioresource Technology**, v. 41, n. 3, p. 265-272, 1992.

RIPLEY, L. E.; BOYLE, W. C.; CONVERSE, J. C. Improved Alkalimetric Monitoring for Anaerobic Digester of High-Strength Waste, **Journal Water Pollution Control Federation**, v. 58, n. 5, p. 406-411, 1986.

RODRIGUEZ-ABALDE, A.; FERNANDEZ, B.; SILVESTRE, G.; FLOTATS, X. Effects of thermal pretreatments on solid slaughterhouse waste methane potential. **Waste Management**, v. 31, p. 1488-1493. 2011.

ZIA, M.; AHMED, S.; KUMAR, A. Anaerobic digestion (AD) of fruit and vegetable market waste (FVMW): potential of FVMW, bioreactor performance, co-substrates, and pre-treatment techniques. **Biomass Conversion and Biorefinery**, v. 1, p. 1-20. 2020.