

Produção de biogás obtida por dejetos suínos com suplementação de glicerol e óleo vegetal residual

A codigestão anaeróbia de resíduos, com foco na produção de biogás para fins de aproveitamento energético é uma forma de promover o uso de uma fonte renovável e acessível de energia. O biogás obtido a partir da degradação de dejetos suínos, juntamente com resíduos da produção de biodiesel (glicerol) e óleo vegetal residual mostra-se como opção para gerar energia limpa e diversificar a matriz energética. Neste trabalho avaliou-se, em escala laboratorial, a geração de biogás obtida por dejetos suínos suplementados com glicerol e óleo residual, visando o incremento nos volumes de biogás produzidos. No experimento foram utilizados 18 reatores, dos quais nove foram submetidos a temperatura de 37°C (mesofílica) e nove foram postos em condições termofílicas (55°C), durante 32 dias de avaliação. Os reatores, em ambas as condições de temperatura, foram divididos em três triplicatas: controle (apenas dejetos suínos), dejetos suínos suplementado com glicerol (3%) e dejetos suínos suplementado com óleo vegetal (3%). Em condições mesofílicas, os resultados apresentaram rendimentos satisfatórios em termos de geração de biogás com relevante teor de metano. As adições de glicerol e óleo vegetal refletiram no incremento da quantidade de biogás produzida quando comparadas com a triplicata controle, sendo que os volumes finais de biogás produzidos pelas amostras controle, glicerol e óleo residual foram de 13.485 mL (com 69,3% CH₄), 26.356 mL (com 66,9% CH₄) e 35.194 mL e (com 69,0% CH₄), respectivamente. Os reatores submetidos a condições termofílicas apresentaram valores reduzidos de biogás e metano, indicando uma possível inibição dos microrganismos.

Palavras-chave: Energia Renovável; Digestão Anaeróbia; Metano.

Biogas production obtained by swine manure with supplementation of glycerol and residual vegetable oil

The anaerobic codigestion of leavings, focusing on the biogas production for the utilization of energy is a way to promote the use of a renewable and accessible source of energy. The biogas obtained by the degradation of swine manure, along with biodiesel production leavings (glycerol) and residual vegetable is an option for generating clean energy and vary the energy matrix. In this study the production of biogas obtained by the degradation of swine manure in laboratorial scale was evaluated with glycerol and residual oil, aiming the increase of the biogas volumes produced. The experiments were conducted by using eighteen reactors, where nine of them were conducted by mesophilic method (37°C) and the other three triplicates were conducted by thermophilic conditions (55°C) over thirty-two running days. The reactors, on both conditions of temperature, were divided in three triplicates: control (only swine manure), swine manure supplemented with glycerol (3%) and swine manure supplemented with vegetable oil (3%). In mesophilic conditions, the results showed satisfactory earnings in terms of biogas generation with good amounts of methane. The glycerol and vegetable oil additions increased the amounts of biogas produced when compared to control triplicate, in which the control, glycerol and residual oil samples resulted in the following volumes: 13.485 mL (containing 69,3% CH₄), 26.356 mL (66,9% CH₄) and 35.194 mL (69,0% CH₄), respectively. The reactors submitted to thermophilic conditions presented a decrease in the biogas and methane values, indicating a possible inhibition of microorganisms.

Keywords: Renewable Energy; Anaerobic Digestion; Methane.

Topic: **Sistemas de Energia Sustentável**

Reviewed anonymously in the process of blind peer.

Received: **10/02/2018**

Approved: **24/03/2018**

Regina Céli Kreusch
Universidade do Vale do Rio dos Sinos, Brasil
<http://lattes.cnpq.br/7955800304564358>
reginaa_kreusch@hotmail.com

Camila Hasan 
Universidade do Vale do Taquari, Brasil
<http://lattes.cnpq.br/1967237941851023>
<http://orcid.org/0000-0002-0101-4039>
chasan@universo.univates.br

Fernanda Mallmann
Universidade do Vale do Taquari, Brasil
<http://lattes.cnpq.br/2772662176473428>
fmallmann2@universo.univates.br

Gabriel Meneghetti Faé Gomes
Universidade do Vale do Rio dos Sinos, Brasil
<http://lattes.cnpq.br/6961116257665962>
gmaef@unisinos.br

Munique Marder
Universidade do Vale do Taquari, Brasil
<http://lattes.cnpq.br/6070031909886243>
mmarder@universo.univates.br

Odorico Konrad 
Universidade do Vale do Taquari, Brasil
<http://lattes.cnpq.br/9946679953072196>
<http://orcid.org/0000-0002-6968-7969>
okonrad@univates.br



DOI: 10.6008/CBPC2179-6858.2018.003.0020

Referencing this:

KREUSCH, R. C.; HASAN, C.; MALLMANN, F.; GOMES, G. M. F.; MARDER, M.; KONRAD, O.. Produção de biogás obtida por dejetos suínos com suplementação de glicerol e óleo vegetal residual. **Revista Ibero Americana de Ciências Ambientais**, v.9, n.3, p.251-263, 2018.
DOI: <http://doi.org/10.6008/CBPC2179-6858.2018.003.0020>

INTRODUÇÃO

A energia é considerada imprescindível para a garantia do desenvolvimento socioeconômico (LUMI et al., 2015). A participação de fontes renováveis nas matrizes energéticas da maioria dos países ainda é pequena, evidenciando a necessidade de investimentos em energias menos poluentes para que se possa atingir autossuficiência e contribuir com a redução das emissões de CO₂. Neste contexto, a produção dos biocombustíveis nos países da América do Sul pode favorecer a diversificação das matrizes energéticas destes e os colocarem em posições favoráveis em autossuficiência energética, além de permitir a redução das emissões de gases nocivos ao meio ambiente (ADAMI et al., 2016).

