

Produção de biogás via codigestão anaeróbia de efluente da parboilização de arroz e resíduos orgânicos

A urgência de inovação na matriz energética brasileira aliada à alta geração de resíduos e efluentes agroindustriais do cenário nacional impulsiona o uso da técnica de digestão anaeróbia como tecnologia promissora para tratamento de tais passivos ambientais e produção de biogás. A codigestão anaeróbia, digestão simultânea de dois ou mais substratos, permite vantagens operacionais e melhores condições do meio para as bactérias responsáveis pela produção do biocombustível. Desse modo, o objetivo deste trabalho foi avaliar o potencial de produção de biogás através da codigestão de efluente (substrato) e lodo (inóculo) do Upflow Anaerobic Sludge Blanket da Estação de Tratamento de Efluentes de uma indústria de arroz parboilizado do sul do Brasil com dois diferentes resíduos sólidos orgânicos (cosubstrato), casca de laranja e de banana, separadamente. Um arranjo fatorial 2^3 foi realizado utilizando casca de laranja como cosubstrato e outro utilizando casca de banana. Os digestores utilizados no estudo foram desenvolvidos a partir da reutilização de garrafas de Polietileno Tereftalato e operados por 168 horas à 35 °C. A quantificação de biogás foi realizada através do princípio de deslocamento de fluidos. A maior produção de biogás semelhante em ambos os arranjos fatoriais se deu com 40% de efluente, 20% da solução de resíduo sólido e 30% de lodo, $8,49E-03$ m³ produzidos quando utilizado casca de banana e $1,17E-02$ m³ com casca de laranja, com remoções de DQO de 4686,87 mgL⁻¹ e 6809,92 mgL⁻¹, respectivamente.

Palavras-chave: Substrato; Inóculo; Lodo; Casca de Laranja; Casca de Banana.

Biogas production from anaerobic codigestion of parboiling rice effluent and organic waste

The urgency of innovation in the Brazilian energy matrix combined with the high generation of agro-industrial residues and effluents from the national scene drives the use of the anaerobic digestion technique as a promising technology for the treatment of environmental liabilities and biogas production. Anaerobic co-digestion, the simultaneous digestion of two or more substrates, enables operational advantages and better environmental conditions for the bacteria responsible for the production of biofuel. Thus, the aim of this study is to evaluate the biogas production potential through co-digestion of effluent (substrate) and sludge (inoculum) of the Upflow Anaerobic Sludge Blanket from the Effluent Treatment Station of a parboiled rice industry in southern Brazil with two different organic solid residues (cosubstrates), orange and banana peel, separately. A 2^3 factorial arrangement was performed using orange peel as a cosubstrate and another using banana peel. The digesters used in the study were developed from the reuse of Polyethylene Terephthalate bottles and operated for 168 hours at 35 °C. The biogas quantification was performed through the principle of fluid displacement. The highest biogas production similar in both factorial arrangements occurred with 40% of effluent, 20% of the solid residue solution and 30% of sludge, $8.49E-03$ m³ produced using banana peel and $1.17E-02$ m³ with orange peel, with COD removals of 4686.87 mgL⁻¹ and 6809.92 mgL⁻¹, respectively.

Keywords: Substrate; Inoculum; Sludge; Orange Peel; Banana Peel.

Topic: **Desenvolvimento, Sustentabilidade e Meio Ambiente**

Received: **19/06/2019**

Approved: **20/07/2019**

Reviewed anonymously in the process of blind peer.

Vitor Alves Lourenço 
Universidade Federal de Pelotas, Brasil
<http://lattes.cnpq.br/0540242108317748>
<http://orcid.org/0000-0003-3940-7812>
vitor.a.lourenco@gmail.com

Willian Cezár Nadaleti 
Universidade Federal de Pelotas, Brasil
<http://lattes.cnpq.br/4670559561277136>
<http://orcid.org/0000-0002-4727-4127>
williancezarnadaleti@gmail.com

Bruno Müller Vieira 
Universidade Federal de Pelotas, Brasil
<http://lattes.cnpq.br/1885554662703620>
<http://orcid.org/0000-0002-9615-3778>
bruno.prppg@hotmail.com

Diuliana Leandro 
Universidade Federal de Pelotas, Brasil
<http://lattes.cnpq.br/3076528365846421>
<http://orcid.org/0000-0002-8092-5550>
diuliana.leandro@gmail.com

Marcos Antonio da Silva
Universidade Federal de Pelotas, Brasil
marcos_silvap1@hotmail.com

Renan de Freitas Santos
Universidade Federal de Pelotas, Brasil
<http://lattes.cnpq.br/5554896977518652>
reh.8@hotmail.com

Gabriel Borges dos Santos 
Universidade Federal de Pelotas, Brasil
<http://lattes.cnpq.br/8502930511377553>
<http://orcid.org/0000-0002-0013-0134>
gabrielwxsantos@hotmail.com

Marlon Heitor Kunst Valentini
Universidade Federal de Pelotas, Brasil
<http://lattes.cnpq.br/6499660114940771>
marlon.valentini@hotmail.com

Guilherme Pereira Schoeler 
Universidade Federal de Pelotas, Brasil
<http://lattes.cnpq.br/6241607536410111>
<http://orcid.org/0000-0002-5289-0602>
guilherme.schoeler@gmail.com

Ivanna Franck Koschier
Universidade Federal de Pelotas, Brasil
<http://lattes.cnpq.br/3875700843821844>
ivannafk@hotmail.com

Victoria Huch Duarte
Universidade Federal de Pelotas, Brasil
<http://lattes.cnpq.br/1244963610234373>
victoriahduarte@gmail.com

Anderson Gabriel Corrêa
Universidade Federal de Pelotas, Brasil
<http://lattes.cnpq.br/2298804444477902>
andersoncorrea560@gmail.com



DOI: 10.6008/CBPC2179-6858.2019.004.0017

Referencing this:

LOURENÇO, V. A.; NADALETI, W. C.; VIEIRA, B. M.; LEANDRO, D.; SILVA, M. A.; SANTOS, R. F.; SANTOS, G. B.; VALENTINI, M. H. K.; SCHOELER, G. P.; KOSCHIER, I. F.; DUARTE, V. H.; CORRÊA, A. G.. Produção de biogás via codigestão anaeróbia de efluente da parboilização de arroz e resíduos orgânicos. *Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais*, v.10, n.4, p.219-231, 2019. DOI: <http://doi.org/10.6008/CBPC2179-6858.2019.004.0017>

INTRODUÇÃO

O esgotamento dos combustíveis fósseis e a alta do preço petróleo bruto torna emergencial o desenvolvimento de novas fontes de energia, renováveis e limpas (JIANG et al., 2017). Assim, o uso de biocombustíveis e bioenergia é uma potencial solução para a matriz energética nacional e global, uma vez que tal energia é derivada da biomassa de compostos orgânicos e pode ser utilizada no transporte, aquecimento e produção de eletricidade, garantindo a redução da emissão de gases de efeito estufa quando substituta de energias fósseis (CREUTZIG et al., 2015; GONZÁLEZ-GONZÁLEZ et al., 2018; SANTOS, 2012).

