

RESSALVA

Atendendo solicitação do(a) autor(a), o texto completo desta dissertação será disponibilizado somente a partir de 29/02/2026.

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA – UNESP
CÂMPUS DE JABOTICABAL

**CO-DIGESTÃO ANAERÓBIA DE SUBPRODUTOS DO
SETOR SUCROENERGÉTICO PARA A PRODUÇÃO DE
BIOGÁS**

Bruna Rodrigues Siqueira Sturaro
Engenheira Agrônoma

2024

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA – UNESP
CÂMPUS DE JABOTICABAL

**CO-DIGESTÃO ANAERÓBIA DE SUBPRODUTOS DO
SETOR SUCROENERGÉTICO PARA A PRODUÇÃO DE
BIOGÁS**

Bruna Rodrigues Siqueira Sturaro

Orientadora: Profa. Dra. Rose Maria Duda

Co-orientador: Prof. Dr. Roberto Alves Oliveira

Dissertação apresentada à Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinária – Unesp, Câmpus de Jaboticabal, como parte das exigências para a obtenção do título de Mestre em Microbiologia Agropecuária.

S935c	Sturaro, Bruna Rodrigues Siqueira Co-digestão anaeróbia de subprodutos do setor sucroenergético para a produção de biogás / Bruna Rodrigues Siqueira Sturaro. -- Jaboticabal, 2024 74 p. : il., tabs. Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Jaboticabal Orientadora: Rose Maria Duda Coorientador: Roberto Alves Oliveira 1. Águas residuais Purificação Tratamento biológico. 2. Cana-de-açúcar Derivados. 3. Biogas. I. Título.
-------	--



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

Câmpus de Jaboticabal



CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

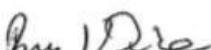
TÍTULO DA DISSERTAÇÃO: CO-DIGESTÃO ANAERÓBIA DE SUBPRODUTOS DO SETOR
SUCROENERGÉTICO PARA A PRODUÇÃO DE BIOGÁS

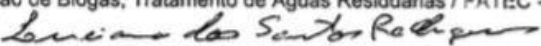
AUTORA: BRUNA RODRIGUES SIQUEIRA STURARO

ORIENTADORA: ROSE MARIA DUDA

COORIENTADOR: ROBERTO ALVES DE OLIVEIRA

Aprovada como parte das exigências para obtenção do Título de Mestra em Microbiologia
Agropecuária, pela Comissão Examinadora:


Prof. Dra. ROSE MARIA DUDA (Participação Presencial)
Produção de Biogás, Tratamento de Águas Residuárias / FATEC - Jaboticabal/SP


Prof. Dr. LUCIANO DOS SANTOS RODRIGUES (Participação Presencial)
Departamento de Medicina Veterinária / Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG) - Belo Horizonte/MG


Prof. Dr. MARCELO BRUNO (Participação Presencial)
Centro Universitário da Fundação Educacional de Barretos / UNIFEB - Barretos/SP

Jaboticabal, 29 de fevereiro de 2024

DADOS CURRÍCULARES DO AUTOR

Bruna Rodrigues Siqueira Sturaro, nascido dia 28 de dezembro de 1993 na cidade de Barretos – SP. Técnica em Meio Ambiente pela E.T.E.C Cel. Raphael Brandão (2011). Bacharel em Engenharia Agrônômica pelo Centro Universitário da Fundação Educacional de Barretos – UNIFEB (2019). Durante a graduação participou de projeto interdisciplinar testando diferentes tipos de adubação (2016). No ano de 2019 foi estagiária do laboratório de Microbiologia Centro Universitário da Fundação Educacional de Barretos – UNIFEB, trabalhando com projetos voltados a Microbiologia agrícola. Realizou mestrado no programa de Microbiologia Agropecuária, com dedicação exclusiva, na Universidade Estadual Paulista – Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Câmpus de Jaboticabal (UNESP - FCAV), atuando na linha de pesquisa de Saneamento Ambiental, no Departamento de Engenharia. Atualmente desenvolve pesquisas na área de Microbiologia Agropecuária, atuando principalmente nos seguintes temas: tratamento anaeróbio de águas residuárias e produção de biogás.

Dedico este trabalho a minha mãe Adeides e meu pai Geraldo, que nunca mediram esforços para que eu conseguisse alcançar meus objetivos, sempre me amparando e dando forças para continuar em todos os momentos.

Dedico a todos os meus amigos e meu namorado Henrique que jamais me deixaram desistir e sempre acreditaram na minha capacidade e força de vontade.

Dedico aos meus avós Aristides e Antônia (*in memoriam*) que foram trabalhadores rurais e não tiveram a mesma oportunidade de estar aqui.

AGRADECIMENTOS

A Deus e Nossa Senhora por estarem ao meu lado sempre.

Aos meus pais Geraldo e Adeides que, com muito empenho, sempre se sacrificou para que os meus sonhos fossem realizados. Esta conquista é de vocês também.

À minha sobrinha Valentina, sou eternamente grata pelo apoio e por ter compreendido a minha ausência, e por sempre estar ao meu lado, mesmo distante.

À minha orientadora Professora Dra. Rose Maria Duda, pela confiança depositada e oportunidade de realização do curso de Pós-Graduação ao nível de Mestrado, pelos conselhos, compreensão, encorajamento e enorme disposição ao longo dos anos em que trabalhamos juntos.

Ao meu coorientador Professor Dr. Roberto Alves de Oliveira, por acreditar em mim, pelos conselhos, pelas críticas e por todas as palavras de apoio.

A Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias de Jaboticabal, Universidade Estadual Paulista (FCAV/UNESP), em particular, o Laboratório de Saneamento Ambiental e o Departamento de Engenharia, disponibilizando recursos e instalações para realizar este trabalho.

Aos funcionários da Secretaria de Pós-Graduação pela disposição e ajuda sempre prestada. Aos Funcionários do Departamento de Engenharia João e Marquinho e em especial ao Ailton pela amizade, convivência, conselhos e auxílios prestados.

Aos professores do Curso de Pós-Graduação em Microbiologia Agropecuária da UNESP – FCAV, pelas disciplinas ministradas e pelo aprimoramento acadêmico.

Também agradeço aos colegas de laboratório sentirei muita saudade de vocês! Obrigado pela amizade, companheirismo, ajuda e por todos os bons momentos que passamos juntos.

Às Usinas Pitangueiras e São Francisco pelo fornecimento dos sub-produtos para realização desta pesquisa.

À FAPESP (Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo) por ter concedido o auxílio financeiro 2019/19443-6.

À CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior).

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

Ao CNPQ (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico) por ter me concedido auxílio financeiro durante todo o período do mestrado.

Aos amigos de vida que me apoiaram no decorrer desse projeto.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	17
2	OBJETIVOS.....	20
2.1	Objetivos específicos.....	21
3	REVISÃO DE BIBLIOGRAFIA.....	21
3.1	Biocombustíveis.....	21
3.2	Bioquímica da digestão anaeróbia.....	22
3.3	Reatores UASB.....	24
3.4	Vinhaça.....	25
3.5	Reatores anaeróbios na co-digestão da vinhaça, melão e torta.....	27
3.6	Melão de cana-de-açúcar.....	29
3.6	Torta de filtro.....	30
4.0	MATERIAL E MÉTODOS.....	33
4.1	Estrutura do experimento.....	33
4.2	Afluente e lodo utilizado.....	34
4.3	Operação do sistema de tratamento.....	35
4.4	Suplementação com torta de filtro.....	36
4.5	Monitorização do sistema composto pelos reatores UASB.....	36
4.6	Análise estatística.....	38
4.7	Extração de DNA.....	38
4.7.1	Sequenciamento na plataforma Illumina.....	38
4.7.2	Análise de dados.....	38
5.0	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	40
5.1	pH, alcalinidade e ácidos orgânicos voláteis totais (AVT).....	40
5.2	Demanda química de oxigênio e sólidos suspensos.....	45
5.3	Produção de biogás e estimativa da produção de energia elétrica..	48
5.4	Nutrientes, sulfeto e sulfato.....	51
5.4.1	Nitrogênio e fósforo.....	51
5.4.2	Sulfeto e sulfato.....	53
5.4.3	Nutrientes.....	58
5.4.4	Sólidos totais e voláteis do lodo dos reatores UASB, R1 e R2.....	59
6.0	DIVERSIDADE MICROBIANA NO LODO.....	60
7.0	CONCLUSÃO.....	62
8.0	REFERÊNCIAS.....	64

LISTA DE ABREVIATURAS

AVT: Ácidos voláteis totais

Al: Alcalinidade intermediária

AP: Alcalinidade parcial

AT: Alcalinidade total

BRS: Bactérias redutoras de sulfato

CH₄: Metano

COV: Carga orgânica volumétrica

CO₂: Dióxido de carbono

CV: Coeficiente de variação

DQO_{total}: Demanda química de oxigênio total

DQO_{diss}: Demanda química de oxigênio dissolvida

N-am: Nitrogênio amoniacal

NK: Nitrogênio total Kjeldahl

pH: Potencial hidrogeniônico

PEM: Produção específica de metano

P-total: Fósforo total

PVC: Policloreto de vinila

PVM: Produção volumétrica de metano

R1: Reator 1

R2: Reator 2

SO₄⁻²: Íon sulfato

SST: Sólidos suspensos totais

SSV: Sólidos suspensos voláteis

TDH: Tempo de detenção hidráulica

UASB: Upflow anaerobic sludge blanket

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Características da vinhaça descritas por diversos autores.....	27
Tabela 2. Condições operacionais dos reatores UASB (R1 e R2) em série, utilizados na co-digestão anaeróbia da vinhaça e melaço suplementado com torta de filtro, nas fases 1, 2, 3 e 4.....	35
Tabela 3. Exames e determinações, frequência e fontes das metodologias utilizadas.....	36
Tabela 4. Valores médios de alcalinidade parcial (AP), alcalinidade total (AT), razão de alcalinidade intermediária pela alcalinidade parcial e razão de ácidos voláteis pela alcalinidade total (AVT/AT) no afluente e efluentes dos reatores anaeróbios de fluxo ascendente com manta de lodo (UASB), R1 e R2, utilizados na codigestão da vinhaça e melaço, suplementado com torta de filtro, nas fases 1, 2, 3 e 4.....	42
Tabela 5. Valores médios de demanda química de oxigênio total (DQO _{total}), demanda química de oxigênio dissolvida (DQO _{diss}), sólidos suspensos totais (SST), sólidos suspensos voláteis (SSV) e da razão SST/SSV no afluente e efluentes dos reatores anaeróbios de fluxo ascendente com manta de lodo (UASB), R1 e R2, utilizados na codigestão da vinhaça e melaço, suplementado com torta de filtro, nas fases 1, 2, 3 e 4.....	46
Tabela 6. Valores médios da produção volumétrica de metano (PVM), produção volumétrica específica de metano (PEM) e produção de energia elétrica (En) do biogás, nos reatores anaeróbios de fluxo ascendente com manta de lodo (UASB), R1 e R2, utilizados na codigestão da vinhaça e melaço, suplementado com torta de filtro, nas fases 1, 2, 3 e 4.....	49
Tabela 7. Valores médios de nitrogênio kjedahl (NK), fósforo total (P-total), nitrogênio amoniacal (N-am.) e da relação DQO:NK:P-total no afluente e efluentes, e remoções	

