

XI-235 – EFEITO DO GLICEROL COMO CO-SUBSTRATO NA GERAÇÃO DE BIOGÁS E DE BIOMETANO A PARTIR DA DIGESTÃO ANAERÓBIA DE RESÍDUOS DE CASCA DE LARANJA

Maria Teresa de Jesus Camelo Guedes⁽¹⁾; Marcos Henrique Gomes Ribeiro⁽²⁾; Vinícius Duarte Soroka⁽³⁾; Ian Rocha de Almeida⁽⁴⁾; Maria Cristina de Almeida Silva⁽⁵⁾

⁽¹⁾ Engenheira Civil pela Universidade Federal de Campina Grande (UFCG). Mestranda em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental pelo Instituto de Pesquisas Hidráulicas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (IPH/UFRGS). E-mail: mteresag1308@gmail.com

⁽²⁾ Engenheiro Civil pela Universidade Federal de Pernambuco (UFPE). Mestre em Engenharia Civil (Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos) pela UFPE. Doutorando em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental no IPH/UFRGS. E-mail: mhgribeiro@ufrgs.br

⁽³⁾ Engenheiro Ambiental e Mestrando em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental pelo Instituto de Pesquisas Hidráulicas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (IPH/UFRGS). E-mail: vinicius.soroka@gmail.com

⁽⁴⁾ Engenheiro Ambiental e Sanitarista pela Universidade Federal do Pará (UFPA). Mestre e Doutorando em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental pelo IPH/UFRGS. E-mail: ianrochalmeida@gmail.com

⁽⁵⁾ Engenheira de Biotecnologia e Bioprocessos pela Universidade Estadual do Rio Grande do Sul (UERGS). Mestre e Doutora em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental pelo Instituto de Pesquisas Hidráulicas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (IPH/UFRGS). Professora Adjunta do Departamento de Obras Hidráulicas do IPH/UFRGS. E-mail: maria.almeida@ufrgs.br

Endereço^(1,2,3,4,5): Avenida Bento Gonçalves, 9500, Prédio 44302, Agronomia – Porto Alegre – Rio Grande do Sul – RS – CEP: 91501-970 - Brasil

RESUMO

A disposição correta e o aproveitamento energético dos resíduos são um desafio à nível mundial. O Brasil como o maior produtor de suco de laranja e um grande consumidor de biodiesel carece de soluções para disposição e aproveitamento de subprodutos gerados nos processos, como da casca de laranja e glicerol. A digestão anaeróbia é uma alternativa para o tratamento desses subprodutos, com aproveitamento energético. Dessa forma, este trabalho tem como objetivo avaliar o efeito do glicerol bruto como co-substrato na geração de biogás e biometano em digestão anaeróbia de RCL. Para isso, foi realizado experimento em um sistema com reatores batelada, atendendo às diretrizes da norma alemã VDI 4630, operando em temperatura mesofílica (35 °C), por um período de 21 dias, sendo testadas as seguintes configurações nos reatores: Lodo; Lodo + Açúcar; Lodo + Resíduos de Casca de Laranja (RCL); Lodo + RCL + Glicerol Bruto (GB). Os volumes de biogás e de biometano acumulados nos reatores contendo lodo e RCL foram cerca de 210% e 233%, respectivamente, maiores em relação aos reatores com RCL e GB. Apesar disso, os resultados obtidos para a co-digestão de RCL e GB se mostraram promissores para a geração de biogás e biometano, apesar de possíveis efeitos inibitórios causados pelo glicerol durante o processo.

PALAVRAS-CHAVE: Co-digestão, Casa de Laranja, Glicerol, Digestão Anaeróbia, Biogás, Biometano.

INTRODUÇÃO

A busca por fontes de energias renováveis é uma das grandes preocupações da sociedade atual, em resposta aos impactos ambientais decorrentes do uso de combustíveis fósseis (SOLARIN, 2020). Diante disso, alternativas sustentáveis para produção de energia vêm sendo estudadas, como os biocombustíveis, a exemplo do biogás e do biometano (JIMÉNEZ-CASTRO et al., 2020).

Ambos os biocombustíveis supracitados são gerados através da digestão anaeróbia (DA), processo em que grupos de microrganismos, na ausência de oxigênio, degradam compostos complexos em produtos mais simples (SILVA et al., 2018). Os gases do processo podem ser, inclusive, gerados a partir de substratos como resíduos agroindustriais (LI et al., 2021).

A laranja é uma das frutas mais cultivadas mundialmente (CAMARGO et al., 2021) e estima-se que, no processo de fabricação dos sucos, entre 50 a 60% da fruta é transformada em resíduo (MARTÍN et al., 2013). Estes resíduos possuem alta capacidade de biodegradação e podem ser excelentes substratos para DA. Entretanto, apresenta em sua composição o D-limoneno, composto considerado inibitório para o processo (ZEMA et al., 2021).