As fontes renováveis de energia estão ganhando espaço em resposta às crises energéticas e devido à possibilidade de renovação constante em tempo e escala (KONRAD et al., 2014a). A oscilação nos preços e na disponibilidade de derivados do petróleo e combustíveis fósseis, incentivou muitos países a promover o uso de energias renováveis e as emissões decorrentes do uso de combustíveis fósseis têm levado à implementação de programas de incentivo à utilização de combustíveis alternativos, como o biogás, que contribui na eliminação de passivos ambientais ou na minimização destes (BLEY JR., 2015).

Conforme Sørensen (2011), a produção de biogás a partir de biomassa, em processo úmido de fermentação é chamada de digestão anaeróbia. Tradicionalmente, utilizam-se dejetos animais (esterco) como matéria-prima deste processo. Apesar das vantagens de se utilizar este tipo de biomassa na produção de biogás, o potencial dos dejetos não é tão alto devido à baixa relação carbono/nitrogênio (C/N), característica dos dejetos animais, principalmente, do dejetos suíno. Para satisfazer os requisitos de digestão anaeróbia e compensar a deficiência de carbono do dejetos, deve haver outro substrato rico em carbono para codigerir com o estrume e melhorar suas características e eficiência na digestão anaeróbia (NESHAT et al., 2017). Além disso, a codigestão de biomassas residuais é capaz de promover melhores rendimentos na produção de biogás para fins de seu aproveitamento como fonte renovável de energia (HASAN et al., 2017).

Sabe-se que resíduos ricos em carbono podem apresentar um bom potencial de produção de biogás. O óleo vegetal é a principal matéria-prima do biodiesel no Brasil e suas fontes variam de acordo com cada região (CEMIG, 2012). No Brasil existe grande diversidade em relação às fontes para a produção de biodiesel tais como a mamona, o babaçu, o dendê, o algodão, o girassol, a soja, entre outros.

O biodiesel caracteriza-se por ser um biocombustível derivado de fontes renováveis e obtido por meio de uma reação química denominada transesterificação, na qual óleos vegetais (ou gordura animal) reagem com um álcool (metanol ou etanol) com uso de um catalisador. O glicerol, gerado como subproduto dessas reações por meio de simples decantação, pode ser considerado uma substância de alto valor agregado, usualmente aplicado nas indústrias farmacêuticas, de cosméticos, sabão e de explosivos, após processos de purificação (TEIXEIRA, 2012).

Em contrapartida, o aumento na oferta de biodiesel impacta diretamente no aumento de substâncias residuais do processo. Os grandes desafios residem em administrar as quantidades geradas, bem como, encontrar aplicações para os mesmos (TEIXEIRA, 2012). Identifica-se, portanto, a necessidade de

investigações sobre as possíveis aplicações que estes resíduos podem ter, de forma a possibilitar seu reaproveitamento com chances de agregar valor. Nartker et al. (2014) verificaram um desempenho positivo de glicerol residual utilizado para ampliar a produção de gás e o teor de metano do biogás em um processo de codigestão anaeróbia com lodo primário de esgoto.

A produção de energia a partir do biogás, embora ainda incipiente, é uma das tecnologias que adquiriu espaço no Brasil desde a ocorrência das crises energéticas, tais como a do petróleo em meados de 1970. Assim como no resto do mundo, a produção de biogás no Brasil, acontece principalmente no meio rural, com aproveitamento de resíduos agropecuários (CEMIG, 2012). A expansão do uso desta tecnologia é possível e necessária, podendo ser viabilizada a partir da intensificação de estudos e pesquisas aplicadas na área (BLEY JR., 2015; CEMIG, 2012). O objetivo deste estudo foi avaliar a geração de biogás obtida por dejetos suínos suplementados com glicerol e óleo residual, em condições mesofílica e termofílica, identificando a eficiência no desempenho das biomassas residuais utilizadas e seu incremento nos volumes finais de biogás produzido.

MATERIAIS E MÉTODOS

Os ensaios de digestão anaeróbia em escala laboratorial foram realizados no Laboratório de Biorreatores do Tecnovates (UNIVATES) em Lajeado – RS.

Coleta do Substrato

Os dejetos suínos utilizados no experimento foram coletados em uma propriedade rural, localizada no município de Arroio do Meio – RS que cria os suínos na fase de terminação (pré-abate). Visando promover maior homogeneidade ao substrato e garantir a coleta de uma amostra representativa, realizou-se a mistura dos dejetos disponíveis em esterqueira antes da captura do material.

Preparo dos Experimentos de Digestão Anaeróbia

Para os ensaios de digestão anaeróbia foram utilizados 18 reatores de vidro, com volume de 1000 mL, divididos em seis triplicatas, conforme ilustrado na Figura 1. O substrato coletado foi disposto em um único recipiente plástico para possibilitar sua mistura, visando a homogeneização. A partir disso, todos os reatores foram preenchidos igualmente com 500 mL de dejetos suínos, acondicionados separadamente em incubadoras sob as temperaturas de 37 °C e 55 °C e conectados ao sistema automatizado de medição de vazão de biogás, disponibilizado no Laboratório de Biorreatores descrito por Konrad et al. (2016b). Para a identificação do teor de metano (%) no biogás gerado foi utilizado um sensor específico denominado *Advanced Gasmitter*. Foram realizadas coletas e análises de alíquotas de 20 mL do biogás produzido em cada reator, por meio de seringas plásticas, diariamente.

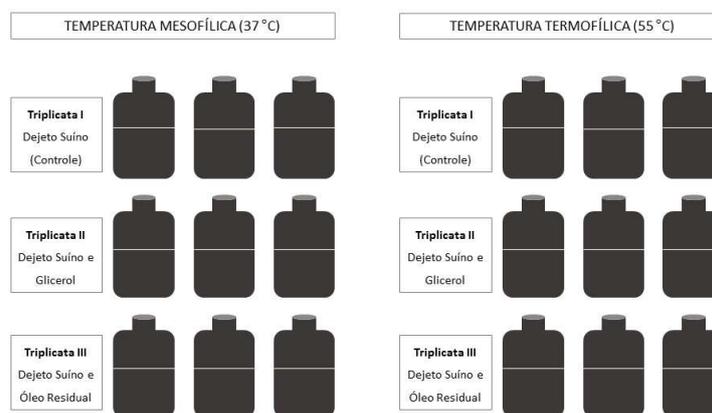


Figura 1: Divisão dos reatores para avaliação dos substratos.