A digestão anaeróbia é técnica capaz de promover a conversão de biomassa em biocombustível (GRANDO et al., 2012; MATHIOUDAKIS et al., 2017; SRINUANPAN et al., 2018; WEILAND, 2010), e se caracteriza como um processo fermentativo que promove a produção de biogás durante a degradação da matéria orgânica (LEITE et al., 2009). A adição de inóculo ao meio é capaz de promover maior eficiência na produção de biogás ao oferecer uma população adicional de microrganismos anaeróbios capazes de acelerar o tempo de bioestabilização e favorecer a partida, reduzindo, assim, custos operacionais dos digestores ao antecipar o início da degradação da matéria orgânica (BARCELOS, 2009; STEIL, 2001; XAVIER, 2010).

A codigestão anaeróbia se apresenta como um processo capaz de aumentar a estabilidade do sistema de digestão anaeróbica e eficiência da produção de biogás a partir do uso simultâneo de dois ou mais substratos (SOUZA et al., 2010), surgindo a possibilidade de codigestão de efluentes de parboilização do arroz e Resíduos Sólidos Orgânicos (RSO) para a produção de biogás.

O Brasil está entre os 10 maiores produtores de arroz do mundo, tendo fechado a safra de 2017/18 com cerca de 12 milhões de toneladas de arroz produzidos (SUZUKI et al., 2012; CONAB, 2019), sendo o estado do Rio Grande do Sul responsável por cerca de 71,4% da produção nacional (IBGE, 2017). A alta produção do grão acarreta elevada geração de efluentes no setor, uma vez que cerca de 25% do arroz consumo no Brasil é do tipo parboilizado (PARAGINSKI et al., 2014). O processo de parboilização do grão gera, para cada quilo de arroz, de 2 a 4L de efluente rico em matéria orgânica (BASTOS et al., 2010; GONZÁLEZ-GONZÁLEZ et al., 2018; KUMAR et al., 2016; SPINOSA et al., 2016).

A alta atividade do setor agroindustrial no Brasil garante abundância de resíduos sólidos ricos em matéria orgânica e a necessidade de destinação final adequada para tais resíduos gera um atrativo para o uso da codigestão anaeróbia para geração de bioenergia (QUEIROZ et al., 2017). O país obteve, no ano de 2016, uma produção de mais de 6 milhões de toneladas de banana (EMBRAPA, 2017), de acordo com Souza et al. (2010), para cada tonelada de banana industrializada são geradas mais de quatro toneladas de resíduos da fruta.

Uma das principais frutíferas em exploração no Brasil, a banana é cultivada, em todos os estados do país, superada quantitativamente apenas pela produção de laranjas (SOUZA et al., 2010). Este outro produto das agroindústrias nacionais, atingiu uma produção acima de 17 milhões de toneladas em 2016 (EMBRAPA, 2017), grande parte dos resíduos gerados no processo da industrialização da laranja e seus derivados não passam por beneficiamento pelo alto custo econômico para transporte e armazenamento (TRIPODO et al.,

2004).

Do exposto, o objetivo deste estudo foi determinar o potencial de geração de biogás via codigestão de efluente da parboilização de arroz (substrato), lodo (inóculo) e RSO (cossustrato) através da execução de dois arranjos fatoriais 2^3 , a fim de determinar qual RSO promove melhores condições ao sistema, a casca de laranja ou a casca de banana, determinando ainda quais as proporções ideais de cada componente do sistema. Em simultâneo, o estudo objetivou ainda a elaboração de digestores e sistema de quantificação de biogás a baixo custo que garantam as condições necessárias para o processo de digestão anaeróbia.

METODOLOGIA

Os digestores utilizados no estudo foram desenvolvidos a partir do reaproveitamento de garrafas de Polietileno Tereftalato (PET) de volume útil de $2,15E-03m^3$, visando operação eficiente a baixo custo e reaproveitamento de resíduos sólidos urbanos. Na lateral dos digestores, foram instalados termômetros próximos ao local de permanência do inóculo a fim de controlar a temperatura interna. Além disso, um tubo flexível de silicone foi inserido no centro da tampa do digestor para conectá-lo ao sistema de quantificação. O sistema de quantificação de biogás se baseou no princípio do deslocamento de fluidos entre o digestor e dois outros frascos, sendo um deles graduado e conectado ao topo do digestor (figura 1).

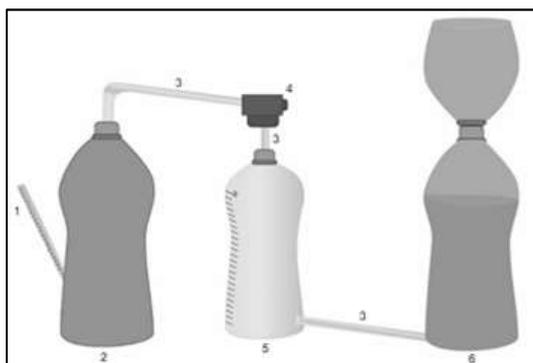


Figura 1: Digestor e sistema de quantificação (1: Termômetro; 2: Digestor; 3: Conexões; 4: Divisor de ar modular; 5: Frasco graduado; 6: Reservatório).

Na entrada de cada garrafa graduada foi instalado um divisor de ar modular, que quando aberto garante a saída do gás para a atmosfera fazendo com que o líquido retorne à sua marca inicial. Ademais, a garrafa graduada recebeu uma fina camada de óleo de soja acima da água para evitar a dissolução do Dióxido de Carbono (CO_2) contido no biogás.

O lodo utilizado como inóculo teve como procedência uma indústria de parboilização de arroz coletado do *Upflow Anaerobic Sludge Blanket Reactor* (UASB) da Estação de Tratamentos de Efluentes (ETE) assim como o efluente utilizado como substrato. Já os RSOs, fornecidos pelo Restaurante Universitário da Universidade Federal de Pelotas, foram triturados em liquidificação e diluídos em água destilada, para cada 100g do resíduo foram adicionados 200mL de água, a fim de reduzir a área superficial das cascas, facilitando a degradação e assim antecipar a produção de biogás.