Uma alternativa para contornar este obstáculo consiste na co-digestão de resíduos de casca de laranja (RCL) com outro substrato, com o intuito de diluir os compostos tóxicos presentes no meio (ROSAS-MENDONZA et al., 2021). O processo, que envolve dois ou mais substratos, além de contribuir na diluição de compostos tóxicos, também está associado a uma maior diversidade microbiana e equilíbrio de nutrientes (KARKI et al., 2021).

O glicerol bruto (GB), composto por uma mistura de glicerol ($C_3H_8O_3$) e impurezas (MARTÍN et al., 2013), é um subproduto resultante do processo de síntese do biodiesel. Quando utilizado na DA, o glicerol bruto pode equilibrar a relação C/N do substrato introduzido no reator e fornecer matéria orgânica capaz de ser facilmente convertida em biogás (RAMOS-SUÁREZ et al., 2014).

Estima-se que a produção de glicerol residual é equivalente a 10% da produção de biodiesel (MARTÍN et al., 2013). Assim, considerando sua disponibilidade e características (periculosidade ambiental, baixo valor agregado, entre outros), o GB pode ser um substrato interessante para a co-digestão com RCL, contribuindo para a diluição do efeito inibidor do D-limoneno.

Desta forma, o presente estudo tem como objetivo avaliar o efeito do glicerol bruto como co-substrato na geração de biogás e biometano em digestão anaeróbia de RCL e, portanto, contribuir com a valorização destes resíduos.

MATERIAIS E MÉTODOS

Foi realizado experimento com um sistema de reatores em batelada, em triplicata, operando em temperatura mesofílica (35 °C), por um período de 21 dias. O sistema atendeu às diretrizes da norma alemã VDI 4630 (2006) e foi composto por reatores de 300 mL preenchidos com os conteúdos apresentados na Tabela 1.

Tabela 1: Delineamento experimental do sistema de reatores em batelada.

Reator	Triplicata	Inóculo (g)	Açúcar (g)	RCL (g)	Glicerol (mL)	NaHCO ₃ (g)
R0 – R2	1	300	-	-	-	3
R3 – R5	2	300	10	-	-	3
R6 – R8	3	268,6	-	31,4	-	3
R9 – R11	4	268,6	-	31,4	3	3

Os resíduos de casca de laranja (RCL) foram obtidos de consumação própria e armazenados em freezer (-20 °C) até o uso, quando foram triturados em liquidificador. O inóculo foi proveniente de reator tipo UASB de uma indústria alimentícia e usados nos reatores em batelada para fornecer a comunidade microbiana necessária ao início ao processo (SOUZA et al., 2020). O glicerol empregado foi oriundo de uma indústria de biodiesel. Durante a operação, foi adicionado alcalinizante (10 g NaHCO₃/L) aos reatores para evitar a acidificação, uma vez que há consumo de alcalinidade no processo, e sendo necessário a fim de se manter o pH na faixa neutra (7-8). Além disso, sacarose (açúcar cristal comercial) foi utilizada para referência dos demais reatores (controle positivo), por ser considerada matéria orgânica de fácil biodegradação. Os reatores da triplicata 1 receberam apenas inóculo e representam o controle negativo dos ensaios.

SISTEMA EXPERIMENTAL

No sistema, apresentado na Figura 1, os reatores (2) foram vedados com uma tampa de borracha com septo (3), para permitir a coleta de gás através de seringa, e ligados por uma mangueira (5) a frascos Boyle-Mariotte (6), preenchidos com água. Conforme o gás era produzido, a água do frasco foi coletada em béqueres (7), sendo possível aferir o volume deslocado – em proveta graduada – e, a partir deste, registrar a geração de gás. O conteúdo dos reatores foi mantido em mistura contínua, através de bandeja agitadora magnética (1), para proporcionar melhor

contato entre os substratos e inóculo. A temperatura ambiente foi controlada por termostato (4), sendo mantida em 35 °C.

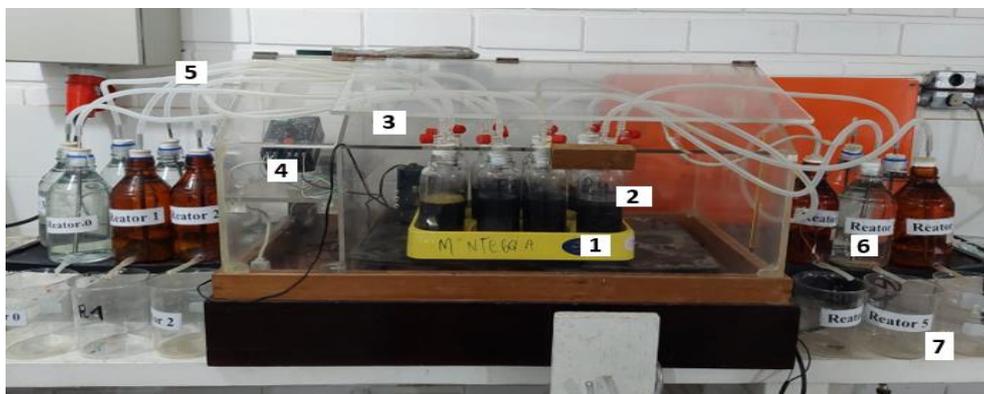


Figura 1: Design experimental do sistema de reatores em batelada.