Suplementações com glicerol e óleo residual

As quantidades de glicerol e óleo residual adicionadas durante o experimento foram baseadas em estudos anteriores desenvolvidos pelo Laboratório e disponíveis em literatura (Konrad et al., 2010c; Konrad et al., 2013d), equivalendo a 3% do conteúdo total de biomassa presente no reator (15 mL). As aplicações de glicerol e óleo residual foram efetuadas com o auxílio de uma seringa plástica, duas vezes por semana (em terças e quintas-feiras), totalizando cinco adições, de 3 mL cada. O glicerol utilizado foi fornecido por uma empresa de biodiesel e o óleo vegetal residual foi disponibilizado por um restaurante localizado nas dependências da UNIVATES.

Análises de caracterização das amostras

A caracterização das amostras pré e pós digestão anaeróbia foi realizada com o intuito de contribuir para a discussão dos resultados obtidos nos ensaios, sendo procedida de acordo com as análises e metodologias informadas na Tabela 1.

Tabela 1: Análises físico-químicas de caracterização das amostras e respectivas metodologias utilizadas.

Análise	Método	Referência/Equipamento
pH	Potenciométrico	pHmetro Digimed – DM 2P
Sólidos Totais e Voláteis	Gravimétrico	Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 2450 Solids 2450G. Total, Fixed and Volatile solids in solid and semisolid samples. 20 th edition, 1999.
Carbono Orgânico Total	Titulométrico	Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 5310 Oxidação via úmida. 21 th edition, 2005.
Nitrogênio Total Kjeldahl	Titulométrico	Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 4500 N C Semi-Micro-Kjeldahl. 22 th edition, 2012.
Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO ₅)	Manométrico	Leitor Automático OXITOP® (WTW)

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Produção de biogás

Ensaio Mesofílico

Os resultados da produção de biogás durante os 32 dias de tempo de detenção hidráulica (TDH) do experimento estão ilustrados em gráficos da produção diária, em que são expressos os volumes de biogás e

metano produzidos, o percentual de metano atingido, as adições (ou não) de suplementação e os dias de experimento de cada condição de operação adotada. A Figura 2 ilustra os resultados obtidos para a amostra Controle) do experimento em condições mesofílicas.

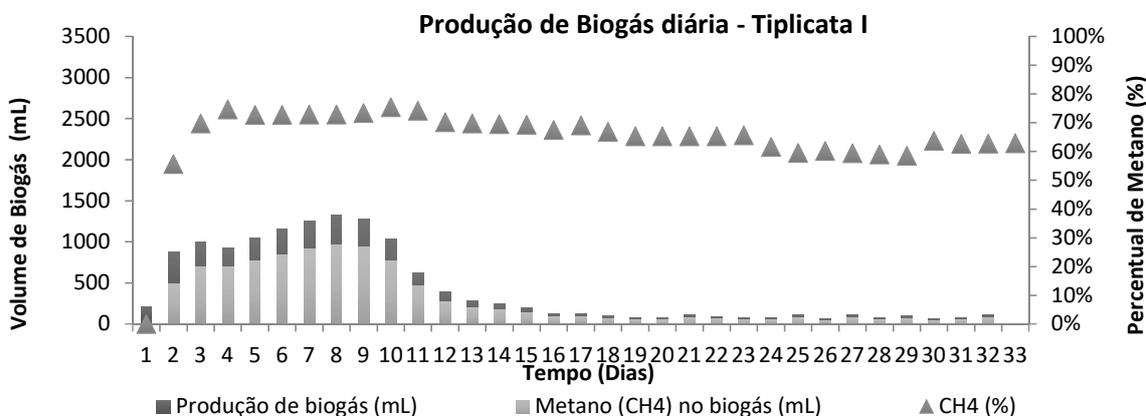


Figura 2: Média da produção diária de biogás obtida pela triplicata controle (dejeito suíno sem adição de suplementação) do experimento mesofílico.

O desempenho apresentado no tratamento controle (somente dejeito suíno) (Figura 2) é típico de um substrato digerido em batelada e sem alimentação em que os volumes diários de biogás produzidos foram irrisórios, após 15 dias de detenção. Os valores correspondentes ao percentual de metano permaneceram predominantemente elevados, acima de 55%, durante todo o experimento. O volume final de biogás produzido foi de 13.485 mL, com 69,3% correspondentes a CH₄, representando uma produção média de biogás de 310 mL Biogás/gSV. A Figura 3 apresenta os resultados obtidos pela Triplicata II, na qual foram adicionadas quantidades de glicerol correspondentes a 3% do volume inicial de substrato, totalizando 15 mL de glicerol adicionado em 5 aplicações.