As proporções de substrato, cossustrato e inóculo utilizados para alimentar os digestores (Tabela 1)

foram determinadas por meio de arranjo fatorial 2^3 com um ponto central (PC), executados em triplicatas, resultando assim em nove diferentes tratamentos. Foi adicionada água destilada nos digestores de modo a garantir que todos os tratamentos possuíssem mesmo volume de alimentação e headspace. O volume útil considerado para a alimentação dos digestores foi $1,7E-03m^3$, e o restante reservado para headspace.

Tabela 1: Alimentação dos digestores para cada tratamento do arranjo fatorial e do PC.

Tratamento	Substrato Efluente (%)	Cossustrato Solução de RSO (%)	Inóculo Lodo (%)	Água destilada (%)
P1	40	10	20	30
P2	50	10	20	20
P3	40	20	20	20
P4	50	20	20	10
P5	40	10	30	20
P6	50	10	30	10
P7	40	20	30	10
P8	50	20	30	0
PC	45	15	25	15

A fim de identificação, os digestores foram nomeados com o prefixo 'B' quando alimentados com casca de banana, e o 'L' quando com casca de laranja, seguido do tratamento ao qual sua mistura de alimentação foi realizada. Para operação, os digestores foram imersos em banhos de aquecimento com termostato à $35^{\circ}C$ durante 168 horas de digestão. A quantificação do biogás produzido foi realizada em intervalos de 12 horas, zerando-se o medidor a cada intervalo.

Para determinar a relação C/N, foi utilizada a metodologia da mufla de Goldin (1987), enquanto o Nitrogênio Kjeldahl foi determinado de acordo com a metodologia de *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (APHA, 2005), assim como o pH e DQO das amostras de entrada e saída dos digestores. A análise estatística dos resultados foi realizada no software IBM SPSS *Statistics*, utilizando o Teste F e o Teste de Tukey, ambos com significância de 5%.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Temperatura

Embora o banho de aquecimento utilizado no experimento seja equipado com termostato, ocorreram oscilações que variaram entre $5^{\circ}C$ no interior dos digestores que receberam casca de banana e $4^{\circ}C$ nos que receberam casca de laranja. Caso as oscilações tenham ocorrido em curto intervalo de tempo, podem ter ocasionado perdas de até 30% na produção de biogás (DEUBLEIN, 2008). Neste estudo, não foi possível determinar a velocidade das oscilações já que o controle de temperatura foi realizado em intervalos de 12 horas em conjunto com a quantificação do biogás. Entretanto, é sabido que variações da temperatura ao longo do processo podem ocasionar perturbações no metabolismo dos microrganismos, oscilações iguais ou maiores que $2^{\circ}C$ são capazes interferir negativamente na digestão mesófila, enquanto que na termofílica variações de apenas $0,5^{\circ}C$ podem desestabilizar o sistema (GUNNERSON et al., 1986).

As temperaturas utilizadas para processos de digestão anaeróbia costumam ficar entre 30 e $40^{\circ}C$, pois dentro deste intervalo a produção de biogás ocorre de maneira eficiente e demanda menor gasto energético para manter a quantidade de calor no digestor (KIM et al., 2002). Segundo estudos realizados por

Nadaleti et al. (2018), a temperatura ideal para produzir biogás via digestão anaeróbia de efluente e lodo anaeróbio da estação de tratamento de esgoto da produção de arroz parboilizado é de 35°C, desse modo as temperaturas médias obtidas ao longo da 168 horas encontraram-se dentro da faixa adequada para produção de biogás, uma vez que a temperatura média nas codigestões com casca de banana foi de 36,93±1.83°C e de 35,80±1.26°C nas com casca de laranja, não apresentando diferença significativa para o Teste F a 5% de significância.

Relação C/N

Com base nas análises realizadas neste estudo, constatou-se que a relação C/N do efluente da parboilização do arroz, da casca de banana e da casca de laranja utilizadas na alimentação dos digestores de respectivamente, 25,75, 21,30 e 40,50. De modo que foram determinadas as relações C/N da alimentação de cada digestor (tabela 2).

Tabela 2: Relação C/N das misturas utilizadas.

Digestor	BP1	BP2	BP3	BP4	BP5	BP6	BP7	BP8	BPC
C/N	24,86	25,01	24,27	24,48	24,86	25,01	24,27	24,48	24,64
Digestor	LP1	LP2	LP3	LP4	LP5	LP6	LP7	LP8	LPC
C/N	28,7	28,21	30,67	29,96	28,7	28,21	30,67	29,96	29,44

A relação C/N obtida nas misturas de alimentação enquadram-se ao recomendado pela literatura, uma vez que as bactérias envolvidas no processo consomem o carbono de 30 a 35 vezes mais rápido do que o nitrogênio, assim a digestão anaeróbia deve ser operada com uma relação de 20 a 30, podendo variar de acordo com os substratos empregados no sistema (IGONI et al., 2008; LI et al., 2011).

Produção de biogás

Nas codigestões com casca de banana, com exceção dos digestores BP1, BP2 e BP5, os digestores tiveram seu pico de produção durante as primeiras 12 horas do experimento. O início da estabilização do sistema e, conseqüentemente, da produção de biogás ocorreu 84 horas após o início da operação dos digestores. Acerca da produção de biogás utilizando a casca de laranja como cossubstrato, todos os digestores apresentaram seu pico de produção de biogás nas primeiras 12 horas do experimento, passado este período de digestão os biodigestores apresentaram queda gradativa na produção ao longo das 168 horas, excetuando LP2 que sofreu uma queda brusca após seu pico (figura 4).

Segundo Zeeuw et al. (1983), o pico de produção nas primeiras horas do processo ocorre devido à partida inicial promovida pelo uso do lodo como inóculo do processo. Os autores afirmam que o uso de inóculo antecipa o pico de produção de biogás e pode aumentar o potencial efetivo da biomassa. Os digestores que apresentaram menores picos de produção foram os mesmo que totalizaram menores volumes totais de biogás produzidos ao fim das 168 horas. Dentre as codigestões com casca de banana realizadas nesse estudo, BP1 apresentou o menor volume médio de biogás gerado, 4,98E-03m³. Os digestores alimentados com casca de banana que apresentaram maior produção média foram BP7, BP3, BP4 e BP6, conforme pode ser observado na figura 3.