de NK e P-total para os reatores anaeróbios de fluxo ascendente com manta de lodo (UASB), R1 e R2, utilizados na codigestão da vinhaça e melaço, suplementado com torta de filtro, nas fases 1, 2, 3 e 4.....52

Tabela 8. Valores médios de Fe, Mn, Cu, Zn, Co e Ni no afluente e efluentes dos reatores anaeróbios de fluxo ascendente com manta de lodo (UASB, R1 e R2), em série para a codigestão da vinhaça e melaço, suplementado com torta de filtro, nas fases 1, 2, 3 e 4.....55

Tabela 9. Valores médios de K, Ca, Mg, Na no afluente e efluentes dos reatores anaeróbios de fluxo ascendente com manta de lodo (UASB, R1 e R2), em série para a codigestão da vinhaça e melaço, suplementado com torta de filtro, nas fases 1, 2, 3 e 4.....59

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Fluxograma com as fases de digestão anaeróbia.....	23
Figura 2. Fluxograma simplificado da produção de açúcar e etanol na indústria sucroenergética (Adaptado de LEMOS e TANCREDO, 2010).....	26
Figura 3. 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.....	33
Figura 4. (A) Valores de carga orgânica volumétrica (COV), (B) pH, (C) relação da alcalinidade intermediária (AI) pela alcalinidade parcial (AP) e (D) ácidos voláteis totais no afluente (AVT) e efluentes dos reatores UASB em série (R1 e R2) na co-digestão da vinhaça com melaço, suplementado com torta de filtro, nas fases 1, 2, 3 e 4.....	42
Figura 5. Eficiência de remoção de demanda química de oxigênio total (DQO _{total}) e demanda química de oxigênio dissolvida (DQO _{diss}) nos reatores anaeróbios de fluxo ascendente com manta de lodo (UASB), R1 e R2, utilizados na codigestão da vinhaça e melaço, suplementado com torta de filtro, nas fases 1, 2, 3 e 4.....	47
Figura 6. Valores da carga orgânica volumétrica (COV) aplicada no reator anaeróbio de fluxo ascendente com manta de lodo (UASB – R1) e a produção volumétrica de metano (PVM) nos reatores UASB, R1 e R2, durante a operação dos reatores UASB em série para a codigestão da vinhaça e melaço, suplementado com torta de filtro, nas fases 1, 2, 3 e 4.....	48
Figura 7. Valores dos íons sulfato e sulfeto no afluente e efluentes dos reatores anaeróbios de fluxo ascendente (UASB, R1 e R2), em série, na co-digestão da vinhaça com melaço suplementada com torta de filtro, nas fases 1, 2, 3 e 4.....	55

Figura 8. Valores dos sólidos totais (ST) e voláteis (SV), nos pontos de coleta de lodo dos reatores anaeróbios de fluxo ascendente (UASB, R1 e R2), em série, na co-digestão da vinhaça com melaço suplementada com torta de filtro, nas fases 1, 2, 3 e 4.....60

Figura 1. Afiliações taxonômicas e abundância relativa dos filos do domínio Bacteria do lodo inóculo (In), e dos reatores UASB, R1 e R2, nas fases 3 (T1) e 4 (T2).....63

Figura 10. Afiliações taxonômicas e abundância relativa dos gêneros do domínio Bacteria do lodo inóculo (In), e dos reatores UASB, R1 e R2, nas fases 3 (T1) e 4 (T2).....64

Figura 11. Afiliações taxonômicas e abundância relativa dos filos do domínio Archaea do lodo inóculo (In), e dos reatores UASB, R1 e R2, nas fases 3 (T1) e 4 (T2).... 64

Figura 12. Afiliações taxonômicas e abundância relativa dos gêneros do domínio Archaea do lodo inóculo (In), e dos reatores UASB, R1 e R2, nas fases 3 (T1) e 4 (T2).....65

Co-digestão anaeróbia de subprodutos do setor sucroenergético para a produção de biogás

RESUMO

A necessidade de redução da poluição global contribuiu para o desenvolvimento de fontes de energia renováveis, como o etanol e o biogás. Isso torna a digestão anaeróbia de subprodutos do setor sucroenergético uma opção interessante para a produção de energia. Portanto o objetivo deste trabalho foi a co-digestão anaeróbia da vinhaça (V) e melaço de cana-de-açúcar (M) (50%V:50%M, em termos de demanda química de oxigênio), suplementado com torta de filtro, em dois reatores UASB (R1 e R2), em série. As cargas orgânicas volumétricas (COV) médias aplicadas no R1 foram de 4,8; 29,5; 31,7 e 11,0 g DQO total (L d)⁻¹ na fase 1, 2, 3 e 4, respectivamente. A suplementação do afluente com a torta de filtro e a recirculação do efluente permitiu obter produções volumétricas de metano e remoções de demanda química de oxigênio total estáveis de 0,39 a 2,55 L CH₄ (L d)⁻¹ e de 50 e 83%, no R1 + R2, respectivamente. Observou-se uma carga de choque na fase 3, indicando que para as condições estudadas o limite de COV é de 47 g DQOtotal (L d)⁻¹, e só foi possível recuperar o sistema após a redução das COV, na fase 4. A partir da produção volumétrica de metano nos reatores UASB estimou-se a produção de até 19 kWh d⁻¹ por m³ de vinhaça, ou seja 68% da energia elétrica necessária para processar uma tonelada de cana-de-açúcar, na fase 2. Foi observado uma diversidade de microrganismos dos domínios arqueias e bactérias. Isso indica que é possível codigerir vinhaça e melaço suplementados com torta de filtro para obtenção de biogás em reatores UASB, em série, propondo opções para reutilização de subprodutos da cana-de-açúcar, com COV de até 45 g DQOtotal (L d)⁻¹.

