

PRODUÇÃO DE BIOGÁS DE SUBPRODUTOS DA INDÚSTRIA SUCROENERGÉTICA

ROSE MARIA DUDA¹; BRUNA RODRIGUES SIQUEIRA STURARO²
KAREN CRISTINA ROCHA DE OLIVEIRA SILVA³; ROBERTO ALVES DE OLIVEIRA⁴

¹Fatec de Jaboticabal – Coordenadoria de Biocombustíveis

^{2,3} Mestrandas do Programa de pós graduação em Microbiologia Agropecuária, Universidade Estadual Paulista (UNESP), Campus de Jaboticabal.

⁴ Docente do Departamento de Engenharia, UNESP de Jaboticabal.

e-mail institucional do apresentador: rose.duda@fatec.sp.gov.br

Biogas production from byproducts of the sugar energy industry

Eixo Tecnológico: Ambiente e saúde

Resumo

A necessidade de redução da poluição global contribuiu para o desenvolvimento de fontes de energia renováveis, como o etanol e o biogás. O etanol brasileiro é produzido de maneira sustentável, mas o processo produtivo gera grandes quantidades de sub-produtos, como a vinhaça, torta de filtro e o melaço. Portanto o objetivo deste trabalho foi avaliar a codigestão anaeróbia da vinhaça e melaço de cana-de-açúcar na safra (Safras 1 e 2) e digestão do melaço na entre-safra (Entressafra), utilizando dois reatores anaeróbios de fluxo ascendente com manta de lodo (UASB), em série. Para a suplementação de nitrogênio e fósforo do afluente foi utilizada a torta de filtro, um subproduto da produção de açúcar. A unidade experimental foi constituída por dois reatores UASB em série, com volumes de 12,6 L (primeiro estágio – R1) e 5,6 L (segundo estágio – R2). O tempo de detenção hidráulico aplicado no R1 e R2 foram de 24,0 e 10,7 horas, respectivamente. As cargas orgânicas volumétricas (COV) médias aplicadas no R1, na safra, foram de 4,8; 29,5; 31,7 e 11,0 g DQO total (L d)⁻¹ nas fases 1, 2, 3 e 4, respectivamente. As produções volumétricas de metano médias obtidas foram de 0,39 a 2,55 L CH₄ (L d)⁻¹, no R1 + R2, respectivamente. Observou-se uma carga de choque, indicando que para as condições estudadas o limite de COV é de 45 g DQOtotal (L d)⁻¹. Na entressafra e safra 2, as COV médias aplicadas foram de 8,9 e 22,10 g DQOtotal (L d)⁻¹, respectivamente e as PVM médias de metano foram de 0,89 e 1,74 L CH₄ (L d)⁻¹, no R1 + R2.

Palavras-chave: Biogás, Nutrientes, Reatores anaeróbios em série, Vinhoto.

Abstract

The need to reduce global pollution has contributed to the development of renewable energy sources, such as ethanol and biogas. Brazilian ethanol is produced sustainably, but the production process generates large amounts of by-products, such as vinasse, filter cake and molasses. Therefore, the objective of this study was to evaluate the anaerobic co-digestion of vinasse and sugarcane molasses during the harvest (Harvest 1 and 2) and the digestion of molasses during the off-season (Off-season), using two upflow anaerobic sludge blanket reactor (UASB), in series. Filter cake, a by-product of sugar production, was used to supplement the influent with nitrogen and phosphorus. The experimental unit was presented by two UASB reactors in series, with volumes of 12.6 L (first stage – R1) and 5.6 L (second stage – R2). The hydraulic detention time applied in R1 and R2 was 24.0 and 10.7 hours, respectively. The organic load rate (OLR) applied to R1 during the harvest were 4.8, 29.5, and 10.0. 31.7 and 11.0 g total COD (L d)⁻¹ in phases 1, 2, 3 and 4, respectively. The average volumetric methane productions (VMP) obtained were 0.39 to 2.55 L CH₄ (L d)⁻¹, in R1 + R2, respectively. A shock load was observed, indicating that for the conditions studied the OLR limit is 45 g total COD (L d)⁻¹. In the off-season and season 2, the average OLR applied were 8.9 and 22.10 g total COD (L d)⁻¹, respectively and the average VMP were 0.89 and 1.74 L CH₄ (L d)⁻¹, in R1 + R2.