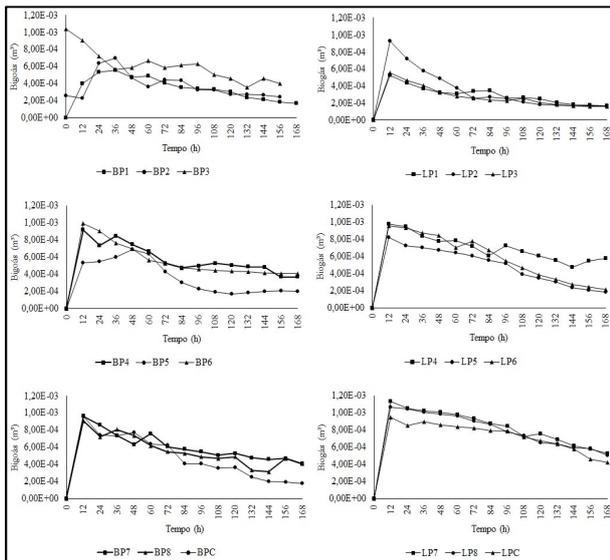


Figura 2: Gráfico da produção de biogás ao longo das 168 horas.

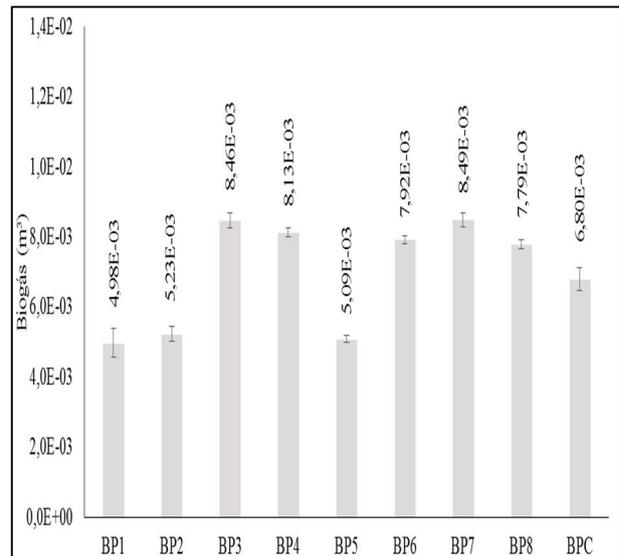


Figura 3: Gráfico da produção total de biogás para as codigestões com casca de banana.

A maior produção de biogás nas 168 horas de experimento ocorreu no digestor BP7, totalizando 8,49E-03m³. Em geral, os tratamentos que receberam a maior proporção de casca de banana, 20%, apresentaram melhores desempenhos, enquanto os que receberam apenas 10% permaneceram mais baixos, exceto BP6, que apresentou um dos melhores resultados, entretanto, ele recebeu maior volume de efluente que os demais.

De acordo com estudos desenvolvidos por Khan et al. (2016) para determinar o potencial energético e modelagem da cinética de produção de CH₄ em digestão anaeróbia em lote de resíduos de banana, os resíduos de banana não devem ser digeridos em monodigestões anaeróbias devido ao desequilíbrio de nutrientes e deficiências que dificultam o desenvolvimento dos microrganismos responsáveis pela produção de biogás, sendo essencial a adição de cossustratos ricos em nutrientes. Elahi et al. (2018) estudou o uso de matéria seca de casca de banana, folhas, pseudocaule e o engaço da bananeira em codigestão com líquido ruminal de novilhas fistuladas à 39°C, Khan et al. (2016) obteve uma produção de biogás de 0,1038E-03m³ em um período de 96 horas.

Souza et al. (2010) alimentou um biorreator de 10,00E-03m³ com 50% de casca de banana, 25% de pseudocaule e 25% de folhas, com volume total de 5,00E-03m³ e volume de inóculo de 2,50E-03m³. Durante os 35 dias de processo, a produção acumulada de biogás foi de aproximadamente 36 dm³ de biogás. Vidal (2014) operou um digestor à 30°C, alimentado com o lodo de tratamento de resíduos bovinos e casca de banana desidratada, resultando em uma geração de 1,46E-03m³ de biogás durante um período de nove dias (216 horas).

Dentre os digestores que receberam a casca de laranja como cossustrato, os que apresentaram maiores produções de biogás foram o LP7 e LP8, com volumes totais de 1,17E-02m³ e 1,13E-02m³, respectivamente. Os menores volumes foram encontrados em LP1 e LP3, com volumes de 4,13E-03m³ e 3,87E-03m³, respectivamente (figura 4).

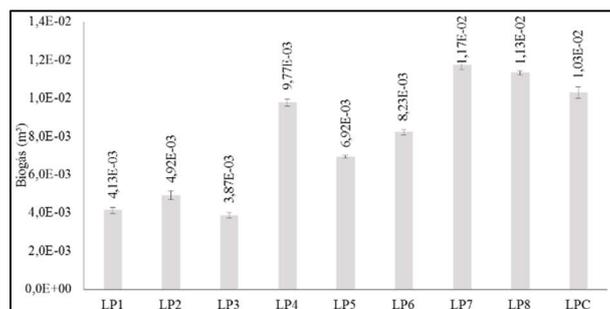


Figura 4: Gráfico da produção total de biogás para as codigestões com casca de banana.

Em geral, menores rendimentos foram obtidos nos digestores que receberam menor proporção da solução de casca de laranja, 10%, com exceção do LP3, que recebeu 20% da solução de RSO e apresentou um dos piores desempenhos. Tal exceção pode ser atribuída ao fato de que o digestor foi alimentado com menos efluente e lodo, ou seja, recebeu maior carga de matéria orgânica e mais inóculo. A maior produção de biogás foi observada nos processos que receberam a maior carga de casca de laranja, 20%, e a maior quantidade de lodo, 30%.

Lami et al. (2017) estudou a produção de biogás a partir de codigestão de resíduos de aves e casca de laranja, com pré-tratamento térmico em fermentação descontínua por 21 dias em digestores de $0,5E-03m^3$ a $38^{\circ}C$, usando fluido ruminal como inóculo. A mistura de 75% de esterco e 25% de casca de laranja pré-tratada a $80^{\circ}C$ apresentou a maior produção de biogás obtida no estudo, aproximadamente $1,094-03m^3$.

Comparando o rendimento dos dois RSO como cossustratos para o processo de digestão anaeróbia do efluente da parboilização de arroz, a casca de laranja apresentou melhor desempenho. Tal diferença pode estar relacionada à relação C/N fornecida pela mistura do RSO com o efluente, uma vez que a mistura com a casca de laranja apresentou relação C/N de 30,67 e casca de banana 24,27.