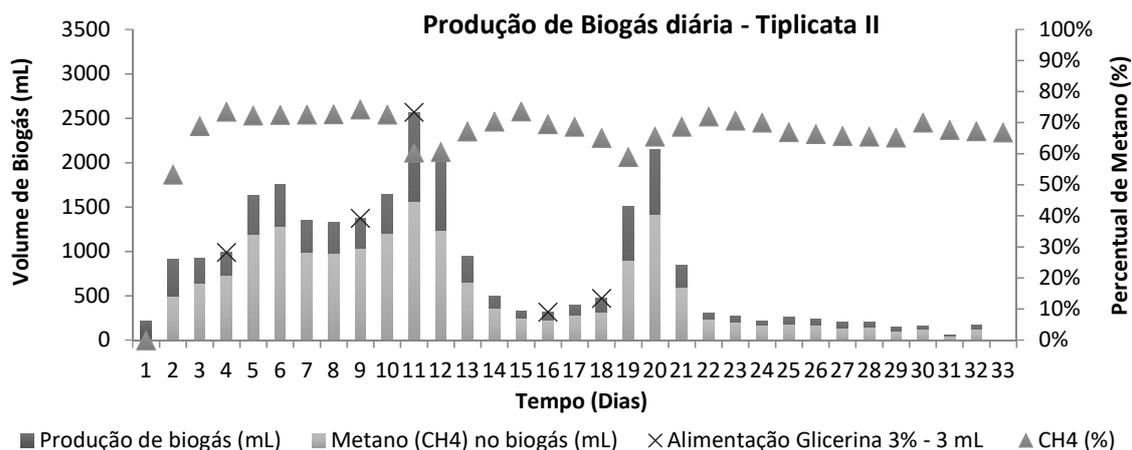


Figura 3: Média da produção diária de biogás obtida pela triplicata suplementada com glicerol do experimento mesofílico.

Ao observar a Figura 3 verifica-se um incremento inicial nos volumes de biogás no tratamento em que se suplementou o dejeito suíno com glicerol, quando comparado à amostra controle. O percentual de metano manteve-se dentro de uma faixa estável e o volume final de biogás produzido nesta triplicata foi de 26.356 mL, com 66,9% correspondentes a CH₄. A partir de uma conversão direta destes valores para uma

unidade que represente a eficiência, relacionada à quantidade total de gSV adicionadas à amostra, obteve-se uma produção média de biogás de 479,2 mL Biogás/gSV. Neste caso, a suplementação com glicerol promoveu um aumento de 48,8% no volume de biogás gerado, sendo esta uma diferença estatisticamente significativa ($p=0,0002$), embora tenha sido observada uma redução no teor de metano, quando comparado ao tratamento sem suplementação.

Estudos mostram uma divergência quanto ao teor adequado de glicerol para suplementar substratos submetidos ao processo de digestão anaeróbia para geração de biogás. De acordo com Fountoulakis et al. (2010), a concentração mais adequada de glicerol em codigestão anaeróbica com lodo de esgoto foi de 1%. Esses autores mostraram que a adição de glicerol podia aumentar a geração de biogás, se sua concentração não excedesse 1% (v/v), já que qualquer aumento adicional de glicerol desencadeava instabilidades no processo de digestão anaeróbica. Silva et al. (2017) em estudo verificaram que o aumento da concentração de glicerol, de 1% a 5%, não inibiu ou causou qualquer instabilidade do processo de digestão anaeróbica com resíduos de comidas, neste caso monitorando a geração de hidrogênio.

Neste estudo verificou-se certa instabilidade durante o processo de digestão anaeróbica no tratamento com suplementação de glicerol. Percebe-se que a produção aumentou, apresentando um intervalo de transição de aproximadamente um-dois dias entre a suplementação e os maiores picos de geração. Após este pico, verifica-se uma inibição na geração do biogás, quando há nova suplementação novos picos de geração de biogás aparecem, seguidos por uma fase de diminuição. Essa instabilidade no processo não é verificada no tratamento controle (somente dejetos suínos), nem no tratamento com suplementação com óleo vegetal residual (Figura 4). Os resultados indicam que o glicerol é rapidamente consumido, o que promove os picos de produção biogás.

A instabilidade do processo pode estar relacionada ao verificado por Jensen et al. (2014). Estes autores avaliaram codigestão anaeróbica de lodos de esgoto suplementados com glicerol, verificando uma diminuição na produção de metano após 3-4 dias de experimento, quando a suplementação foi entre 2 e 4%, sugerindo alguma inibição nestes testes após 3 dias. Os autores concluíram que o glicerol era rapidamente degradado, via lactato, através da rota metabólica do acrilato, para o propionato. E esta acumulação de propionato era o principal fator que provocava os distúrbios durante a digestão anaeróbica, utilizando o glicerol como co-substrato. Fountoulakis et al. (2010) verificaram que a uma suplementação de glicerol acima de 1% acarretava em uma inibição do processo em função da acumulação de ácidos graxos voláteis, o que gerava uma instabilidade similar. Na Figura 4, estão ilustrados os valores obtidos para o tratamento dejetos suínos suplementado com óleo vegetal residual, que recebeu cinco adições periódicas de óleo vegetal residual, totalizando 15 mL deste suplemento.

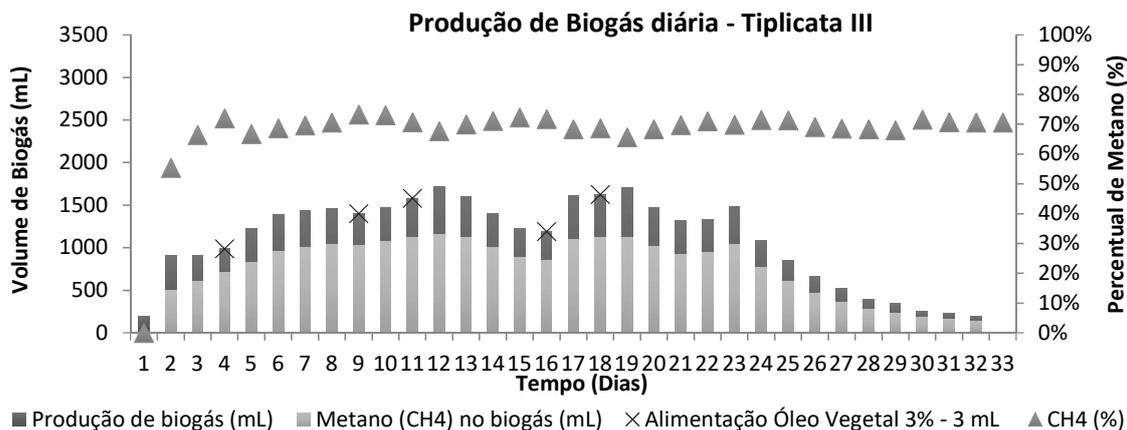


Figura 4: Média da produção diária de biogás obtida pela triplicata suplementada com óleo vegetal residual do experimento mesofílico.