Key-words: Biogas, Nutrients, Anaerobic reactors in series, Vinasse.

1. Introdução

As indústrias sucroenergéticas produzem grandes quantidades de subprodutos, como a

Anais da VIII Mostra de Docentes em RJI

vinhaça, torta de filtro e melaço. A vinhaça é o principal resíduo gerado a partir da produção de etanol, seguido pela torta de filtro, que são utilizados na agricultura da cana-de-açúcar como fertilizantes. A produção de etanol de cana-de-açúcar no Brasil, na safra de 2023/2024 foi de aproximadamente 33,5 bilhões de litros [1]. Para cada litro de etanol da cana-de-açúcar produzido são gerados de 10 a 14 L de vinhaça [2]; [3]. Já o melaço, subproduto da produção de açúcar de cana-de-açúcar, é amplamente utilizado na produção de etanol, em virtude do baixo preço e do grande volume produzido.

Os processos anaeróbios possibilitam a estabilização da matéria orgânica presente na vinhaça, torta de filtro e melaço, com a produção de dois produtos de valor econômico, o biogás e a vinhaça biodigerida. O biogás produzido pode ser usado para gerar eletricidade e calor e quando purificado pode ser utilizado como combustível para veículos ou injetado na rede de gás [4]. A vinhaça biodigerida poderá possuir concentrações consideráveis de nutrientes e pode ser usada com maior segurança na fertirrigação em virtude da redução de matéria orgânica. Embora a digestão anaeróbia seja reconhecida como a melhor alternativa para o tratamento da vinhaça, ainda existem dificuldades no seu tratamento, em virtude das variações nas características, como matéria orgânica e nutrientes, a presença de compostos inibitórios e da sazonalidade da vinhaça [5]. Além disso, existem lacunas no processo que precisam ser estudadas para aumentar a viabilidade da digestão anaeróbia da vinhaça e do melaço, buscando aumentar a capacidade na conversão da matéria orgânica em metano e estabilidade do processo.

Outra dificuldade é a sazonalidade da vinhaça, que é produzida na região centro-sul do Brasil, somente nos períodos, de abril a novembro, aproximadamente. Portanto, na entre-safra da cana-de-açúcar não existe a disponibilidade de vinhaça e é inviável o seu armazenamento. Isso dificulta, por exemplo, o estabelecimento de contratos de venda da energia do biogás, em virtude da interrupção do fornecimento de energia na entre-safra. E outra dificuldade é a retomada da produção de biogás na safra posterior, pois o processo é biológico e necessitará de um período para o reinício do processo.

Portanto um dos objetivos deste trabalho foi realizar manutenção dos reatores UASB na entre-safra utilizando somente melaço de cana-de-açúcar e torta-de-filtro, que são subprodutos que podem ser armazenados. Posteriormente, foi testado a retomada dos reatores UASB, as condições de operação da safra anterior, utilizando novamente a codigestão da vinhaça, melaço e torta de filtro. O melaço é considerado um subproduto da etapa de centrifugação no processo de fabricação de açúcar, produzido a uma taxa de aproximadamente 35,5 kg por tonelada de cana processada, e que está comercialmente disponível [6].

A composição do melaço de cana-de-açúcar é muito variável, pois depende de fatores agrícolas e industriais. Os principais componentes do melaço são a água (17 a 25%), sacarose (30 a 40%), frutose (5 a 12%), glicose (4 a 9%), cinzas (7 a 15%), outros carboidratos, proteínas (2,5 a 4,5%) compostos de origem orgânica como os aminoácidos, ácidos carboxílicos, vitaminas, fenóis e outros [7].

No entanto, há poucos dados sobre o uso de melaço durante o período de entressafra para substituir a vinhaça em digestores anaeróbios. Já a torta de filtro é um resíduo sólido gerado durante o processo de tratamento do caldo da cana-de-açúcar e apresenta composição química variável em função da variedade e da maturação da cana, tipo de solo, processo de clarificação do caldo e outros. A torta de filtro possui altos teores de matéria orgânica, fósforo, nitrogênio e cálcio; teores consideráveis de potássio, magnésio e expressivas quantidades de Fe, Mn, Zn [8] e foi utilizado para a suplementação nutricional do melaço na entre-safra e posteriormente da vinhaça e do melaço na retomada dos reatores UASB, na próxima safra.