A relação C/N é um dos principais fatores para a produção de biogás (SGORLON et al., 2011), sendo um determinante limitante da digestão anaeróbica em resíduos orgânicos, pois o carbono tem a função de fornecer energia para microrganismos enquanto o nitrogênio promove seu crescimento a partir da síntese de proteínas (SILVEIRA, 2009). Zanetti et al. (2014) estudou a composição ótima, em termos de relação C/N, para codigestão de casca de cacau, banana e laranja. Zanetti et al. (2014) relatou rendimento máximo de $0,81E-03m^3$ de biogás em um intervalo de 41 horas a $30^{\circ}C$, usando relação C/N de 30. O estudo determinou que ao comparar composições que têm uma razão C/N entre 20 e 30 para estes substratos, os melhores resultados são obtidos a partir de misturas com uma relação de C/N de 30.

Entretanto, ambos os cossustratos aumentaram a produção de biogás através da digestão anaeróbica das águas residuais, Nadaleti et al. (2018) estudou a produção de biogás por digestão de efluentes de parboilização de arroz em digestores anaeróbios semelhantes aos utilizados neste estudo, quando operados a $35^{\circ}C$ produziram $5,198E-03m^3$ de biogás em um período de 276 horas. Aplicando o Teste de Tukey e comparando os tratamentos de ambos os arranjos fatoriais, constatou-se que o tratamento que se destacou dentre as maiores produções em ambos foi o P7, com $8,40E-03m^3$ produzidos em codigestão com casca de banana e $11,73E-03m^3$ com casca de laranja (tabela 3).

Tabela 3: Análise estatística da produção de biogás em ambos os arranjos fatoriais. Médias seguidas de letras minúsculas na mesma coluna não diferem significativamente pelo Teste de Tukey a 5% de significância, já médias seguidas por letras maiúsculas iguais não diferem em ambas as colunas para o mesmo teste.

Tratamento	Cossustrato	
	Casca de Banana (m ³)	Casca de laranja (m ³)
P1	4,98E-03 ^{aa}	4,13E-03 ^a
P2	5,22E-03 ^{aA}	4,92E-03 ^A
P3	8,46E-03 ^{dd}	3,87E-03 ^a
P4	8,13E-03 ^{cdcd}	9,77E-03 ^b
P5	5,09E-03 ^{aA}	6,92E-03 ^B
P6	7,92E-03 ^{cdcd}	8,23E-03 ^{CD}
P7	8,49E-03 ^{dd}	11,73E-03 ^c
P8	7,79E-03 ^{cc}	11,32E-03 ^c
PC	6,80E-03 ^{bb}	10,28E-03 ^b

Embora, em geral, a codigestão com casca de laranja apresente maior produção de biogás, o pior desempenho do estudo ocorreu nos digestores LP1 e LP3. Ao comparar os processos, as codigestões com casca de banana aparecem apenas como terceiro melhor resultado, inferiores à LP7, LP8, LPC e LP4. Como pode ser observado nos gráficos das figuras 3 e 4, o sistema de quantificação apresentou baixo desvio padrão e coeficiente de variação dentre as triplicatas, com coeficiente de variação entre 1,07% e 8,07%.

Remoção de DQO

Quanto aos resultados de DQO para as codigestões com casca de banana, os digestores com as maiores cargas de DQO removidas foram os que mais produziram biogás, BP7, BP3, BP4 e BP6, com remoções de 4686,88mgL⁻¹, 4451,79mgL⁻¹, 4157,94mgL⁻¹ e 3717,17mgL⁻¹, respectivamente (tabela 4). Os processos promoveram a remoção de DQO superior a 76% em todos os tratamentos do arranjo fatorial, chegando a até 94,74% no BP5.

Souza et al. (2013) utilizaram resíduos da natureza de casca de banana, folhas e pseudocaule para produção de biogás via digestão anaeróbia em digestores com volume total de 7 dm³, a 30°C por 35 dias, promovendo uma remoção de 57% de DQO no período de digestão. Quanto a remoção de DQO referente a entrada e saída dos digestores com casca de laranja houve variações de 86,73% para 21,43%, sendo que remoções acima de 70% ocorreram nos digestores LP6, LPC1, LP5, LPC2 e LPC. O pior desempenho ocorreu no LP3, com apenas 21,43% de remoção (tabela 5).

Tabela 4: DQO de entrada e saída dos digestores com casca de banana.

Digestor	Entrada (mgL ⁻¹)	Saída (mgL ⁻¹)	Remoção (mgL ⁻¹)	Remoção (%)
BP1	3438,02	675,85	2762,17	80,34
BP2	3805,33	896,24	2909,09	76,45
BP3	5054,18	602,39	4451,79	88,08
BP4	4466,48	308,54	4157,94	93,09
BP5	3070,71	161,62	2909,09	94,74
BP6	4025,71	308,54	3717,17	92,34
BP7	5054,18	367,31	4686,87	92,73
BP8	4686,87	808,08	3878,79	82,76
BPC	3829,81	514,23	3315,58	86,64

As cargas de DQO removidas durante os processos de digestão apresentaram grande variação, com valores quase seis vezes menores que a maior carga de DQO consumida, o digestor com maior carga removida foi LP7, 6479,33mgL⁻¹ enquanto a menor remoção foi de 1256,20mgL⁻¹ no digestor LP3. Tais

resultados corroboram com os resultados referentes à produção de biogás e com a literatura, uma vez que maiores remoções de carga de DQO ocorram nos digestores que apresentaram as maiores produções. De acordo com Metcalf et al. (2016), processos anaeróbios de tratamento relacionam diretamente a remoção de DQO com a produção de metano, uma vez que a produção do biocombustível ocorre através da degradação da matéria orgânica.

Tabela 5: DQO de entrada e saída dos digestores com casca de laranja.