Palavras-chave: Metano. Melaço. Reator UASB. Vinhaça.

Anaerobic co-digestion of by-products from the sugar-energy sector for biogas production

ABSTRACT

The need to reduce global pollution has contributed to the development of renewable energy sources, such as ethanol and biogas. This makes anaerobic digestion of byproducts from the sugarcane industry an interesting option for energy production. Therefore, the objective of this work was the anaerobic co-digestion of vinasse (V) and sugarcane molasses (M) (50%V:50%M, in terms of chemical oxygen demand), supplemented with filter cake, in two UASB reactors (R1 and R2), in series. The average organic load rate (OLR) applied in R1 were 4.8; 29.5; 31.7 and 11.0 g total COD (L d)⁻¹ in phases 1, 2, 3 and 4, respectively. Supplementation of the influent with filter cake and effluent recirculation allowed obtaining stable volumetric methane production and total chemical oxygen demand removals of 0.39 to 2.55 L CH₄ (L d)⁻¹ and 50 and 83%, in R1 + R2, respectively. A shock load was observed in phase 3, indicating that for the conditions studied the OLR limit is 47 g total COD (L d)⁻¹, and it was only possible to recover the system after the OLR reduction, in phase 4. From the volumetric production of methane in the UASB reactors, the production of up to 19 kWh d⁻¹ per m³ of vinasse was estimated, that is, 68% of the electrical energy required to process one ton of sugarcane, in phase 2. A diversity of microorganisms from the archaeal and bacterial domains was presented. This indicates that it is possible to co-digest vinasse and molasses supplemented with filter cake to obtain biogas in UASB reactors, in series, proposing options for reusing sugarcane by-products, with OLR of up to 45 g total COD (L d)⁻¹.

Keywords: Methane. Molasses. UASB reactor. Vinasse.

1. INTRODUÇÃO

O aumento da população mundial e o desenvolvimento das indústrias nas últimas décadas, elevou o consumo de energia (KANNAN e VAKEESAN, 2016). Aproximadamente 7,4% da produção total de eletricidade no mundo foi atendida por energia renovável em 2016, e essa taxa aumentou para 12,8% no ano de 2021 (YOLCAN, 2023). A conscientização sobre os impactos ambientais tem motivado uma crescente ênfase nas políticas globais que impulsionam a transição para o uso de biocombustíveis e a redução das emissões (JOPPERT et al., 2017). Esta mudança ocorre em virtude da preocupação com os efeitos poluentes advindos da energia proveniente dos combustíveis fósseis, cujo potencial de contribuição para a poluição, mudanças climáticas e desastres naturais tem sido amplamente reconhecido (KANNAN e VAKEESAN, 2016).

As preocupações com o meio ambiente e os recentes avanços tecnológicos tornaram as energias renováveis uma opção para expandir a capacidade de geração de energia, e entre as fontes de energia renovável, pode-se citar o etanol e o biogás.

A produção de etanol de cana-de-açúcar no Brasil, na safra de 2022/2023 foi de aproximadamente 31,2 bilhões de litros (UNICA, 2023). A preocupação com os subprodutos da indústria sucroenergética brasileira, principalmente com a vinhaça, são importantes em virtude das grandes quantidades produzidas. Para cada litro de etanol da cana-de-açúcar produzido são gerados de 10 a 14 L de vinhaça (BARROS et al., 2017; BORDONAL et al., 2018). A vinhaça possui elevada carga orgânica, em virtude da presença de compostos fenólicos, glicerol, etanol, melanoidinas, açúcares, ácidos graxos voláteis e outros (WILKIE et al., 2000) e atualmente é utilizada na fertirrigação dos canaviais (NADALETI et al., 2020).

Os subprodutos da produção de açúcar e etanol da cana-de-açúcar, como o melaço, torta de filtro e vinhaça podem ser uma fonte interessante de matéria-prima para a produção de biogás. O biogás pode proporcionar a gestão responsável de resíduos e a produção de energia renovável, na transição global para a sustentabilidade (BEDOIC et al., 2021).

A digestão anaeróbia da vinhaça tem sido reconhecida como uma alternativa para o tratamento da vinhaça e produção de biogás. A remoção da matéria orgânica

biodegradável de forma controlada nos reatores anaeróbios, reduz as emissões de metano durante o armazenamento e o transporte de vinhaça e além disso, a aplicação da vinhaça biodigerida reduz as emissões de óxido nitroso em 78% comparado à da vinhaça não tratada (MORAES et al., 2017) e ainda pode ser utilizada na fertirrigação dos canaviais, para o aproveitamento dos nutrientes e da água. Os nutrientes contidos na vinhaça são geralmente conservados por digestão anaeróbia (WILKIE et al., 2000).