Portanto os objetivos deste trabalho foram avaliar dois reatores anaeróbios de fluxo ascendente com manta de lodo (UASB), em série, no período de entressafra da indústria

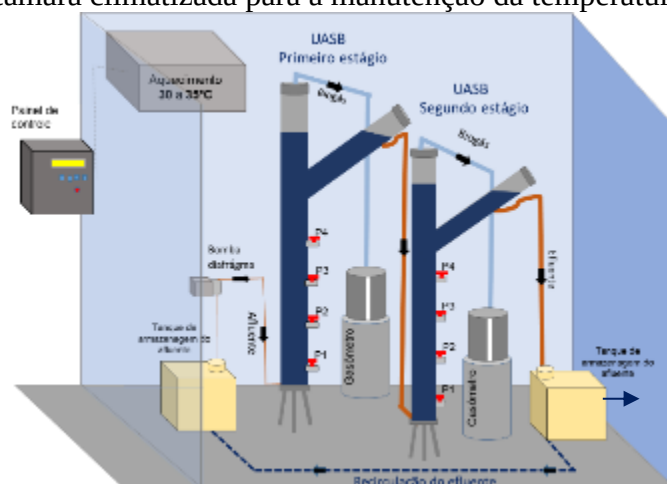
sucroenergética utilizando melaço de cana-de-açúcar suplementado com torta de filtro, quanto a produção de biogás e qualidade do efluente. E também foi avaliado a produção de biogás e qualidade dos efluentes na retomada dos reatores UASB, em série, na safra 2, as condições de operação da safra anterior 1, utilizando novamente a codigestão da vinhaça, melaço e torta de filtro como afluente.

2. Materiais e métodos

2.1. Materiais

A unidade experimental foi constituída por um tanque de armazenamento do afluente e efluente, bomba de diafragma, seguido de dois reatores UASB em série, com volumes de 12,6 L (primeiro estágio – R1) e 5,6 L (segundo estágio – R2), e quatro gasômetros de fibra de vidro (Fig. 1).

Fig. 1 - Representação esquemática das instalações compostas pelos reatores UASB em série R1 e R2, tanque de armazenagem de afluente e efluentes, gasômetros, bomba diafragma e câmara climatizada para a manutenção da temperatura.



Os reatores foram construídos com tubos de PVC, de 100 e 75 mm de diâmetro, para o R1 e R2, respectivamente, com separadores de fases na forma de Y, com ângulo de 45° em relação à vertical [9], adaptado por outros estudos [10]. Cada reator possuía, distribuídos ao longo de sua altura, quatro pontos para a coleta de amostras de lodo, denominados P1, P2, P3 e P4, com distância de 25 cm entre cada ponto. Os reatores UASB foram mantidos em câmara climatizada, com sistema de controle de temperatura (35 °C), que corresponde a temperatura mesofílica ótima para a digestão anaeróbia [11].

2.2. Métodos

A codigestão anaeróbia da vinhaça (V) e melaço de cana-de-açúcar (M) foi realizada utilizando-se 50%V:50%M em termos de demanda química de oxigênio (Safra 1 e retomada – Safra 2) (Tab. 1). Para o aumento gradual da COV, foi realizado aumento da quantidade de vinhaça e melaço diluído no efluente recirculado do R2, de modo a aumentar a demanda química de oxigênio (DQO), sempre utilizando a proporção 50%V:50%M.

Tab. 1- Condições operacionais dos reatores UASB (R1 e R2) em série, utilizados na codigestão anaeróbia da vinhaça e melaço suplementado com torta de filtro, nas fases 1 a 4 (Safr 1), entressafr e retomada (Safr 2).