CARACTERIZAÇÃO FÍSICA E QUÍMICA DOS SUBSTRATOS

Para caracterizar os substratos (RCL e GB) e inóculo utilizados, foram realizadas as seguintes análises, em triplicata, e apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2: Parâmetros físicos e químicos utilizados na caracterização dos substratos e inóculo do sistema experimental.

Parâmetro	Referência
pH	4500+H- APHA (2012)
Sólidos Totais (mg/L)	2540B APHA (2012)
DQO (mg/L)	5220C APHA (2012)
Alcalinidade (mg CaCO ₃ /L)	RIPLEY et al. (1986)
D-limoneno (%)	Scott & Veldhuis (1966)

A caracterização dos RCL seguiu a metodologia APHA (2012), que apresenta o preparo para amostras sólidas. Uma mistura de 5g de casca de laranja e 50 mL de água deionizada foi agitada em incubadora shaker, a 25 °C e 200 rpm por 1 hora. Após isso, o conteúdo foi filtrado a vácuo em papel filtro com porosidade 0,45 µm.

Além da caracterização dos substratos e inóculo, determinou-se o pH do afluente, durante a montagem do experimento, e, ao término, do efluente dos reatores (APHA, 2012).

COMPOSIÇÃO E QUALIDADE DO BIOGÁS

A composição e a qualidade do biogás foram determinadas cinco vezes por semana através de cromatografia gasosa utilizando cromatógrafo DANI GC1000 com detector de condutividade térmica (DCT) e coluna capilar SUPELCO Carboxen- 54 1006 PLOT.

Os volumes de biogás e de biometano foram normalizados às condições pré-definidas de temperatura e pressão (273 K e 1013 hPa), para quantificação e posterior comparação com resultados de demais estudos (EMBRAPA, 2016), de acordo com a Equação 1, apresentado na norma VDI 4630 (2016).

$$V_N = V \cdot \frac{(P - P_W) \cdot T_N}{P_N \cdot T} \text{ (Equação 1)}$$

Onde:

VN: Volume seco de biogás normalizado (NmL ou STP mL)

V: Volume de biogás produzido (mL)

P: Pressão do biogás no dia da leitura ou medição (hPa)

PW: Pressão de vapor da água em função da temperatura ambiente (hPa)

TN: Temperatura normal (273 K)

PN: Pressão normal (1013 hPa)

T: Temperatura do experimento (K)

Para calcular a pressão do vapor de água, dada em função da temperatura ambiente, será utilizada a equação modificada de Buck (1996) (Equação 2):

$$P_W = 6,1121 \cdot e^{\left(\left(18,678 - \frac{T_C}{234,5} \right) \frac{T_C}{257,14 + T_C} \right)} \text{ (Equação 2)}$$

Onde:

PW: Pressão de vapor da água em função da temperatura ambiente em hPa (1 hPa = 0,1 kPa)

TC: Temperatura ambiente do experimento (°C)

Além de normalizar os volumes de biogás e biometano, determinou-se a produção bruta de biogás e de biometano acumulados ao longo do experimento, bem como o rendimento específico de metano (Y_{CH_4}), definido como a quantidade de metano diária ou acumulada dividido pela massa de substrato utilizada, expresso em NmL CH_4/g SV.

ANÁLISE DOS RESULTADOS

Foi realizada análise descritiva dos dados, sendo os resultados obtidos apresentados como média e desvio padrão em todas as amostras, realizadas através do programa Microsoft Excel.

RESULTADOS

CARACTERIZAÇÃO FÍSICA E QUÍMICA DOS SUBSTRATOS E INÓCULO

A caracterização física e química dos substratos, RCL e glicerol, e do inóculo utilizados podem ser visualizados na Tabela 3.

Tabela 3: Caracterização física e química do inóculo e substratos utilizados.

Parâmetro	Inóculo	RCL	Glicerol
pH	7,18 ± 0,02	4,28 ± 0,03	5,74 ± 0,06
Sólidos Totais (%)	12,00 ± 4,56	17,93 ± 0,27	85,03 ± 1,81
Sólidos Voláteis (g%)	8,07 ± 3,21	17,25 ± 0,35	81,18 ± 1,60
Sólidos Fixos (%)	3,94 ± 1,37	0,67 ± 0,08	3,84 ± 0,21
DQO (g/L)	186,90 +55,80	539,93 ± 83,07	1.169,23 ± 263,76
Alcalinidade (mg $CaCO_3/L$)	7.472,53 ± 0,00	2.124,53 ± 253,77	2.190 ± 42,47
D-limoneno (%)	-	0,18 ± 0,00	-

A acidez dos RCL e a elevada carga orgânica do glicerol representam um desafio para o processo anaeróbio. Somado a isso, o baixo teor de sólidos totais (ST) do inóculo podem inibir o crescimento microbiano e consequentemente, comprometer a produção de biogás e de biometano.