Digestor	Entrada (mgL ⁻¹)	Saída (mgL ⁻¹)	Remoção (mgL ⁻¹)	Remoção (%)
LP1	3364,55	1300,28	2064,27	61,35
LP2	3584,94	1300,28	2284,66	63,73
LP3	5862,26	4606,06	1256,20	21,43
LP4	9674,93	4495,87	5179,06	53,53
LP5	4172,64	859,50	3313,14	79,40
LP6	5818,18	1529,60	4288,58	73,71
LP7	9454,55	2644,63	6809,92	72,03
LP8	10115,70	3636,36	6479,34	64,05
LPC	6809,92	1212,12	5597,79	82,11

Os resultados obtidos nas análises de DQO corroboram para a maior produção de biogás na codigestão com casca de laranja em comparação com a casca de banana, pois, por exemplo, BP7 apresentou menor DQO de entrada do que LP7, respectivamente, 5054,18mgL⁻¹ e 79454,55mgL⁻¹; portanto, o sistema de casca de laranja forneceu maior teor de matéria orgânica disponível para biodegradação. Conforme citado anteriormente, espera-se que as produções de biogás sejam maiores nos sistemas que promoveram maior remoção de matéria orgânica, BP7 apresentou uma remoção de apenas 4686,87mgL⁻¹ enquanto LP7 removeu 6809,92mgL⁻¹.

pH

Os resultados obtidos nas análises de pH das amostras de entrada dos digestores com casca de banana variaram de 4,20 a 4,65, sendo que ao final do processo, observou-se um aumento significativo no pH, atingindo neutralidade em todos os digestores. Já as misturas utilizadas para alimentar os digestores com casca de laranja também apresentaram pH baixo em suas amostras de entrada, entre 3,51 e 3,94, entretanto, ao fim da digestão, dois digestores não apresentaram neutralidade em suas amostras de saída, LP3 e LP4 (figura 5).

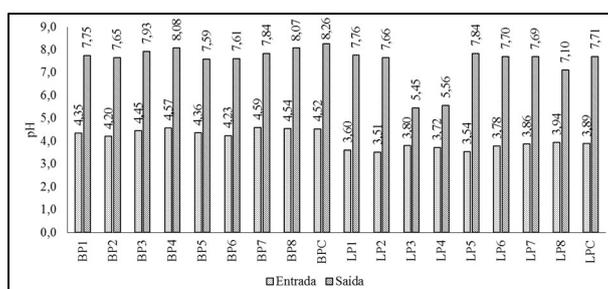


Figura 5: Gráfico do pH de entrada e saída dos digestores.

Assim, assume-se que a geração de biogás não atingiu seu potencial máximo, uma vez que a produção é inibida em um pH abaixo de 6,0 (GRANDO et al., 2017). De acordo com a literatura, o pH do meio

a ser digerido deve tanger a neutralidade para que ocorra o desenvolvimento de bactérias metanogênicas (KHALID et al., 2011), sendo assim, a faixa mais ampla para uma digestão anaeróbia satisfatória fica entre 6,0 e 8,0, já o pH capaz de promover um processo com maior eficiência ocorre de 6,8 a 7,5 (FORESTI, 1998). No que diz respeito à produção de CH₄, a faixa ótima de pH se situa entre 7,0 e 8,0, sendo inibida abaixo de 6,0 ou acima de 8,5 (WEILAND, 2010).

Desse modo o pH possui relevância não somente para a produção de biogás quanto à composição de CH₄ no mesmo, entretanto, a composição do biogás produzido não foi abordada nesse estudo. Em média, o biogás é constituído por 60% de CH₄ e 40% de CO₂ (WEILAND, 2010), possuindo ainda traços de outros elementos como sulfeto de hidrogênio, siloxanos, monóxido de carbono, nitrogênio e hidrogênio (BARBOSA et al., 2011; RYCKEBOSCH et al., 2011). Segundo Arruda et al. (2002), o biogás só é um combustível economicamente viável quando o teor de CH₄ for superior ao de CO₂, tal composição é necessária para sua conversão em bioenergia uma vez que o CH₄ possui elevado poder calorífico, enquanto um alto teor de CO₂ interfere negativamente já o que gás é inerte em termos de combustão (RYCKEBOSCH et al., 2011).

CONCLUSÕES

As cascas utilizadas no estudo para codigestão anaeróbia com efluente e lodo da parboilização de arroz obtiveram resultados satisfatórios em relação a outros estudos encontrados na literatura, sendo esse um resultado de extrema relevância uma vez que a inconstância da temperatura e o pH ácido pode ter acarretado em rendimento inferior dos processos envolvidos na digestão anaeróbia e assim as codigestões podem não ter atingido sua produção máxima de biogás, indicando que a codigestão de efluente da parboilização de arroz e os RSO possui alto potencial para a produção de biogás.

De acordo com os resultados obtidos no estudo, o melhor desempenho em relação ao volume de biogás produzido usando efluente e lodo da parboilização de arroz com casca de laranja ou banana é dado pela mistura de 40% de efluente, 20% de solução de casca de laranja e 20% de lodo. Quando comparados os dois RSO, a casca de laranja apresentou melhores resultados com produção de biogás de até 11.730dm³ durante as 168 horas de digestão, enquanto a casca de banana atingiu máxima produção de apenas 8.490dm³.

As relações C/N das misturas utilizadas para alimentar os digestores possivelmente foram as responsáveis pela diferença de desempenho entre os cossustratos, uma vez que as misturas com laranja apresentaram relação C/N entre 28,21 e 30,67, enquanto aquelas com banana ficaram entre 24,27 e 25,01. As análises de DQO evidenciaram maiores cargas orgânicas nas misturas que receberam a casca de laranja, resultando em maior disponibilidade de carga orgânica a ser degradada, promovendo maiores cargas de DQO removidas ao final do processo. Ambas as codigestões apresentaram alta eficiência quanto à remoção da DQO de entrada das misturas dos resíduos e efluente, chegando à 94,74% de remoção com a casca de banana como cossustrato e até 83,87% nos digestores alimentados com casca de laranja.

O processo também foi eficiente quanto à neutralização do pH da maioria das misturas, no entanto,

recomenda-se para estudos futuros a adição de neutralizadores como pré-tratamento para que todo o processo ocorra na faixa ideal para a produção do biogás. Recomenda-se também controlar a temperatura em intervalos menos espaçados para que seja possível observar a velocidade de suas oscilações, permitindo a identificação de eventuais interferências na estabilidade do processo.

Tais recomendações podem elevar a produção ainda maior de biogás, sendo pertinente analisar a composição do biogás produzido para que, além do potencial de produção de biogás, conheça composição e eficiência quanto ao uso para a geração de energia. Acerca dos digestores e sistemas de quantificação de biogás, o sistema de quantificação apresentou baixo desvio padrão e baixo coeficiente de variação dentre as triplicatas, revelando alta precisão. Ademais, o confronto dos resultados da quantificação e análises de DQO indicam a confiabilidade da exatidão do sistema.