R1					R2								
Volume (L)	12,6					5,6							
TDH (h)	24,0					10,7							
Safra 1					Entre-saфра	Saфра 2			Saфра 1			Entre-saфра	Saфра 2
	F1	F2	F3	F4			F1	F2	F3	F4			
COV – R1	4,8	29,5	31,7	11,0	8,9	22,1	5,0	17,6	47,2	16,2	5,8	8,5	
CV	65	40	20	25	21	49	72	72	25	39	28	38	

TDH: tempo de detenção hidráulico; COV: carga orgânica volumétrica em g DQOtotal (L d)⁻¹; DQOtotal: demanda química de oxigênio total. CV: coeficiente de variação em %

Fonte: (Autores, 2025).

Para a adição da torta de filtro no afluente, foi preparada uma solução composta por torta-de-filtro+melaço+vinhaça+efluente do R2. A quantidade de torta de filtro adicionada foi de aproximadamente 1 g de torta de filtro para cada 1000 g de DQO adicionada [2].

No afluente e efluentes dos reatores UASB, foi realizado o pH, demanda química de oxigênio total (DQOtotal), Alcalinidade total (AT), parcial (AP) e intermediária (AI), ácidos voláteis totais, nitrogênio amoniacal, duas vezes por semana, de acordo com metodologia descrita por [12]. A produção de biogás foi medida diariamente [13] e a composição foi determinada quinzenalmente, seguindo a metodologia de [12].

3. Resultados e Discussão

Os valores de pH dos efluentes dos reatores UASB, R1 e R2 foram superiores ao do afluente (4B), mesmo com o aumento das COV para valores superiores a 45 g DQOtotal (L d)⁻¹ no R1, nas fases 1, 2 e 4 (Fig. 2A), indicando a capacidade de tamponamento do sistema para essas condições operacionais.

A recirculação do efluente do R2, também contribuiu para o aumento da AP e do pH, sem a necessidade da utilização de produtos químicos, nas fases 1, 2 e 4 (Safr 1). Na entressafr e retomada (safr 2), o pH do afluente e efluentes dos reatores UASB permaneceram próximos a 7,0. A contribuição da recirculação no tamponamento do sistema anaeróbio também foi observado por [2] [14] e [15], tratando vinhaça e torta de filtro vinhaça e águas residuárias da bovinocultura leiteira e vinhaça e lodo de estação de tratamento de água, respectivamente. A recirculação do efluente também contribuiu para a diluição do afluente e a adequação das COV.