Apesar dos avanços apontados na digestão anaeróbia da vinhaça ainda são necessários estudos para otimizar a produção de biogás, com estabilidade (ESPAÑA-GAMBOA et al., 2012; JANKE et al., 2016, BARROS et al., 2017; KIANI DEH KIANI et al., 2022). Algumas alternativas para o aumento da produção de biogás foram demonstradas a partir da co-digestão anaeróbia da vinhaça e outros subprodutos da indústria sucroenergética, como a torta de filtro (BARROS et al., 2017) e o bagaço (FURTADO et al., 2023).

Mas também existe a possibilidade da co-digestão da vinhaça com o melaço da cana-de-açúcar, que pode ser uma alternativa interessante e inovadora e que poderá proporcionar ganhos energéticos interessantes. A co-digestão é uma técnica que consiste em misturar diferentes tipos de resíduos orgânicos em um mesmo reator anaeróbio, com o objetivo de melhorar a produção de biogás e aumentar a eficiência do tratamento. Para a co-digestão, é importante selecionar os resíduos orgânicos que serão misturados de acordo com suas características físico-químicas e a disponibilidade na região. Essa técnica é promissora para melhorar a produção de biogás na indústria sucroenergética, contribuindo para uma gestão mais sustentável dos resíduos e a redução do impacto ambiental (JIANG et al., 2022).

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 (CASTAÑEDA-AYARZA e CORTEZ, 2017). 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 (CLARKE, 2003). O melaço de cana-de-açúcar tem sido, utilizado principalmente na produção de etanol, pois o processo industrial está bem estabelecido com a produção de etanol de 7 a 8% (v/v) a partir de melaço diluído (15 a 16%) (ARSHAD et al., 2017).

A digestão anaeróbia do melaço tem sido relatada em diversos estudos como uma estratégia interessante para a produção de biogás. Por exemplo, Meng et al., (2017), utilizaram dois reatores de leito fixo em série, aplicando cargas orgânicas volumétricas (COV) de 13,3 g DQO_{total} (L d)⁻¹ na temperatura de 35 °C, e obtiveram produções volumétricas de metano (PVM) de aproximadamente 3,8 L CH₄ (L d)⁻¹ no sistema, e destacaram a importância dos reatores anaeróbios em série para produção de biogás. Foi observado que o melaço é uma importante fonte de carbono para a produção de energia utilizando os reatores UASB termofílicos (18,01 MJ L⁻¹ melaço), em comparação com a fermentação alcoólica (8,30 MJ L⁻¹ de melaço), onde os autores trabalharam com dois reatores UASB em série (R1 e R2), com aplicação da COV de 7,1 g DQO_{total} (L d)⁻¹ no R1 e obtenção de valores médios de PVM de 0,10 L CH₄ (L d)⁻¹ no R1+R2, durante o período de entressafra da cana-de-açúcar (SANTANA JUNIOR et al., 2019).

No entanto, observou-se na literatura poucos trabalhos da co-digestão da vinhaça e melaço de cana-de-açúcar. Destacando-se o trabalho realizado em um reator sequencial em batelada anaeróbia, com o intuito de obtenção de metano e hidrogênio, realizando a co-digestão da vinhaça e melaço de cana-de-açúcar suplementado com micronutrientes e uréia, nas proporções de melaço e vinhaça de 33 e 67% e 25 e 75%, respectivamente (ALBANEZ et al., 2018, 2016). De acordo com Albanez et al., (2018) o aumento da porcentagem de vinhaça (75-25% vinhaça / melaço) foi desfavorável e tornou o sistema instável.

A co-digestão da vinhaça e melaço pode ser facilitada se houver um equilíbrio nutricional, pois a disponibilidade de nutrientes é um fator importante no tratamento anaeróbio em virtude das elevadas concentrações de material orgânico da vinhaça e melaço. Normalmente as concentrações de macros e micronutrientes na vinhaça não atendem as quantidades recomendadas para a digestão anaeróbia, exceto o potássio (BARROS et al., 2017; JANKE et al., 2016a).

As soluções tecnicamente e economicamente mais apropriadas para o

tratamento anaeróbio de resíduos industriais devem ser exploradas com a suplementação dos nutrientes (VILLA-MONTOYA et al., 2017). A torta de filtro, subproduto da indústria sucroenergética, é uma alternativa interessante, podendo reduzir os custos dispensando o uso de compostos químicos industrializados na digestão anaeróbia. A torta de filtro é rica em nutrientes, com concentrações de N e P de 1,72% e 0,6% dos sólidos totais (ST), respectivamente (JANKE et al., 2016b); e de K, Ca, Mg e S de 0,3; 2,1; 0,6 e 0,25% dos ST, respectivamente (PRADO et al., 2013). A torta de filtro atualmente é utilizada como fonte de energia na produção de vapor para a geração de eletricidade e como fertilizante na agricultura (CAMARGO et al., 2016).