Além da caracterização dos substratos e inóculo, determinou-se o pH do afluente, durante a montagem do experimento, e, ao término do procedimento experimental. Na Figura 2 são apresentados os valores médios iniciais e finais para o pH nos reatores em batelada.

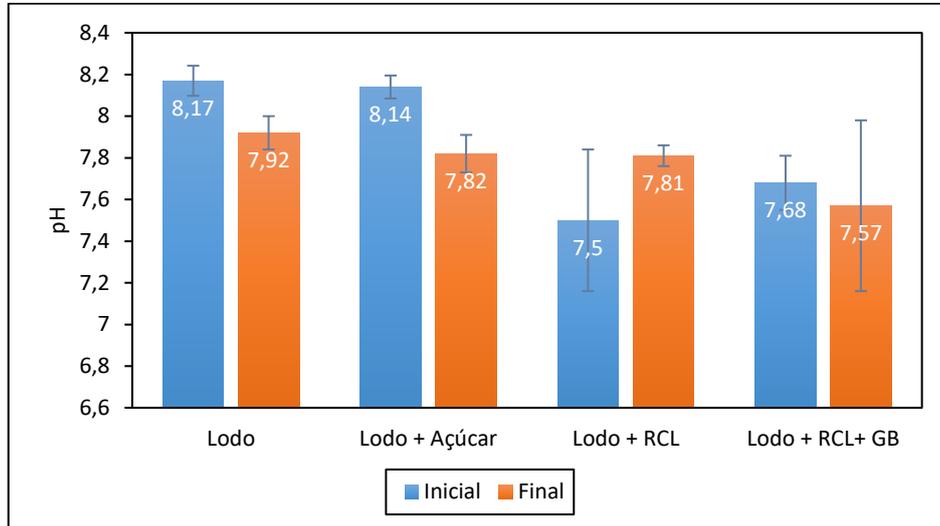


Figura 2: Valores médios iniciais e finais para o pH nos reatores em batelada.

O pH é um parâmetro fundamental no controle do processo anaeróbio. Valores baixos de pH reduzem a atividade metanogênica, causando falhas no processo, sendo a faixa ideal entre 6,5 e 7,5, apesar de as bactérias metanogênicas poderem crescer em pH entre 6,0 e 8,0 (CHERNICHARO, 2016). Ao avaliar os dados da Figura 2, percebe-se que, com a exceção do reator com lodo + RCL, houve redução do pH ao longo do período de incubação, em função, possivelmente, do acúmulo de ácidos graxos. Apesar disso, como foi adicionado alcalinizante (NaHCO_3) em todos os reatores, em dosagem adequada, a atividade anaeróbia não foi prejudicada.

PRODUÇÃO DE BIOGÁS E DE BIOMETANO

Após normalizar os volumes às condições pré-definidas de temperatura e pressão (273 K e 1013 hPa), foi possível determinar os volumes acumulados de biogás e biometano, durante o período de incubação de 21 dias, apresentados nas Figuras 3 e 4, respectivamente

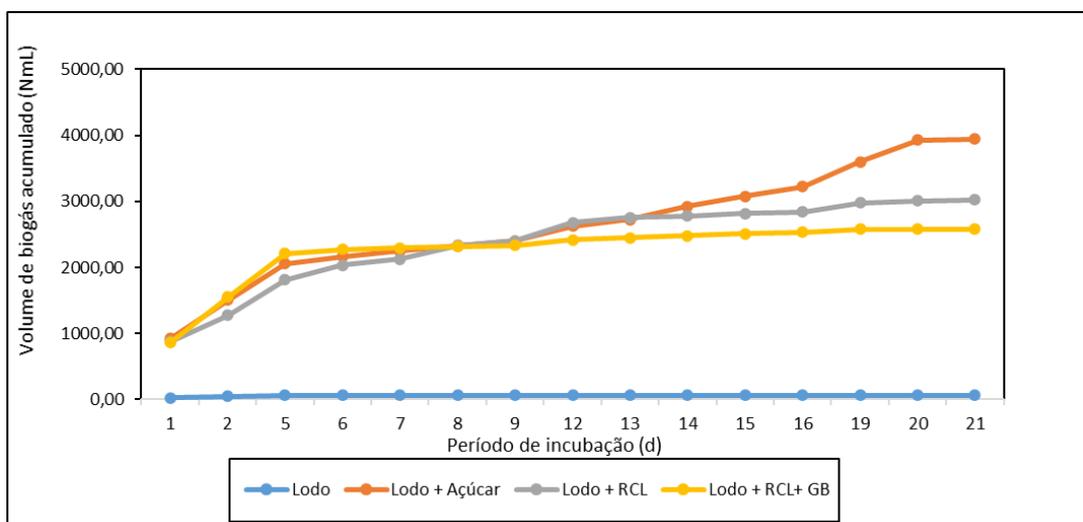


Figura 3: Volume de biogás acumulado (NmL) nas configurações testadas.