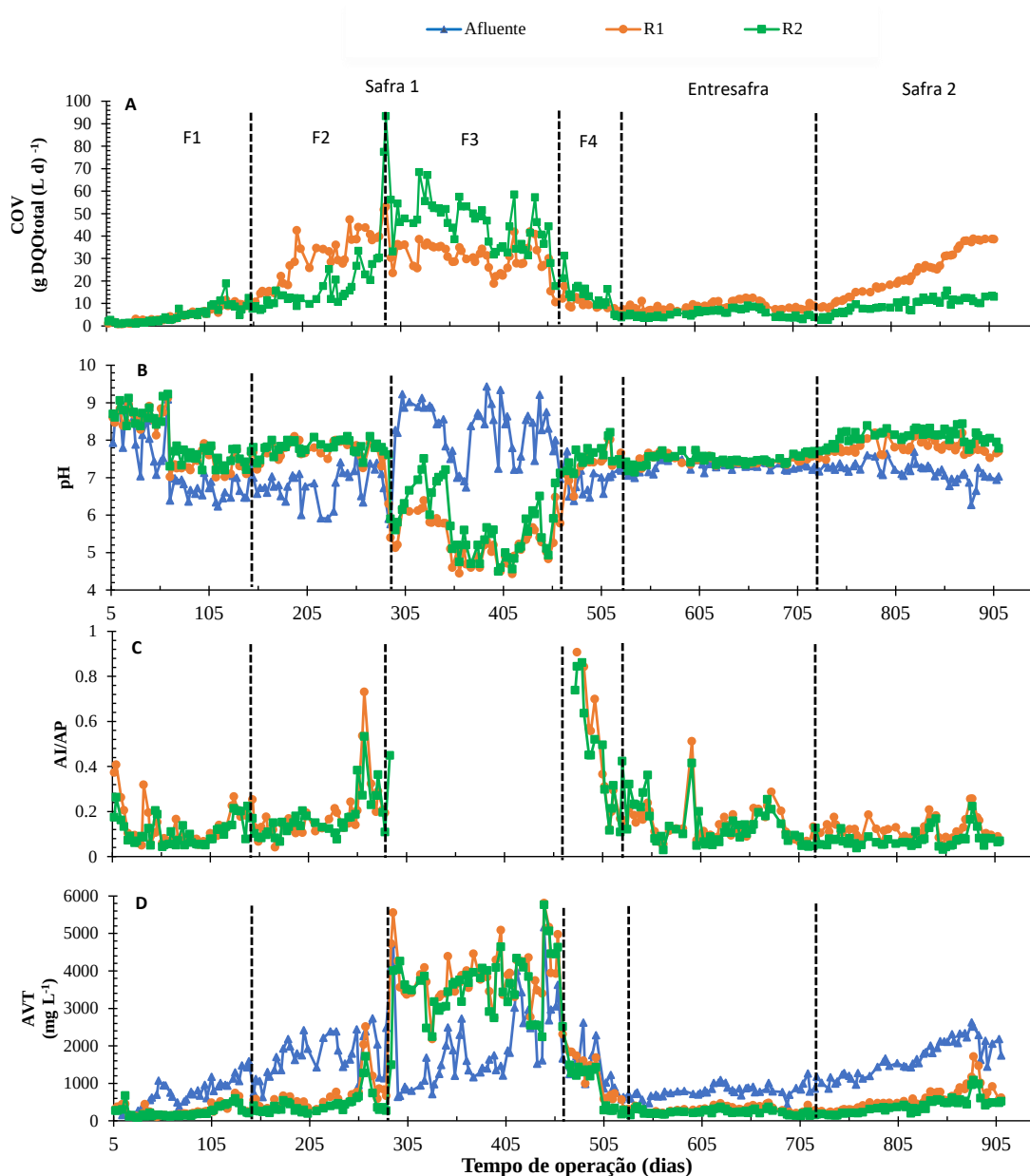
Os valores da relação entre a alcalinidade intermediária (AI) pela alcalinidade parcial (AP), foram de até 0,90, nas fases 1, 2 e 4 (Fig. 2 C). Na fase 3, no período de 351 a 423 dias de operação não foi verificado a AP para os R1 e R2, e em outros períodos dessa fase valores inferiores a 650 mg L⁻¹ ou ausentes para a AP, o que proporcionou valores médios de 35,0 e 8,8 para a relação AI/AP, no R1 e R2, respectivamente.

Na entressafr e retomada (Safr 2), os valores de AI/AP foram inferiores a 0,4 (Fig. 2C). De acordo com o estudo de [16], normalmente referenciado na literatura para a discussão da relação AI/AP. Os autores tratando resíduos da produção de frangos em reatores anaeróbios indicaram que os valores de AI/AP devem ser inferiores a 0,3. No entanto, observa-se na literatura que mesmo com valores superiores a 0,3 é possível monitorar reatores anaeróbios tratando vinhaça com estabilidade. Por exemplo, [2], observaram valores médios de AI/AP de 0,86 e 0,63 para os reatores UASB, R1 e R2, em série, respectivamente. Os autores trataram

Anais da VIII Mostra de Docentes em RJ

vinhaça, com aplicação de COV de 45 g DQOtotal (L d)⁻¹ no R1 e observaram produções volumétricas de metano médias de 3,12 L CH₄ (L d)⁻¹, para sistema.

Fig. 2. Valores de carga orgânica volumétrica (COV), pH, relação da alcalinidade intermediária (AI) pela alcalinidade parcial (AP) no afluente e efluentes dos reatores UASB em série (R1 e R2) na codigestão da vinhaça com melaço (safra 1), digestão do melaço (Entressafra) e retomada com vinhaça e melaço (Safra 2).



Fonte: (Autores, 2025).

Os valores de AVT foram crescentes com o aumento da COV atingindo valores próximos a 6000 mg L⁻¹ nos efluentes dos reatores UASB (Fig. 2D). Esses valores são iguais aos observados por Barros et al., (2017), que obtiveram valores de até 6000 mg L⁻¹, operando

Anais da VIII Mostra de Docentes em RJ

reatores UASB, em série tratando vinhaça com COV de $45 \text{ g DQO}_{\text{total}} (\text{L d})^{-1}$ suplementada com torta de filtro.