Entre as diversas configurações de reatores anaeróbios, os reatores anaeróbios de fluxo ascendente com manta de lodo (UASB) são os mais populares na digestão anaeróbia da vinhaça, em virtude da possibilidade de aplicação de baixos tempos de detenção hidráulico (TDH). No entanto a estabilidade de produção de biogás é um problema típico na aplicação em escala real (KIANI Deh KIANI et al., 2022). O reator UASB é um sistema de tratamento biológico que utiliza a ação de microrganismos em um ambiente sem oxigênio, para remover a matéria orgânica da vinhaça e produzir biogás (FUESS et al., 2021). Como por exemplo da aplicação de um reator UASB em escala real, localizado na região de Ribeirão Preto – SP. O reator UASB possuía 5000 m³, era operado na temperatura de 55 °C para a produção de biogás da vinhaça de cana-de-açúcar, sem a suplementação de nutrientes. A eficiência do tratamento era normalmente modesta, pois a principal preocupação era apenas a produção adequada de biogás para secagem da levedura (MORAES et al., 2015). Ou seja, existe a necessidade de estratégias economicamente viáveis para o aproveitamento dos sub-produtos da indústria sucroenergética.

7.CONCLUSÃO

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 CH_4 (L d)⁻¹, respectivamente, com a aplicação de elevadas COV de até 47,28 g DQO_{total} (L d)⁻¹, durante o processo de co-digestão anaeróbia da vinhaça e melaço, suplementado com a torta de filtro. No entanto, observou-se que COV superiores a 45 g DQO_{total} (L d)⁻¹ levam ao colapso do sistema, com a acidificação dos reatores. Isso demonstra a robustez e a adaptabilidade do sistema a cargas orgânicas mais elevadas, desde que respeitado os limites de COV, tornando-o uma opção viável para o tratamento de subprodutos da indústria sucroenergética,

A recuperação bem-sucedida após a acidificação dos reatores UASB foi observada, com a redução das COV e isso destaca a resiliência desses sistemas anaeróbios. As estratégias operacionais, como a redução da carga orgânica, correção de pH com leite de cal e recirculação do efluente do R2, foram cruciais para restaurar o equilíbrio. A diminuição gradual de indicadores negativos durante a recuperação reflete a eficácia dessas medidas. Esse processo reforça a importância do monitoramento contínuo e da adaptação estratégica para garantir a estabilidade e eficiência dos reatores UASB no tratamento de efluentes complexos.

Além disso, a suplementação de nitrogênio (N) e fósforo (P) por meio da utilização da torta de filtro, um subproduto da produção de açúcar, mostrou-se adequada, juntamente com a recirculação do efluente do R2 para a estabilidade dos reatores UASB, quanto a alcalinidade e ácidos voláteis totais. A análise taxonômica indicou a presença de diversos microrganismos envolvidos na digestão anaeróbica e na produção de metano.

A análise taxonômica indicou a presença de diversos microrganismos envolvidos na digestão anaeróbica e na produção de metano. Os filos Firmicutes e Bacteroidetes dominaram os reatores UASB, sendo cruciais na degradação de compostos orgânicos. As arqueias *Methanosaeta* e *Methanosarcina* foram importantes para a conversão de acetato em metano, otimizando a eficiência do sistema.

8. REFERÊNCIAS

- AGUIAR, M. M., Wadt, L. C., Vilar, D. S., Hernández-Macedo, M. L., Kumar, V., Monteiro, R. T. R., Mulla, S. I., Bharagava, R. N., Iqbal, H., M., N., Bilal, M., Ferreira, L. F. R. (2022). Vinasse bio-valorization for enhancement of *Pleurotus* biomass productivity: chemical characterization and carbohydrate analysis. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 1-10. <https://doi.org/10.1007/s13399-021-02198-y>
- ALALAWY, A. I., Guo, Z., Almutairi, F. M., El Rabey, H. A., Al-Duais, M. A., Mohammed, G. M., ... & Sakran, M. I. (2021). Explication of structural variations in the bacterial and archaeal community of anaerobic digestion sludges: an insight through metagenomics. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 9(5), 105910.
- ALBANEZ, R., Lovato, G., Ratusznei, S.M., Zaiat, M., Rodrigues, J.A.D., 2018. Feasibility of biohydrogen production by Co-digestion of vinasse (Sugarcane stillage) and Molasses in an Ansbbr. *Brazilian J. Chem. Eng.* 35, 27–41. <https://doi.org/10.1590/0104-6632.20180351s20150807>
- ALBANEZ, R., Lovato, G., Zaiat, M., Ratusznei, S.M., Rodrigues, J.A.D., 2016. Optimization, metabolic pathways modeling and scale-up estimative of an AnSBBR applied to biohydrogen production by co-digestion of vinasse and molasses. *Int. J. Hydrogen Energy* 41, 20473–20484. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2016.08.145>.
- AMIN, F.R., Khalid, H., El-Mashad, H.M., Chen, C., Liu, G., Zhang, R., 2021. Functions of bacteria and archaea participating in the bioconversion of organic waste for methane production. *Sci. Total Environ.* 763, 143007. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.143007>
- APHA, AWWA, WPCF, 2005. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 21 th. ed. American Water Works Association/American Public Works Association/Water Environment Federation. American Public Health Association, Washington DC, USA, Washington D. C.
- ARSHAD, M., Hussain, T., Iqbal, M., Abbas, M., 2017. Enhanced ethanol production at commercial scale from molasses using high gravity technology by mutant *S. cerevisiae*. *Brazilian J. Microbiol.* 1–7. <https://doi.org/10.1016/j.bjm.2017.02.003>
- BARBOSA, M.Y.U., Alves, I., Del Nery, V., Sakamoto, I.K., Pozzi, E., Damianovic, M.H.R.Z., 2022. Methane production in a UASB reactor from sugarcane vinasse: shutdown or exchanging substrate for molasses during the off-season? *J. Water Process Eng.* 47, 1–7. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2022.102664>
- BARROS, V.G. de, Duda, R.M., Oliveira, R.A. de, 2016. Biomethane production from vinasse in UASB reactors inoculated with granular sludge. *Brazilian J. Microbiol.* 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.bjm.2016.04.021>
- BARROS, V.G., Duda, R.M., Vantini, J. da S., Omori, W.P., Ferro, M.I.T., Oliveira, R.A. de, 2017. Improved methane production from sugarcane vinasse with filter cake in thermophilic UASB reactors, with predominance of *Methanothermobacter* and *Methanosarcina* archaea and *Thermotogae* bacteria. *Bioresour. Technol.* 244, 371–381. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.07.106>
- BEDOIC, R., Dorotić, H., Schneider, D.R., Čuček, L., Čosić, B., Pukšec, T., Duić, N., 2021. Synergy between feedstock gate fee and power-to-gas: An energy and economic analysis of renewable methane production in a biogas plant. *Renew.*