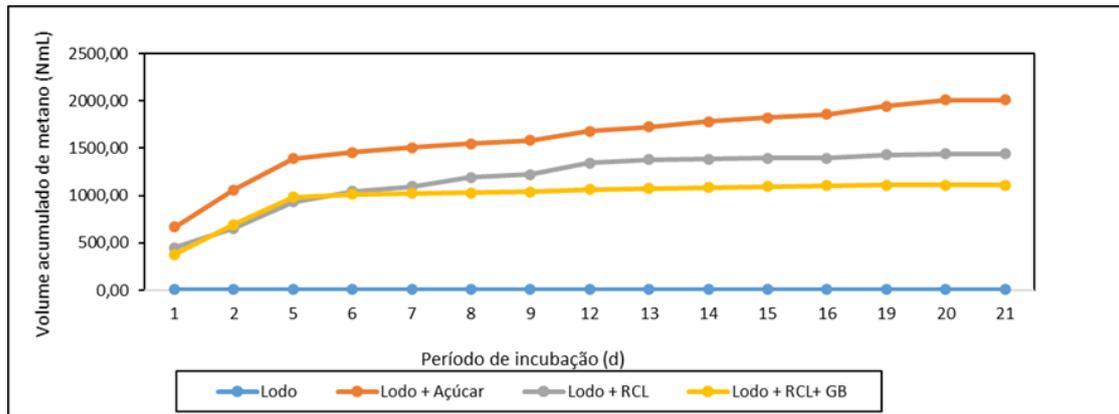


Figura 4: Volume de metano acumulado (NmL) nas configurações testadas.

Pode-se observar, nas Figuras 3 e 4, que nas curvas de volumes acumulados, para todas as configurações experimentais com exceção dos reatores contendo apenas lodo, mais de 70% do total de biogás e de biometano já haviam sido produzidos em torno do 10º dia de transcorrido o experimento, diminuindo gradativamente até cessar a produção.

Percebe-se que, nos primeiros 5 dias de incubação, a configuração com RCL e GB gerou maiores volumes de biogás, em relação às demais triplicatas (Figura 3). Entretanto, posteriormente, os volumes diários reduziram. Isso pode ter ocorrido devido à alta carga orgânica do GB e da produção de subprodutos tóxicos a partir da degradação do GB, como impurezas do glicerol bruto e óleos essenciais da casca de laranja que provavelmente, apresentam acumulação considerável no 5º dia de incubação e, a depender da concentração, podem ser tóxicos aos microrganismos da DA.

Além de avaliar a produção de biogás e de biometano acumulada em função do tempo, é fundamental analisar a porcentagem de metano no biogás. Na Figura 5 são apresentados os volumes de biogás e biometano acumulados e a porcentagem CH₄ nas amostras avaliadas de biogás durante o período experimental. Destaca-se o volume gerado pelas triplicatas de Lodo + RCL e Lodo + RCL + GB que geraram 4.462,5% e 3.810,1%, respectivamente, a mais de biogás em comparação à triplicata contendo apenas lodo.

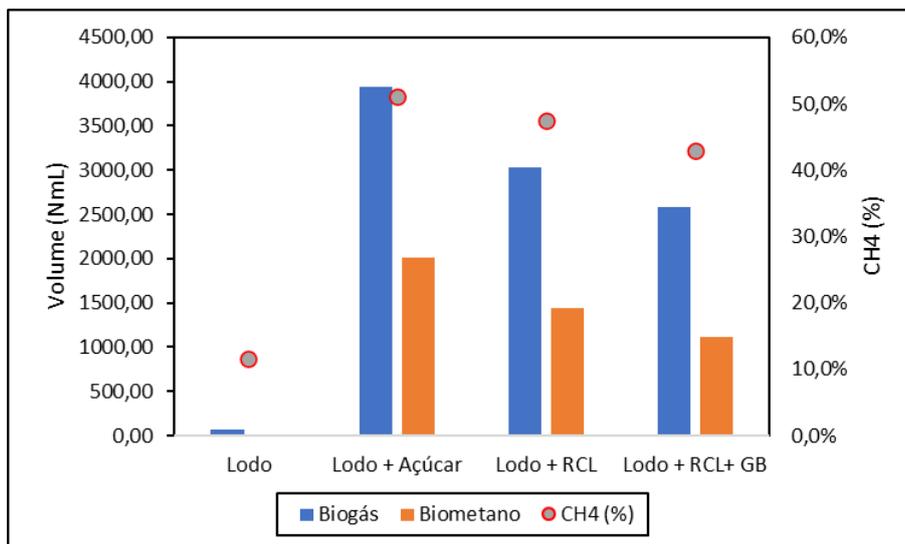


Figura 5: Produção cumulativa de biogás e biometano e porcentagem de metano nas amostras avaliadas (Biometano e biogás são lidos no eixo do lado esquerdo, enquanto CH₄ no eixo do lado direito).