REFERÊNCIAS

- APHA. American Public Health Association. **Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater**: Introduction 4500-N A 4-103; Method 5220-C, 5-16. Washington: APHA, 2005.
- ARRUDA, M. H.; AMARAL, L. P.; PIRES, O. P. J.; BARUFI, C. R. V.. Dimensionamento de Biodigestor para Geração de Energia Alternativa. **Revista Científica Eletrônica de Agronomia**, v.1, n.2, 2002.
- BARBOSA, G.; LANGER, M.. Uso de biodigestores em propriedades rurais: uma alternativa à sustentabilidade ambiental. **Unesco & Ciência**, v.2, n.1, 2011.
- BARCELOS, B. R.. **Avaliação de Diferentes Inóculos na Digestão Anaeróbia da Fração Orgânica de Resíduos Sólidos Domésticos**. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos) - Universidade de Brasília, Brasília, 2009.
- BASTOS, R. G.; SEVERO, M.; VOLPATO, G.; JACOB-LOPES, E.; ZEPKA, L. Q.; QUEIROZ, M. I.. Bioconversão do nitrogênio do efluente da parboilização do arroz por incorporação em biomassa da cianobactéria *Aphanothece microscopica Nágeli*. **Revista Ambiente e Água**, v.5, n.3, p.258-264, 2010.
- CONAB. Companhia Nacional de Abastecimento. **Séries Históricas das Safras, Arroz Total (Irrigado e Sequeiro)**. Brasília: CONAB, 2019.
- CREUTZIG, F.; RAVINDRANATH, N. H.; BERNDEN, G.; BOLWIG, S.; BRIGHT, R.; CHERUBINI, F.; CHUM, H.; CORBERA, E.; DELUCCHI, M.; FAAIJ, A.; FARGIONE, J.; HABERL, H.; HEATH, G.; LUCON, O.; PLEVIN, R.; POPP, A.; ROBLEDO-ABAD, C.; ROSE, S.; SMITH, P.; STROMMAN, A.; SUH, S.; SERA, O.. Bioenergy and climate change mitigation: an assessment. **GCB Bioenergy**, v.7, n.5, p.916-944, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1111/gcbb.12205>
- DEUBLEIN, D.; STEINHAUSER, A.. **Biogas from Waste and Renewable Resources**. 2 ed. Weheim: Wiley-VCH, 2008.
- ELAHI, M. Y.; YUSUF, A. O.; TORSHABI, A.; FAZAELI, H.; DEGHANI, M. R.; SALEM, A. Z. M.. Ensiling Pretreatment of Banana Waste By-products: Influences on Chemical Composition and Environmental Rumen Biogas and Fermentation. **Waste and Biomass Valorization**, p.1-9, 2018.
- EMBRAPA. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Produção brasileira de banana em 2016**. Brasília: EMBRAPA, 2017.
- EMBRAPA. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Produção brasileira de laranja em 2016**. Brasília: EMBRAPA, 2017.
- FORESTI, E.. **Notas da aula de Processos e Operações em Tratamento de Resíduos SHS-705**. São Carlos: 1998.
- GOLDIN, A.. Reassessing the use of loss-on-ignition for estimating organic matter content in noncalcareous soils. **Journal Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v.18, n.10, p.1111-1116, 1987. DOI: <https://doi.org/10.1080/00103628709367886>
- GONZÁLEZ-GONZÁLEZ, L. M.; CORREA, D. F.; RYAN, S.; JENSEN, P. D.; PRATT, S.; SCHENK, P. M.. Integrated biodiesel and biogas production from microalgae: Towards a sustainable closed loop through nutrient recycling. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v.82, p.1137-1148 2017.
- GONZÁLEZ-GONZÁLEZ, L. M.; ZHOU, L.; ASTALS, S.; THOMAS-HALL, S. R.; ELTANAHT, E.; PRATT, S.; JENSEN, P. D.; SCHENK, P. M.. Biogas production coupled to repeat microalgae cultivation using a closed nutrient loop. **Bioresource Technology**, v.26, p.625-630, 2018.
- GRANDO, R. L.; ANTUNE, A. M. S.; FONSEXA, F. V.; SÁNCHEZ, A.; BARRENA, R.; FONT, X.. Technology overview of biogas production in anaerobic digestion plants: A European evaluation of research and development. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v.80, p.44-53, 2017.
- GUNNERSON, C.; STUCKEY, D.. Anaerobic digestion: principles and practice of biogas systems. **Word Bank Technical Paper**, n.49, 1986.
- IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Levantamento Sistemático da Produção Agrícola**: Pesquisa

Mensal de Previsão e Acompanhamento das Safras Agrícolas no Ano Civil 30. Rio de Janeiro: IBGE, 2017.

IGONI, A. H.; AYOTAMUNO, M. J.; EZE, C. L.; OGAJI, S. O. T.; PROBERT, S. D.. Designs of anaerobic digesters for producing biogas from municipal solid-waste. **Applied Energy**, v.85, n.6, p.430-438, 2008.

JIANG, L.; NI, S.; LIU, G.; XU, X.. Photocatalytic hydrogen production over Aurivillius compound Bi₃TiNbO₉ and its modifications by Cr/Nb co-doping. **Applied Catalysis B: Environmental**, v.217, p.342-352 2017. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.apcatb.2017.06.012>

KHALID, A.; ARSHAD, M.; ANJUM, M.; MAHMOOD, T.; DAWSON, L.. The anaerobic digestion of solid organic waste. **Waste Management**, v.31, n.8, p.1737-1744, 2011. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.wasman.2011.03.021>

KHAN, M. T.; BRULÉ, M.; MAURER, C.; MÜLLER, J.; OECHSNER, H.. Batch anaerobic digestion of banana waste - energy potential and modelling of methane production kinetics. **CIGR Journal**, v.18, n.1, 2016.

KIM, M.; AHN, Y.; SPEECE, R.. Comparative process stability and efficiency of anaerobic digestion; mesophilic vs. thermophilic. **Water Research**, v.36, n.17, p.4369-4385, 2002.

KUMAR, A.; PRIYADARSHINEE, R.; ROY, A.; DASGUPTA, D.; MANDAL, T.. Current techniques in rice mill wastewater treatment: Emerging opportunities for waste reuse and waste-to-energy conversion. **Chemosphere**, v.164, p.404-412, 2016. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2016.08.118>

LAMI, M.; CHIMDESSA, M.. Biogas Production from Co-Digestion of Poultry Manure and Orange Peel through Thermal Pre-Treatments in Batch Fermentation. **American Scientific Research Journal for Engineering, Technology, and Sciences**, v.38, p.226-246, 2017.

LEITE, V.; LOPES, W.; SOUSA, J.; PRASAD, S.; SILVA, S.. Tratamento anaeróbio de resíduos sólidos orgânicos com alta e baixa concentração de sólidos. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.13, p.190-196, 2009.