A Figura 4 acima mostra os efeitos da suplementação com o óleo vegetal (3%), em que se verifica um comportamento diferente quando comparado com a Triplicata I (controle) e Triplicata II (glicerol 3%). De modo geral, a produção de biogás neste tratamento ocorreu de forma mais homogênea no período, com menos oscilações entre os volumes diários produzidos. O percentual de metano também se manteve dentro de uma faixa estável e boa e o volume final de biogás produzido nesta triplicata foi de 35.194 mL com 69,0% correspondentes a CH₄. A eficiência média obtida na produção de biogás foi de 602,1 mL Biogás/gSV.

A suplementação com óleo vegetal residual promoveu um aumento de 61,7% no volume de biogás gerado e teor de metano semelhante se comparado ao tratamento sem esta suplementação, sendo esta uma diferença estatisticamente significativa (p=0,0002). O comparativo entre os volumes produzidos pelas triplicatas avaliadas em condições mesofílicas é apresentado na Figura 5, ilustrando que o melhor desempenho nestas condições, foi obtido pela amostra de dejetos suínos suplementada com 3% de óleo vegetal residual.

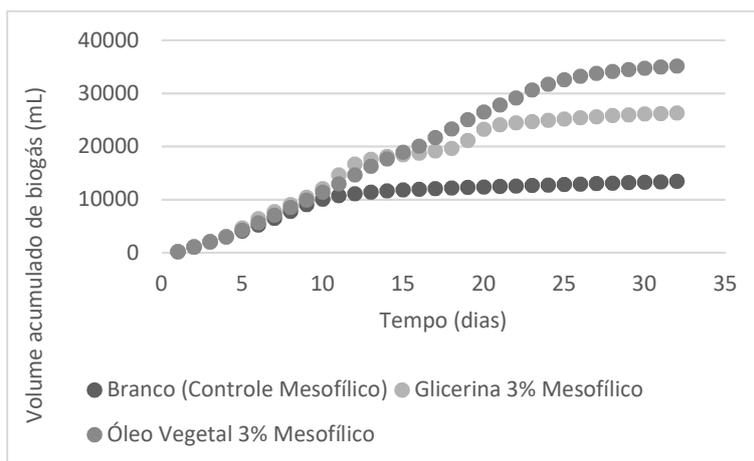


Figura 5: Média dos valores acumulados de biogás no decorrer do experimento para todas as triplicatas submetidas a condições mesofílicas.

Os primeiros dias de experimento podem ser interpretados no gráfico com comportamentos relativamente semelhantes visto que todas as triplicatas iniciaram com as mesmas condições no interior dos reatores (substrato dejetos suínos). As triplicatas II e III tiveram suas primeiras adições de suplementação

(glicerol e óleo, respectivamente) no 4º dia de experimentação. Devido a este fato, bem como as inserções subsequentes, torna-se possível notar os distintos comportamentos nas produções de biogás de cada triplicata. Destaca-se o menor volume para o controle, seguido da triplicata codigerida com glicerol e, por fim, a triplicata suplementada com óleo residual, sendo esta última caracterizada pela produção do maior volume de biogás. Ressalta-se, no entanto, que este incremento obtido pelo óleo residual, superior ao do glicerol, pode ser justificado com base no teor de SV presentes nestas biomassas, uma vez que 15 mL de glicerol representaram 11,5 gSV, enquanto que 15 mL de óleo residual continham 14,95 gSV. Deste modo, a diferença percentual de aproximadamente 23% no teor de SV adicionado culminou para uma diferença percentual de 25% no volume final de biogás obtido pela amostra suplementada com óleo residual, demonstrando a intrínseca relação entre estas duas variáveis.

Ensaio Termofílico

A temperatura é um fator que influencia significativamente a atividade microbiana e, portanto, o desempenho em um processo de digestão anaeróbia. A velocidade de conversão anaeróbia da matéria orgânica em metano aumenta com o aumento da temperatura, porém considera-se as faixas mais eficientes a temperaturas de 32 a 40 °C para microrganismos metanogênicos mesofílicos e de 50 a 58 °C para termofílicos (BITTON, 2005; KHANAL, 2008). Diferente dos resultados obtidos pelas amostras submetidas ao ensaio em condições mesofílicas, as triplicatas incubadas em condições termofílicas demonstraram valores de produção de biogás e metano irrisórios. Os resultados obtidos neste ensaio estão apresentados na Tabela 2.

Tabela 2: Média dos valores acumulados de biogás no decorrer do experimento para as triplicatas submetidas a condições termofílicas.

Amostra	Biogás (mL)	Metano (mL)	Outros Gases (mL)	CH ₄ (%)
Triplicata I (Controle)	720,2	40,3	679,9	5,6
Triplicata II (3% Glicerol)	476,2	24,6	451,6	5,2
Triplicata III (3% Óleo Vegetal)	588,1	21,3	556,8	5,3

Considerando que os substratos e a metodologia reproduzida para ambas as condições foram iguais, alterando-se apenas a temperatura de incubação a 55°C, propõe-se a hipótese de que houve um processo de inibição na atividade dos microrganismos, para explicar os baixos volumes da produção de biogás. Neste caso a temperatura elevada apresenta-se como a principal causa. Acredita-se que a inserção direta das amostras à temperatura de 55 °C possa ter provocado a morte dos microrganismos e, portanto, sugere-se para próximos estudos que seja feito o aumento gradual na temperatura, possibilitando maior tempo para adaptação destes à temperatura mais elevada.