Na Figura 5, considerando o valor médio das triplicatas, a configuração de reatores contendo apenas lodo, conforme esperado, apresentou os volumes acumulados mais baixos de biogás e biometano, 67,8 NmL e 7,81 NmL, respectivamente, representando cerca de apenas 11,5% de CH₄ no biogás.

O baixo volume dos gases obtidos está relacionado com a disponibilidade limitada de matéria orgânica presente nos reatores, uma vez que, nessa configuração, não se adicionou substratos, servindo a este propósito apenas o resultante do decaimento endógeno do próprio material. Já a configuração de lodo e açúcar, também de acordo com o esperado, apresentou os volumes acumulados mais altos de biogás e de biometano, de 3.943,6 NmL e 2.012,1 NmL, respectivamente, com cerca de 51% de CH₄ no biogás. O açúcar é um substrato de fácil biodegradação e foi prontamente consumido pelos microrganismos presentes.

Em relação às configurações contendo apenas lodo e RCL apresentou volumes acumulados de 3.025,5 NmL de biogás e 1.438,2 NmL de biometano. Os volumes acumulados para os reatores com Lodo + RCL + GB foram 2.583,2 NmL de biogás e 1.108,2 NmL de biometano. Assim, percebe-se que os volumes de biogás e de biometano acumulados nos reatores com lodo e RCL foram cerca de 210% e 233%, respectivamente, maiores em relação aos reatores com adição de GB.

Em termos de produção de metano, observou-se que a configuração com lodo e RCL apresentou porcentagem em volume de metano de 47,5% na amostra de biogás. Ao comparar a configuração de RCL com a configuração de RCL + GB, percebe-se que os reatores com glicerol apresentaram percentual ligeiramente inferior, com cerca de 43% de metano na amostra de biogás. Valores semelhantes a esses foram encontrados por Ruiz e Flotats (2016). No estudo foi utilizado resíduo de casca de laranja e lodo industrial em temperatura mesofílica, sendo obtida porcentagem de metano no biogás igual a 43%.

As porcentagens de metano nas diferentes configurações dos reatores são apresentadas na Figura 6. Percebe-se baixas percentuais de CH₄ nos reatores compostos apenas por lodo, sendo a geração de metano cessada a partir do 9º dia de experimento, em virtude da não utilização de substrato e do baixo teor de sólidos totais (ST) do inóculo utilizado.