- Energy 173, 12–23. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.03.124>
- BORDONAL, R. de O., Carvalho, J.L.N., Lal, R., de Figueiredo, E.B., de Oliveira, B.G., La Scala, N., 2018. Sustainability of sugarcane production in Brazil. A review. *Agron. Sustain. Dev.* 38. <https://doi.org/10.1007/s13593-018-0490-x>
- BORGES, A.V., Fuess, L. T., Alves, I., Takeda, P. Y., Damianovic, M. H. R. Z. (2021). Co-digesting sugarcane vinasse and distilled glycerol to enhance bioenergy generation in biofuel-producing plants. *Energy Conversion and Management*, 250, 114897.
- BRÁS, R., Gomes, A., Ferra, M.I.A., Pinheiro, H.M., Gonçalves, I.C., 2005. Monoazo and diazo dye decolourisation studies in a methanogenic UASB reactor. *J. Biotechnol.* 115, 57–66. <https://doi.org/10.1016/j.jbiotec.2004.08.001>
- CAI, G., Zhao, L., Wang, T., Lv, N., Li, J., Ning, J., Pan, X., Zhu, G., 2021. 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. *Sci. Total Environ.* 754, 142425. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.142425>
- CAMARGO, J.M.O., Ríos, J.M.G., Antonio, G.C., Leite, J.T.C., 2016. Physicochemical Properties of Sugarcane Industry Residues Aiming at Their Use in Energy Processes, in: Muhammad Sarwar Khan (Ed.), *Sugarcane - Biotechnology for Biofuels*. intechopen, p. 13.
- CARVALHO, J. R. S., Amaral, F. M., Florencio, L., Kato, M. T., Delforno, T. P., & Gavazza, S. (2020). Microaerated UASB reactor treating textile wastewater: The core microbiome and removal of azo dye Direct Black 22. *Chemosphere*, 242, 125157.
- CASTAÑEDA-AYARZA, J.A., Cortez, L.A.B., 2017. Final and B molasses for fuel ethanol production and some market implications. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 70, 1059–1065. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.12.010>
- CAVALCANTI, P.F., Souto Medeiros, E.J., Menezes Silva, J.K., Van Haandel, A., 1999. Excess sludge discharge frequency for UASB reactors. *Water Sci. Technol.* 40, 211–219. [https://doi.org/10.1016/S0273-1223\(99\)00628-9](https://doi.org/10.1016/S0273-1223(99)00628-9)
- CHEN, Y., Cheng, J.J., Creamer, K.S., 2008. Inhibition of anaerobic digestion process: A review. *Bioresour. Technol.* 99, 4044–4064. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2007.01.057>
- CHERNICHARO, C.A. de L., 2016. *Reatores anaeróbios: princípios do tratamento biológico em águas residuárias.*, 2. ed. ed. DESA/UFMG; 2007., Belo Horizonte.
- CHERNICHARO, C.A. de L., 2007. *Anaerobic Reactors*, 2nd ed. ed. DESA/UFMG; 2007., Belo Horizonte.
- CLARKE, M.A., 2003. SYRUPS. *Encycl. Food Sci. Food Technol. Nutr.* <https://doi.org/10.1201/b12065>
- CHERNICHARO, C.A. de L., 2015. *Anaerobic Reactors*, Water Intelligence Online. <https://doi.org/10.2166/9781780402116>
- DE SANTI CARAÇA, M., de Oliveira, R.A., Duda, R.M., 2023. Bioenergy Recovery from Anaerobic Co-Digestion of Sugarcane Vinasse and Dairy Cattle Wastewater in Two Up-Flow Anaerobic Sludge Blanket Reactors in Series. *Bioenergy Res.* <https://doi.org/10.1007/s12155-023-10614-6>
- DILALLO, R., Albertson, O.E., 1961. Volatile Acids by Direct Titration. *Water Pollut. Control Fed.* 33, 356–365.
- ESPAÑA-GAMBOA, E.I., Mijangos-Cortés, J.O., Hernández-Zárate, G., Maldonado,