Esta hipótese pode ser explicada com base nos estudos propostos por Kim e Lee (2016) que, ao examinarem a resposta de um reator anaeróbio contínuo a uma série de mudanças de temperatura em uma ampla gama de 35-65 °C, observaram que o reator apresentou desempenho estável dentro da faixa de temperatura de 35-45 °C, sendo a taxa de produção de metano máxima a 45 °C (26% maior do que à 35 °C). Contudo, o aumento subsequente para 50 °C induziu a uma queda súbita no desempenho com uma cessação

completa da produção do metano, indicando que o intervalo de temperatura entre 45 °C e 50 °C teve um impacto crítico na transição da atividade metanogênica do reator de mesofílico para termofílico. Esta perturbação do processo foi associada a uma reestruturação da comunidade microbiana do reator, particularmente dos metanógenos. Uma vez restaurada, pela alimentação interrompida por cerca de dois meses, o reator manteve um desempenho bastante estável sob condições termofílicas até que voltou a ser perturbado a 65 °C. Os autores sugerem em seu estudo que não há necessidade de temperaturas elevadas para manter a melhor produção de metano nos reatores e isso contribui com a redução de custos operacionais destes sistemas.

Caracterização das amostras

Os valores médios obtidos nas análises físico-químicas dos substratos avaliados neste estudo estão ilustrados na Tabela 3, permitindo relacionar e comparar os resultados das análises obtidas nas amostras pós-digestão com a amostra referência, caracterizada antes dos ensaios (pré-digestão). De acordo com Chernicharo (1997), os microrganismos metanogênicos apresentam crescimento ótimo na faixa de pH entre 6,6 e 7,4, embora seja possível obter estabilidade na formação de metano numa faixa mais ampla, entre 6,0 e 8,0.

Tabela 3: Análises e resultados obtidos antes e após a experimentação.

Análises	Pré-Digestão Dejeto Suíno	Pós-Digestão					
		Controle		3% Glicerol		3% Óleo	
		Meso	Meso	Meso	Termo	Meso	Termo
pH	7,17	7,25	7,25	7,18	5,69	7,44	6,33
Sólidos Totais (%)	11,3	10,6	10,6	10,1	10,42	10,5	12,15
Sólidos Voláteis (%)	8,7	7,6	7,6	7,5	8,02	7,9	9,74
Carbono (mg/L)	37.118	35.670	35.670	34.635	39.449	40.183	55.250
Nitrogênio (mg/L)	6.149	6.529	6.529	5.567	5.681	5.689	5.636
DBO ₅ (mg/L)	40.000	3.000	3.000	4.000	38.000	5.000	37.000

As análises evidenciam que o pH de todas as amostras se manteve na faixa adequada, embora seja possível notar, nas amostras submetidas ao ensaio termofílico, uma diminuição no pH. Para o ensaio mesofílico, é possível afirmar que a estabilidade no pH indica equilíbrio entre a geração de ácidos graxos voláteis (AGV) e a assimilação destes pelos microrganismos para posterior conversão em metano. Este equilíbrio ocorre devido ao aumento de alcalinidade nos reatores com o consequente tamponamento do sistema, o que não permite o acúmulo de AGV e a queda do pH, mantendo estáveis as atividades microbianas (FERNANDES et al., 2006). A alcalinidade presente no meio pode ter íntima relação com a presença de amônia oriunda do dejetos suíno. Lansing et al. (2010) consideraram benéfica a alcalinidade dos dejetos oriundos da produção animal utilizados com a finalidade proporcionar estabilidade aos processos de biodigestão anaeróbia, implicando em resistência à acidificação.

A remoção de sólidos totais em experimentos de digestão anaeróbia é, normalmente, uma consequência da remoção dos sólidos voláteis, visto que os sólidos fixos dificilmente se alteram por relacionarem-se com a parcela inorgânica/mineral do substrato. No ensaio mesofílico, todas as amostras apresentaram reduções nos sólidos totais e voláteis, considerando pré e pós-digestão das mesmas. As

remoções dos SV foram de 9,2% (3% Óleo), 12,6% (Controle) e 13,8% (3% Glicerol), estes valores podem inicialmente parecer baixos, no entanto, é preciso considerar que durante o andamento dos experimentos houve adição de SV nas amostras suplementadas não contabilizados na caracterização da amostra mantida como controle. A adição de material nos reatores resultou em um acréscimo de 11,50 gSV (glicerol) e 14,95 gSV (óleo residual), o que mudou a concentração inicial de 43,5 gSV (controle) para 55 gSV e 58,45 gSV para as triplicatas suplementadas, com glicerol e óleo, respectivamente. Mesmo com resultados positivos, a baixa remoção do percentual de SV adicionados podem indicar o consumo incompleto dos SV nas amostras. As amostras do ensaio termofílico, com exceção da amostra controle, apresentaram acúmulo de ST e SV resultantes da ineficiência da conversão do material adicionado em biogás, fato que se relaciona diretamente com o desempenho destas amostras na produção de biogás.

Conseqüentemente, também foi observado aumento no teor de carbono das amostras do ensaio termofílico, justificado pela mesma razão do acúmulo de ST e SV. No ensaio mesofílico, com exceção da amostra suplementada com 3% de óleo, as demais apresentaram redução no teor de carbono comparativamente à amostra controle, sendo este o desempenho esperado, visto que o carbono orgânico é o precursor para a formação das moléculas de CH₄ e CO₂ que compõe o biogás. O resultado negativo de remoção obtido na amostra suplementada com óleo converge com a menor remoção atingida em seu teor de SV também, porém, considerando que os resultados de produção de biogás por esta amostra foram bastante satisfatórios, este acréscimo no teor de carbono pode estar atrelado ao acúmulo de residual de carbono (não degradado) constituinte da biomassa de suplementação (óleo residual).

Os valores finais obtidos em relação ao nitrogênio, com exceção da amostra controle do ensaio mesofílico, demonstraram redução, se comparados à amostra inicial. Isso indica que as suplementações não contribuíram para incremento do nitrogênio e a redução obtida pode ser atribuída ao fato de que os microrganismos da digestão anaeróbia se utilizam deste nutriente para o desenvolvimento de suas atividades metabólicas.