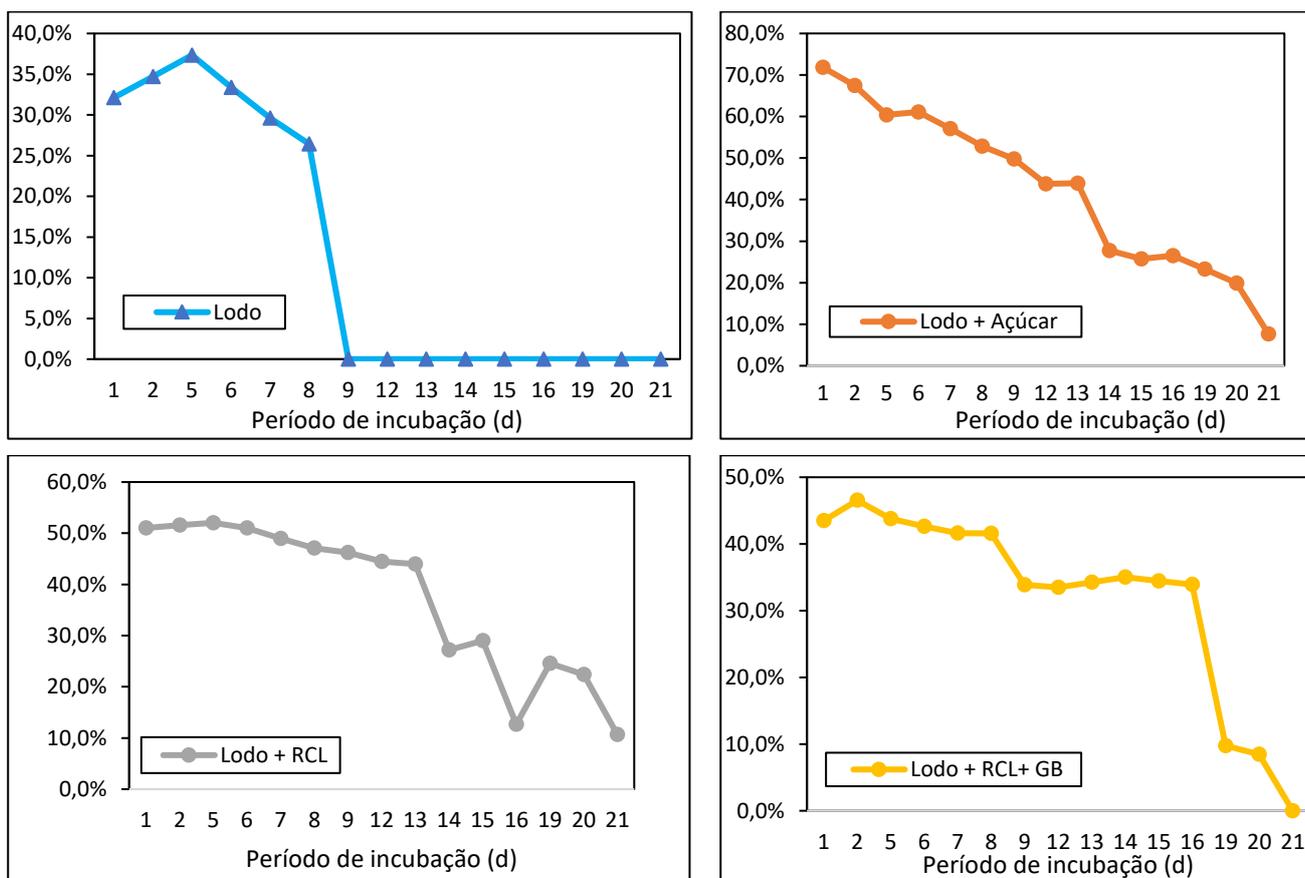


Figura 6: Porcentagens médias de metano ao longo do procedimento experimental para todas as configurações de reatores.

Em relação às configurações contendo os RCL (Figura 6), verifica-se que o conteúdo composto apenas por lodo e RCL apresentou os maiores percentuais de CH₄ em relação às demais triplicatas. Em alguns dias, o percentual de metano atingiu valores superior à 50%, enquanto que para os reatores com Lodo, RCL e GB, os percentuais foram inferiores, da ordem de 40%.

RENDIMENTO ESPECÍFICO DE BIOGÁS E BIOMETANO

Em termos de potencial de geração de biogás e biometano a configuração de Lodo + RCL apresentou potencial de geração de 155,00 NmL/gSV de biogás e 73,68 NmL/gSV de biometano. Já para os reatores contendo Lodo + RCL + GB, os valores foram de 116,47 NmL/gSV e 49,97 NmL/gSV de biogás e de biometano, respectivamente. Assim, verifica-se que a geração de biogás e biometano de Lodo + RCL é mais elevada em relação à configuração de Lodo + RCL + GB.

Acredita-se que a alta carga orgânica do glicerol e as eventuais impurezas nele contidas, prejudiquem a atividade microbiana e conseqüentemente, gerem instabilidade para o sistema. Além disso, percebe-se que apesar da triplicata de Lodo e RCL ter se sobressaído em relação à triplicata contendo GB, os rendimentos específicos de metano e de biogás encontrados são consideravelmente inferiores aos apresentados em estudos na literatura. Martín et al. (2010), ao utilizar cascas de laranja pré-tratadas com destilação a vapor e lodo industrial, em temperatura na faixa mesofílica, obteve rendimento específico de metano superior a 230 NmL/gSV. No estudo de Carvalho et al. (2017), em que foi utilizada casca de laranja pré-tratada com adição de lodo na mesma faixa de temperatura, o potencial de biogás e de biometano foram superiores, de 478 NmL/gSSV e 301 NmL/gSSV.

Apesar dos resultados relativamente inferiores aos encontrados em literatura, verifica-se, com o presente estudo, que a co-digestão anaeróbia de RCL e glicerol pode ser viável, contribuindo para o aproveitamento de subprodutos e para geração de energia. Para estudos futuros, recomenda-se adotar medidas que permitam um processo anaeróbio mais estável, atentando-se para o volume de glicerol utilizado que influencia diretamente na carga orgânica e para a escolha de um inóculo com maior teor de sólidos totais (ST). Além disso, pode-se avaliar o aumento gradual de glicerol, ao utilizar reatores contínuos ou semi-contínuos, ou ainda, submeter o inóculo utilizado a uma pré-adaptação, submetendo-o a concentrações crescentes de glicerol ao longo de um determinado tempo.

CONCLUSÕES

Após avaliar os dados obtidos o procedimento experimental, verifica-se que os volumes de biogás e de biometano acumulados nos reatores contendo lodo e RCL foram cerca de 210% e 233%, respectivamente, maiores em relação aos reatores com RCL e GB. Acredita-se que isso tenha ocorrido em virtude da elevada carga orgânica do glicerol e as eventuais impurezas nele contidas, que podem prejudicar a atividade microbiana e conseqüentemente, geram instabilidade para o sistema. Dessa forma, percebe-se que o GB como co-substrato na DA com RCL, a depender de sua concentração, pode gerar efeito inibitório na produção de biogás e de biometano.

Apesar disso, verifica-se que a utilização de RCL e GB em processo de co-digestão anaeróbia pode ser viável, de modo a contribuir para o aproveitamento de subprodutos e geração de energia. Para estudos futuros, recomenda-se a adoção de medidas que permitam um processo anaeróbio estável, como escolher um inóculo com maior teor de sólidos totais (ST) e avaliar o aumento gradual de concentrações de glicerol bruto ao longo de um determinado tempo, para permitir a maximização da produção de biogás e biometano.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. APHA - AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION. Standard methods for the examination of water and wastewater. 22th Ed., APHA/AWWA/WEF, 2012.
2. BUCK AL (1996) Buck Research Manual.
3. CAMARGO, F. P.; SAKAMOTO, I. K.; DUARTE, I. C. S.; SILVA, E. L.; VARESCHE, M. B. A. Metataxonomic characterization of bacterial and archaeal community involved in hydrogen and methane production from citrus peel waste (*Citrus sinensis* L. Osbeck) in batch reactors. *Biomass and Bioenergy*, v. 149, 2021.