Durante a digestão anaeróbia, na etapa de acidogênese são produzidos grandes quantidades de ácidos voláteis totais (AVT) [17]. A codigestão anaeróbia da vinhaça e do melaço possui alto potencial de produção de AVT.

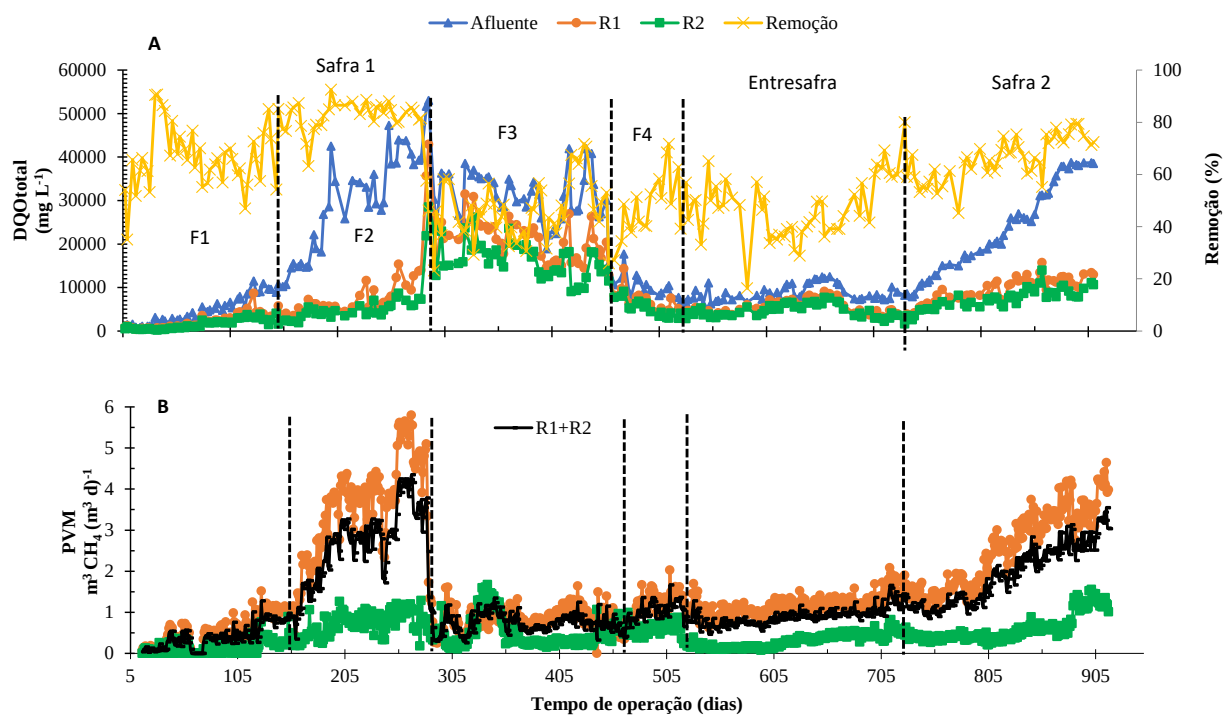
Na fase 3, em virtude do choque de carga ocorreu o aumento dos AVT nos reatores R1 e R2, mesmo com a retirada da recirculação e a correção do pH do afluente com leite de cal em diversos períodos. Essa mudança indicou uma atividade predominante dos microrganismos acidogênicos na codigestão anaeróbia da vinhaça e do melaço. Os microrganismos acidogênicos são responsáveis pela produção de ácidos orgânicos a partir da degradação de matéria orgânica complexa, o que resulta no aumento dos AVT nos efluentes dos reatores.

A estratégia de redução da COV na fase 4, desempenhou um papel crucial na melhoria da estabilidade do sistema de reatores quanto aos AVT, pH e alcalinidade (Fig. 2A e D). Isso evidencia a complexidade e a necessidade de abordagens multifacetadas no gerenciamento de reatores em série, enfatizando que a otimização operacional pode ser tão eficaz quanto a correção química direta para alcançar resultados desejáveis no tratamento de águas residuárias.