MATHIOUDAKIS, V.; GERBENS-LEENES, P. W.; MEER, T. H.; HOEKSTRA, A. Y.. The water footprint of second-generation bioenergy: A comparison of biomass feedstocks and conversion techniques. **Journal of Cleaner Production**, v.148, p.571-582, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.02.032>

METCALF, L.; EDDY, H. P.. **Tratamento de Efluentes e Recuperação de Recursos**. 5 ed. Nova Iorque: McGraw Hill, 2015.

NADALETI, W. C.; LOURENÇO, V. A.; SCHOELER, G. P.; AFONSO, M.; SANTOS, R. F.; VIEIRA, B. M.; LEANDRO, D.; QUADRO, M. S.. Temperaturas mesófilas e termófilas na produção de biogás através de efluente da parboilização do arroz. **Revista Brasileira de Engenharia e Sustentabilidade**, v.5, n.1, p.17-21, 2018.

PARAGINSKI, R. T.; ZIEGLERM, V.; TALHAMENTO, A.; ELIAS,

M. C.. Propriedades tecnológicas e de cocção em grãos de arroz condicionados em diferentes temperaturas antes da parboilização. **Brazilian Journal of Food Technology**, v.17, n.2, p. 146-453, 2014.

QUEIROZ, M. I.; LOPES, E. J.; ZEPKA, L. Q.; BASTOS, R. G.; GOLDBECK, R.. The kinetics of the removal of nitrogen and organic matter from parboiled rice wastewater by cyanobacteria in a stirred batch reactor. **Bioresource Technology**, v.98, p.2163-2169, 2017. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.biortech.2006.08.034>

RYCKEBOSCH, E.; DROUILLON, M.; VERVAEREN, H.. Techniques for transformation of biogas to biomethane. **Biomass and Bioenergy**, v.35, p.1633-1645, 2011. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.biombioe.2011.02.033>

SANTOS, D. G.; TURNES, C. G.; CONCEIÇÃO, F. R.. Bioremediation of Parboiled Rice Wastewater Supplemented with Biodiesel-Derived Glycerol Using *Pichia pastoris* X-33. **Scientific World Journal**, v.2012, 2012. DOI: <http://doi.org/10.1100/2012/492925>

SGORLON, J. G.; RIZK, M. C.; BERGAMASCO, R.; TAVARES, C. R. G.. Avaliação da DQO e da relação C/N obtidas no tratamento anaeróbio de resíduos fruti-hortícolas. **Acta Scientiarum Technology**, v.33, p.421-424, 2011.

SILVEIRA, G. S.. **Estudo de co-digestão anaeróbia de lamas domésticas com o efluente da indústria da fermentação da levedura do pão da empresa Mauri Fermentos**. Dissertação (Mestrado em Energia e Bioenergia) - Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, 2009.

SOUZA, O.; FEDERIZZI, M.; COELHO, B.; WAGNER, T. M.; WISBECK, E.. Biodegradação de resíduos lignocelulósicos gerados na bananicultura e sua valorização para a produção de biogás. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.14, n.4, p.438-443, 2010.

SOUZA, O.; FISCHER, G. A. A.; SOUZA, E. L. S.; SELLIN, N.; MARANGONI, C.. Produção de biogás a partir de resíduo agrícola da bananicultura. In: SIMPÓSIO INTERNACIONAL SOBRE GERENCIAMENTO DE RESÍDUOS AGROPECUÁRIOS E AGROINDUSTRIAS, 3. **Anais**. São Pedro: SBERPAA, 2013.

SPINOSA, W. A.; JÚNIOR, V.S.; GALVAN, D.; FIORIO, J. L.; GOMEZ, R. J. H. C.. Syrup production via enzymatic conversion of a byproduct (broken rice) from rice industry. **Acta Scientiarum Technology**, v.38, n.1, p.13-22, 2016. DOI: <http://doi.org/10.4025/actascitechnol.v38i1.26700>

SRINUANPAN, S.; CHEIRSILP, B.; PRASERTSAN, P.. Effective biogas upgrading and production of biodiesel feedstocks by strategic cultivation of oleaginous microalgae. **Energy**, v.148, p.766-774, 2018. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.energy.2018.02.010>

STEIL, L.. **Avaliação do uso de inóculos na biodigestão anaeróbia de resíduos de aves de postura, frangos de corte e suínos**. Dissertação (Mestrado em Biotecnologia) - Universidade Estadual Paulista, Araraquara, 2001.

SUZUKI, A. B. P.; FEIDEN, A.; FERNANDES, D. M.; MARTINS, G. I.; FARIA, R. A. P.. Utilização de manipueira juntamente com sólidos da cama de aviário em biodigestores para

geração de biogás. **Ambiência Guarapuava**, v.8, n.3, p.809-820, 2012.

TRIPODO, M. M.; LANUZZA, F.; MICALI, G.; COPPOLINO, R.; NUCITA, F.. Citrus waste recovery: a new environmentally friendly procedure to obtain animal feed. **Bioresour Technology**, v.91, n.2, p.111-115, 2014.

VIDAL, T. C. M.. **Geração de biogás a partir de resíduos das agroindústrias de banana e pupunha**. Dissertação (Mestrado em Agroenergia) - Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Cascavel, 2014.

WEILAND, P.. Biogas production: current state and perspectives. **Applied Microbiology and Biotechnology**,

v.85, n.4, p.849-860, 2010. DOI:

<http://doi.org/10.1007/s00253-009-2246-7>

XAVIER, C. A. N.; JUNIOR, J. L.. Parâmetros de dimensionamento para biodigestores batelada operados com dejetos de vacas leiteiras com e sem uso de inóculo. **Engenharia Agrícola**, v.30, p.212-223, 2010.

ZANETTI, A.; ARRIECHE, S.; SARTORI, D. J. M.. Estudo da composição ótima de diferentes resíduos orgânicos para a produção de biogás. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA QUÍMICA, 20. **Anais**. São Paulo: Blucher, 2015.

ZEEUW, W.; LETTINGA, G. Start-up of UASB-reactors. In: AWWTEUROPEAN SYMPOSIUM. **Anais**. Wageningen: 1983.

A CBPC – Companhia Brasileira de Produção Científica (CNPJ: 11.221.422/0001-03) detém os direitos materiais desta publicação. Os direitos referem-se à publicação do trabalho em qualquer parte do mundo, incluindo os direitos às renovações, expansões e disseminações da contribuição, bem como outros direitos subsidiários. Todos os trabalhos publicados eletronicamente poderão posteriormente ser publicados em coletâneas impressas sob coordenação da **Sustenere Publishing**, da Companhia Brasileira de Produção Científica e seus parceiros autorizados. Os (as) autores (as) preservam os direitos autorais, mas não têm permissão para a publicação da contribuição em outro meio, impresso ou digital, em português ou em tradução.