4. CARVALHO, A.; R. FRAGOSO, R.; J. GOMINHO, J.; E. DUARTE, E.; Effect of Minimizing d-Limonene Compound on Anaerobic Codigestion Feeding Mixtures to Improve Methane Yield. *Waste Biomass Valor*, p. 1-9, 2017.
5. CHERNICHARO, C. A. de L. *Reatores Anaeróbios – Princípios de Tratamento biológico de águas residuárias*. 2a ed, Belo Horizonte – MG. Editora UFMG, 2016.
6. EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Padronização de uso das unidades de medida em processos de produção de biogás. Comunicado Técnico. ISSN 0100-8862 Versão Eletrônica. Concórdia - SC, outubro, 2016.
7. JIMÉNEZ-CASTRO, M.P.; BULLERA, L. S.; ZOFFREOB, A.; TIMBOK, M. T.; FORSTERCARNEIRO, T. Two-stage anaerobic digestion of orange peel without pre-treatment: Experimental evaluation and application to São Paulo state. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, v. 8, agosto 2020.
8. KARKI, R.; CHUENHART, W.; SURENDRA, K. C.; SHREST, S.; RASKIM, L.; SUNG, S.; HASHIMOTO, A.; KHANAL, S. K. Anaerobic co-digestion: Current status and perspectives. *Bioresource Technology*, v. 330, p. 125001, jun. 2021.
9. LI, Y.; NI, J.; CHENG, H.; ZHU, A.; GUO, G.; QIN, Y.; LI, Y-Y. Methanogenic performance and microbial community during thermophilic digestion of food waste and sewage sludge in a high-solid anaerobic membrane bioreactor. *Bioresource Technology*, v. 342, 2021.
10. MARTÍN, M. A.; SILES, J. A.; CHICA, A. F.; MARTÍN, A. Biomethanization of orange peel waste. *Bioresource Technology*, v. 101, p. 8993-8999, 2010.
11. MARTÍN, M. A.; FÉRNANDEZ, R.; SERRANO, A.; SILES, J. A. Semi-continuous anaerobic co-digestion of orange peel waste and residual glycerol derived from biodiesel manufacturing. *Waste Management*, v. 33, p. 1633-1639, 2013.
12. RAMOS-SUÁREZ, J. L.; CARRERAS, N. Use of microalgae residues for biogas production. *Chemical Engineering Journal*, v. 242, p. 86–95, abr. 2014.
13. ROSAS-MENDOZA, E. S.; ALVARADO-VALLEJO, A.; VALLEJO=CANTPU, N. A.; SNELL-CASTRO, R.; MARTINEZ-HERNÁNDEZ, S.; ALVARADO-LASSMAN, A. Batch and Semi-Continuous Anaerobic Digestion of Industrial Solid Citrus Waste for the Production of Bioenergy. *Processes*, v. 9, n. 4, p. 648, 8 abr. 2021.
14. SCOTT, W.C., VELDHUIS, M.K. Rapid estimation of recoverable oil in citrus juices by bromate titration. *J. Assoc. Off. Agric. Chem. Int.*, v. 49, p.628–633, 1966.
15. SILVA, F.M.S.; MAHLER, C.F.; OLIVEIRA, L.B.; BASSIN, J.P. Hydrogen and methane production in a two-stage anaerobic digestion system by co-digestion of food waste, sewage sludge and glycerol. *Waste Management*, v. 76, p.339–349, 2018.
16. SOLARIN, S. An environmental impact assessment of fossil fuel subsidies in emerging and developing economies. *Environmental Impact Assessment Review*, v. 85, 2020.
17. SOUZA, F. M.; VIANA, E.; JAEGER, J. M. S.; CANDIANI, G.; SIMÕES, A. F.; FONSECA FILHO, H. Influência do inóculo na co-digestão anaeróbia de resíduos alimentares e grama. *Revista Ibero Americana de Ciências Ambientais*, v.11, n.1, p.146-156, 2020.
18. VEREINDEUTSCHER INGENIEURE - VDI 4630. Fermentation of organic materials: Chacacterization of the substrate, sampling, collection of material data, fermentation tests. Normas Técnicas da Associação Alemã de Engenheiros. Germany, 2006.
19. ZEMA, D. A. FÓLINO, A.; ZAPPPIA, G.; CALABRÓ, P. S.; TAMBURINO, V.; ZIMBONE, S. M. Anaerobic digestion of orange peel in a semi-continuous pilot plant: An environmentally sound way of citrus waste management in agro-ecosystems. *Science of the Total Environment*, v. 630 p. 601-608, 2018.