Na entressafra e safra 2 os valores de AVT dos efluentes permaneceram abaixo de 2000 mg L^{-1} , indicando que a estratégia de recirculação do efluente pode ser alternativa.

As remoções médias de $\text{DQO}_{\text{total}}$ foram de 53, 30 e 67% e de 74, 31 e 83% no R1, R2 e R1+R2, nas fases 1 e 2, respectivamente (Fig. 3A). Observou-se na fase 2, os maiores valores de remoção de $\text{DQO}_{\text{total}}$, que pode ter ocorrido principalmente em virtude da adaptação do lodo ao substrato.

Fig 3. Valores da demanda química de oxigênio total no afluente e efluentes e eficiência de remoção para o sistema (R1+R2) (A), produção volumétrica de metano (PVM) (B) nos reatores UASB em série (R1 e R2) na co-digestão da vinhaça com melaço (safra 1), digestão do melaço (Entressafra) e retomada com vinhaça e melaço (Safra 2).



Fonte: (Autores, 2025).

Nas fases 3 e 4, as remoções de DQO_{total} foram inferiores as fases anteriores, com valores de 31, 23 e 47% e de 33; 20 e 46%, no R1, R2 e R1+R2, respectivamente, nas fases 3 e 4 (Fig. 3). Essa redução expressiva dos índices de remoção está diretamente relacionada à ocorrência de acidificação durante a fase 3, afetando negativamente todo o sistema. Conforme observado por Ramos e Silva (2018), a eficiência na remoção de DQO_{total} no tratamento anaeróbio da vinhaça também diminuiu à medida que a concentração de COV aumentou.

A fase 3 foi especialmente desafiadora, prejudicando a eficiência do tratamento anaeróbio. A acidificação pode ter contribuído para a diminuição da capacidade dos microorganismos em degradar a matéria orgânica, refletindo-se nos valores mais baixos de remoção de DQO_{total}. Essa condição adversa impactou tanto o R1 quanto o R2, afetando a eficiência combinada do sistema.

No entanto, após a recuperação na fase 3, na fase, as taxas de remoção de DQO_{total} se mantiveram estáveis indicando que a estratégia adotada foi eficaz para restabelecer o equilíbrio do sistema. A estabilização pós-recuperação permitiu que os processos de degradação da matéria orgânica retomassem seu desempenho usual, mantendo as taxas de remoção de DQO_{total} consistentes com a fase anterior à acidificação.

Na entressafra observou-se um decréscimo nas remoções, que foram retomadas na safra 2, para valores próximos a 60%. Foi observado valores crescentes da produção volumétrica de metano (PVM) nos reatores UASB, R1 e R2, com o aumento da COV, que atingiram valores de até 5,794 e 1,288 L CH₄ (L d)⁻¹ na fase 2 (Fig. 3B).

As PVM médias dos reatores R1+R2 foram de 0,39; 2,55; 0,67; 1,00; 0,9 e 1,74 L CH₄ (L d)⁻¹, nas fases 1, 2, 3, 4 (Safr 1), entressafra e retomada, respectivamente com a recirculação do efluente do R2 para o aproveitamento da alcalinidade.

4. Considerações finais

As eficiências de remoção DQO_{total} e PVM média para sistema de tratamento composto pelos reatores UASB (R1+R2) foram de 83% e 2,55 L CH₄ (L d)⁻¹, respectivamente, com a aplicação de elevadas COV de até 45 g DQO_{total} (L d)⁻¹, durante o processo de co-digestão anaeróbia da vinhaça e melaço, suplementado com a torta de filtro (Safr 1). No entanto, observou-se que COV superiores a 45 g DQO_{total} (L d)⁻¹ levaram ao colapso o sistema, com a acidificação dos reatores. As PVM médias dos reatores R1+R2 foram de 0,9 e 1,74 L CH₄ (L d)⁻¹, entressafra e retomada (Safr 2), respectivamente. Isto indica, que a codigestão anaeróbia da vinhaça e melaço de cana-de açúcar pode ser uma alternativa interessante para a produção de biogás nas indústrias sucroenergéticas, desde que respeitado os limites de COV, e o melaço suplementado com a torta de filtro pode ser utilizado para a manutenção dos reatores UASB, na entre-safra.