A suplementação com compostos carbônicos é realizada com a intenção de colaborar na relação dos elementos carbono e nitrogênio. Visto que, comumente tem-se uma maior quantidade de nitrogênio nos substratos oriundos de dejetos animais. A intenção é promover o equilíbrio dos recursos nutricionais e físico-químicos disponíveis. O valor da relação C/N do dejetos suíno pré experimento era de 6,12 - abaixo da faixa indicada por literaturas como sendo a ideal (Relação C/N de 20 a 30:1), no entanto, experimentos desenvolvidos por Luna (2003) utilizando como substratos resíduos sólidos vegetais, também apresentaram a relação C/N em uma faixa abaixo da recomendada e do mesmo modo não se verificou efeito adverso ao processo de bioestabilização. Acredita-se, no entanto, que se fosse estabelecida uma melhor condição entre os parâmetros de carbono e nitrogênio inicialmente, ampliando o fornecimento de carbono aos reatores, a geração de biogás e metano poderia ser ainda mais eficiente do que a obtida, e isso de fato foi verificado nas amostras do ensaio mesofílico, onde se adicionou o glicerol e o óleo residual como potenciais fontes de carbono.

No ensaio termofílico as remoções de DBO₅ não estiveram de acordo com os percentuais esperados para um tratamento biológico eficiente. No ensaio mesofílico, os percentuais de remoção de DBO₅ variaram de 87,5% a 92,5% nas amostras digeridas. Este parâmetro indica a eficácia do tratamento biológico, via digestão anaeróbia, visto que se refere à conversão de matéria orgânica biodegradável por parte da ação dos microrganismos. Estudos de Rodrigues et al. (2016), ao avaliarem a eficiência nas remoções de DBO proporcionadas pelo tratamento de efluentes de um frigorífico de aves, por meio de um reator UASB, apontaram valores de remoção que variaram, de 83 a 99% para a DBO, muito próximos aos índices de eficiência atingidos neste estudo.

Análise estatística

Tendo em vista a análise e validação dos resultados obtidos no experimento, fez-se análises estatísticas a partir do software BioEstat 5.3. Para observar a variância dos valores de produção de biogás nas diferentes condições, executou-se a análise de variância ANOVA (1 critério) seguido do teste de Tukey (a 95% de confiança). Além disto, com a finalidade de identificar qual a relação de melhor rendimento entre a geração de biogás e metano, utilizou-se a Correlação de Pearson.

O teste de Tukey valida a diferença dos resultados obtidos pela amostra controle, quando comparada ao tratamento com glicerina 3% e óleo 3%. Na análise entre as amostras com suplementações (glicerina e óleo vegetal residual), não foram evidenciadas diferenças estatísticas na produção de biogás. Deste modo, em comparação com o controle, pode-se afirmar que a inclusão de ambas as suplementações provocou incrementos significativos na geração de biogás.

Na Correlação de Pearson, observou-se boa interação entre as quantidades de biogás e metano produzidas nas diferentes condições de experimentação. Importante destacar que o número de “r” encontrado é avaliado quanto à sua proximidade de 1, indicando o grau de correlação entre as variáveis, neste caso biogás e metano. A amostra que recebeu a dopagem de 3% de óleo apresentou valor de 100% ($r=1,0000$), destacando-se quando comparada com os demais tratamentos. Os resultados de $r=0,9999$ e $r=0,9998$ estão associados ao controle e glicerina, respectivamente.

CONCLUSÕES

Considerando a busca por alternativas que possam viabilizar a produção de biogás em escala comercial, no sentido de oferecer esta fonte de energia como elemento de diversificação da matriz energética brasileira é que se justifica a relevância deste estudo. Neste sentido, esta investigação permitiu comparar a eficiência da utilização de duas fontes de biomassas residuais que podem ser utilizadas como suplemento para a produção de biogás, por meio da biotecnologia da digestão anaeróbia.

A codigestão em condições mesofílicas, tanto com uso de glicerol quanto de óleo proporcionaram resultados de produção de biogás e metano melhores e estatisticamente distintos quando comparados com a digestão anaeróbia da amostra controle, contendo apenas dejetos suínos como substrato. Com base nos resultados obtidos, pode-se concluir que ambas as biomassas residuais empregadas como suplemento no

processo mesofílico permitiram a ampliação nos volumes finais de biogás gerado. No entanto, a inclusão do óleo vegetal residual conferiu o maior incremento com a mesma quantidade de material em volume adicionado, devido a este possuir maior quantidade de gSV em relação ao glicerol.

As amostras submetidas ao ensaio em condições termofílicas de temperatura não apresentaram desempenho esperado. Sugere-se que para estudos futuros seja prevista uma fase de ambientação das amostras com a ampliação gradual da temperatura, visto que condições termofílicas são sugeridas como potenciais para o incremento nos volumes de biogás.

REFERÊNCIAS

ADAMI, A. C. O.; BACCHI, M. D.. Evolução da participação das fontes de energias renováveis nas matrizes energéticas dos países da América do Sul. **Revista Espacios**, v.37, n.19, p.01, 2016.

APHA; AWWA; WEF. American Public Health Association; American Water Works Association; Water Environment Federation. **Standard methods for the examination of water and wastewater**. 20 ed. Washington, 1999.

APHA; AWWA; WEF. American Public Health Association; American Water Works Association; Water Environment Federation. **Standard methods for the examination of water and wastewater**. 21 ed. Washington, 2005.

APHA; AWWA; WEF. American Public Health Association; American Water Works Association; Water Environment Federation. **Standard methods for the examination of water and wastewater**. 22 ed. Washington, 2012.

BITTON, G.. **Wastewater microbiology**. 3 ed. Hoboken: John Wiley & Sons, 2005.

BLEY JR., C.. **Biogás: a energia invisível**. 2 ed. São Paulo: CIBiogás; Foz do Iguaçu: ITAIPU Binacional, 2015.

CEMIG. Companhia Energética de Minas Gerais. **Alternativas Energéticas: uma visão Cemig**. Belo Horizonte: Gerência de Alternativas Energéticas, 2012.

CHERNICHARO, C. A. L.. **Reatores anaeróbios: princípios do tratamento biológico de águas residuárias**. Belo Horizonte: Politécnica, 1997.

FERNANDES, G. F. R.; OLIVEIRA, R. A.. Desempenho de processo anaeróbio em dois estágios (reator compartimentado seguido de reator UASB) para tratamento de águas residuárias de suinocultura. **Revista Engenharia Agrícola**, v.26, n.1, p.243-256, 2006.

FOUNTOULAKIS, M. S.; PETOUSI, I.; MANIOS, T.. Co-digestion of sewage sludge with glycerol to boost biogas production. **Waste Management**, v.30, n.10, p.1849-1853, 2010. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.wasman.2010.04.011>

HASAN, C.; MARDER, M.; FEITOSA, A. K.; MACHADO, C. A.; GONÇALVES, T. E.; FELDKIRCHER, T.; KONRAD, O.. Análise da sinergia de resíduos agroindustriais submetidos a biodigestão anaeróbia visando biogás para aproveitamento energético. **Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais (RICA)**, v.8, n.2, 2017.

JENSEN, P. D.; ASTALS, S.; LU, Y.; DEVADAS, M.; BATSTONE, D. J.. Anaerobic codigestion of sewage sludge and glycerol, focusing on process kinetics, microbial dynamics and sludge dewaterability. **Water Research**, v.67, p 355-366, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.watres.2014.09.024>

KHANAL, S. K.. **Anaerobic Biotechnology for Bioenergy Production: Principles and Applications**. 1 ed. Ames: Wiley-Blackwell, 2008.

KIM, J.; LEE, C.. Response of a continuous anaerobic digester to temperature transitions: A critical range for restructuring the microbial community structure and function. **Water Research**, v.89, p.241-251, 2016. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.watres.2015.11.060>

KONRAD, O.; SCHMEIER, N. P.; ANATER, A.; CASARIL, C., LUMI, M.. Geração de biogás através de digestão anaeróbia utilizando substrato suíno e bovino. **Rev. Acad., Ciênc. Agrár. Ambient.**, Curitiba, v.12, n.3, p.209-214, 2014a. DOI: <http://doi.org/10.7213/academica.12.03.AO06>

KONRAD, O.; AKWA, J. V.; KOCH, F. F.; LUMI, M.; TONETTO, J. F.. Quantification and characterization of the production of biogas from blends of agro-industrial wastes in a large-scale demonstration plant. **Acta Scientiarum Technology**, v.38, p.415-421, 2016b.

KONRAD, O.; HEBERLE, A. N. A.; CASARIL, C. E.; KAUFMANN, G. V.; LUMI, M.; DALL' OGLIO, M.; SCHMITZ, M.. Avaliação da produção de biogás e geração de metano a partir de lodo de estação de tratamento de efluentes e glicerina residual. **Revista Destaques Acadêmicos**, v.2, n.4, p.49-55, 2010c.

KONRAD, O.; LUMI, M.; HEBERLE, A. N. A.; TONETTO, J. F.; CASARIL, C. E. A influência da codigestão de óleo vegetal residual na geração de biogás por lodo de estação de tratamento de efluentes. **Revista Brasileira de Energias Renováveis**, v.2, n.4, p.1-20, 2013d. DOI: <http://dx.doi.org/10.5380/rber.v2i4.34840>

LANSING, S.; MARTIN, J.F.; BOTERO, R.B.; SILVA, T. N.; SILVA, E. D.. Methane production in low-cost, unheated, plug-flow digesters treating swine manure and used cooking grease. **Bioresource Technology**, n.101, p.4362-4370, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2010.01.100>

LUMI, M.; KONRAD, O.; FLORES, J. A.; MARDER, M.; ZORZI, L.. Potencial de geração de biogás a partir da suplementação de óleo de babaçu em dejetos de animais. **Ciência e Natura**,

Santa Maria, v.37, n.42, p.756-766, 2015. DOI:

<http://dx.doi.org/10.5902/2179460X19369>

LUNA, M. L. D.. **Tratamento anaeróbio de resíduos sólidos orgânicos para pequenas comunidades**. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal da Paraíba, Campina Grande, 2003.

NARTKER, S.; AMMERMAN, M.; AURANDT, J.; STOGSDIL, M. HAYDEN, O.; ANTLE, C.. Increasing biogas production from sewage sludge anaerobic co-digestion process by adding crude glycerol from biodiesel industry. **Waste Management**, v.34, n.12, p.2567–2571, 2014. DOI:

<http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2014.08.017>

NESHAT, S. A.; MOHAMMADI, M., NAJAFPOUR, G. D.; LAHIJANI, P.. Anaerobic co-digestion of animal manures and lignocellulosic residues as a potent approach for sustainable biogas production. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v.79, p.308-322, 2017. DOI:

<https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.137>

SILVA, F. M. S.; OLIVEIRA, L. B.; MAHLER, C. F.; BASSIN, J. P.. Hydrogen production through anaerobic co-digestion of food waste and crude glycerol at mesophilic conditions. **International Journal of Hydrogen Energy**, v.42, n.36, p.22720–22729, 2017. DOI:

<https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2017.07.159>

SØRENSEN, B.. **Renewable Energy: physics, engineering, environmental, impacts, economics & planning**. 4 ed. Burlington: Academic Press - Elsevier, 2011.

TEIXEIRA, E. C.. **BIODIESEL: Impacto Ambiental Agrônômico e Atmosférico**. Cadernos de Planejamento e Gestão Ambiental. Porto Alegre: FEPAM, 2012.

WTW. Wissenschaftlich Technische Werkstätten GmbH. Manometrische BSB-Meßgeräte. **Manual de Instruções Oxitop**. Germany, 2008.

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.