Agradecimentos

A Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo – FAPESP (Processo número 2019/19443-6) pelo apoio financeiro. Ao CNPQ e CAPES pelas bolsas de estudos concedidas a segunda e terceira autoras, respectivamente.

Referências

[1] UNICA. **UNICA**. Disponível em: <<https://unicadata.com.br/listagem.php?idMn=4>>. Acesso em: 08 fev. 2025.

Anais da VIII Mostra de Docentes em RJI

- [2] BARROS, V. G. et al. Improved methane production from sugarcane vinasse with filter cake in thermophilic UASB reactors, with predominance of Methanothermobacter and Methanosarcina archaea and Thermotogae bacteria. **Bioresource Technology**, v. 244, n. July, p. 371–381, 2017.
- [3] BORDONAL, R. DE O. et al. Sustainability of sugarcane production in Brazil. A review. **Agronomy for Sustainable Development**, v. 38, n. 2, 2018.
- [4] WINTSCHE, B. et al. Trace Elements Induce Predominance among Methanogenic Activity in Anaerobic Digestion. v. 7, n. December, p. 1–12, 2016.
- [5] MOTA, V. T.; SANTOS, F. S.; AMARAL, M. C. S. Two-stage anaerobic membrane bioreactor for the treatment of sugarcane vinasse: Assessment on biological activity and filtration performance. **Bioresource Technology**, v. 146, p. 494–503, 2013.
- [6] CASTAÑEDA-AYARZA, J. A.; CORTEZ, L. A. B. Final and B molasses for fuel ethanol production and some market implications. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 70, n. March 2015, p. 1059–1065, 2017.
- [7] CLARKE, M. A. **SYRUPS** Academic Press, , 2003. (Nota técnica).
- [8] ALMEIDA JÚNIOR, A. B. et al. Fertilidade do solo e absorção de nutrientes em cana-de-açúcar fertilizada com torta de filtro. **Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 15, p. 1004–1013, 2011.
- [9] CAVALCANTI, P. F. et al. Excess sludge discharge frequency for UASB reactors. **Water Science and Technology**, v. 40, n. 8, p. 211–219, 1999.
- [10] VILLA-MONTOYA, A. C.; FERRO, M. I. T.; DE OLIVEIRA, R. A. Removal of phenols and methane production with coffee processing wastewater supplemented with phosphorous. **International Journal of Environmental Science and Technology**, v. 14, n. 1, p. 61–74, 2017.
- [11] CHERNICHARO, C. A. DE L. **Anaerobic Reactors**. 2nd ed ed. Belo Horizonte: DESA/UFMG; 2007., 2007.
- [12] APHA; AWWA; WPCF. **Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater**. 21 th ed. Washington D. C.: American Water Works Association/American Public Works Association/Water Environment Federation. American Public Health Association, Washington DC, USA, 2005.
- [13] OLIVEIRA, R. A. DE. **Efeito da concentração de sólidos suspensos do afluente no desempenho e características do lodo de reatores anaeróbios de fluxo ascendente com manta de lodo tratando águas residuárias de suinocultura**. [s.l.] Universidade de São Paulo, 1997.
- [14] DE SANTI CARAÇA, M.; DE OLIVEIRA, R. A.; DUDA, R. M. Bioenergy Recovery from Anaerobic Co-Digestion of Sugarcane Vinasse and Dairy Cattle Wastewater in Two Up-Flow Anaerobic Sludge Blanket Reactors in Series. **Bioenergy Research**, n. 0123456789, 2023.
- [15] LIMA, V. DE O. et al. Anaerobic digestion of vinasse and water treatment plant sludge increases methane production and stability of UASB reactors. **Journal of Environmental Management**, v. xx, n. xx, p. 116451, 2022.
- [16] RIPLEY, L. E.; BOYLE, W. C.; CONVERSE, J. C. Improved Alkalimetric Monitoring for Anaerobic Digestion of High-Strength Wastes. **Journal of Water Pollution Control Federation**, v. 58, n. 5, p. 406–411,
- [17] CAI, G. et al. cfatty acid oxidation and methane production during the bioaugmentation of anaerobic digestion system: Microbial community analysis revealing the influence of microbial interactions on metabolic pathways. **Science of the Total Environment**, v. 754, p. 142425, 2021.