- J.A.D., Alzate-Gaviria, L.M., 2012. Methane production by treating vinasses from hydrous ethanol using a modified UASB reactor. *Biotechnol. Biofuels* 5, 82. <https://doi.org/10.1186/1754-6834-5-82>
- FERNANDES, D. M. Eficiência da biodigestão anaeróbia no manejo da biomassa residual na unidade granja Colombari. 2011. 82p. Monografia (Especialização em Gestão Ambiental em Municípios), Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Medianeira.
- FUESS, L.T., de Araújo Júnior, M.M., Garcia, M.L., Zaiat, M., 2017. Designing full-scale biodigestion plants for the treatment of vinasse in sugarcane biorefineries: How phase separation and alkalization impact biogas and electricity production costs? *Chem. Eng. Res. Des.* 119, 209–220. <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2017.01.023>
- FUESS, L. T., Altoé, M. E., Felipe, M. C., Garcia, M. L. (2021). Pros and cons of fertirrigation with in natura sugarcane vinasse: Do improvements in soil fertility offset environmental and bioenergy losses? *Journal of Cleaner Production*, 319, 128684. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.128684>
- FURTADO, L.A., Guerreiro Ribeiro, S., Pradelle, F., Parise, J.A.R., 2023. Modeling and techno-economic analysis of a hybrid sugarcane plant fed by vinasse biogas and bagasse surplus for electricity generation. *J. Clean. Prod.* 413. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.137511>
- HAMZA, R.A., Iorhemen, O.T., Tay, J.H., 2016. Advances in biological systems for the treatment of high-strength wastewater. *J. Water Process Eng.* 10, 128–142. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2016.02.008>
- HOARAU, J., Caro, Y., Grondin, I., Petit, T. (2018). Sugarcane vinasse processing: Toward a status shift from waste to valuable resource. A review. *Journal of water process engineering*, 24, 11-25. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2018.05.003>
- JANKE, L., Leite, A.F., Batista, K., Silva, W., Nikolausz, M., Nelles, M., Stinner, W., 2016a. Enhancing biogas production from vinasse in sugarcane biorefineries: Effects of urea and trace elements supplementation on process performance and stability. *Bioresour. Technol.* 217, 10–20. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2016.01.110>
- JANKE, L., Leite, A.F., Nikolausz, M., Radetski, C.M., Nelles, M., Stinner, W., 2016b. Comparison of start-up strategies and process performance during semi-continuous anaerobic digestion of sugarcane filter cake co-digested with bagasse. *Waste Manag.* 48, 199–208. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2015.11.007>
- JENKINS, S. R., Morgan, J. M., Sawyer, L.C., 1983. Measuring Anaerobic Sludge Digestion and Growth by a Simple Alkalimetric Titration. *Water Pollut. Control Fed.* 55, 448–453.
- JIANG, Q., Xin, Y., Jiang, Y., Huang, L., Shen, P., 2022. Improving the efficiency of anaerobic digestion of Molasses alcohol wastewater using Cassava alcohol wastewater as a mixed feedstock. *Bioresour. Technol.* 344, 126179. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.126179>
- JUNG, Heejung; BAEK, Gahyun; LEE, Changsoo. Magnetite-assisted in situ microbial oxidation of H₂S to S₀ during anaerobic digestion: A new potential for sulfide control. **Chemical Engineering Journal**, v. 397, p. 124982, 2020.
- JÚNIOR, Cícero Bley et al. Agroenergia da biomassa residual. 2009.
- JOPPERT, C.L., dos Santos, M.M., Costa, H.K.M., dos Santos, E.M., Moreira

- Simões, J.R., 2017. Energetic shift of sugarcane bagasse using biogas produced from sugarcane vinasse in Brazilian ethanol plants. *Biomass and Bioenergy* 107, 63–73. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2017.09.011>
- KANNAN, N., Vakeesan, D., 2016. Solar energy for future world: - A review. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 62, 1092–1105. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.05.022>
- KIANI Deh KIANI, M., Parsaee, M., Safieddin Ardebili, S.M., Reyes, I.P., Fuess, L.T., Karimi, K., 2022. Different bioreactor configurations for biogas production from sugarcane vinasse: A comprehensive review. *Biomass and Bioenergy* 161, 106446. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2022.106446>
- KYTHREOTOU, N., Tassou, S. a., Florides, G., 2012. An assessment of the biomass potential of Cyprus for energy production. *Energy* 47, 253–261. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2012.09.023>
- LEME, R.M., Seabra, J.E.A., 2017. Technical-economic assessment of different biogas upgrading routes from vinasse anaerobic digestion in the Brazilian bioethanol industry. *Energy* 119, 754–766. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.11.029>
- LIMA, V. de O., Barros, V.G. De, Duda, R.M., Oliveira, R.A. De, 2022. Anaerobic digestion of vinasse and water treatment plant sludge increases methane production and stability of UASB reactors. *J. Environ. Manage.* xx, 116451. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.116451>
- MAO, C., Feng, Y., Wang, X., Ren, G., 2015. Review on research achievements of biogas from anaerobic digestion. *Renew. Sustain. Energy Rev.* <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.02.032>
- MCCARTY, P.L., 1964. *Anaerobic Waste Treatment Fundamentals - part one - Chemistry and Microbiology*. Public Work. 95, 107–112.
- MENG, X., Yuan, X., Ren, J., Wang, X., Zhu, W., Cui, Z., 2017. Methane production and characteristics of the microbial community in a two-stage fixed-bed anaerobic reactor using molasses. *Bioresour. Technol.* 241, 1050–1059. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.05.181>
- MORAES, B.S., Petersen, S.O., Zaiat, M., Sommer, S.G., Triolo, J.M., 2017. Reduction in greenhouse gas emissions from vinasse through anaerobic digestion. *Appl. Energy* 189, 21–30. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.12.009>
- MORAES, B.S., Zaiat, M., Bonomi, A., 2015. Anaerobic digestion of vinasse from sugarcane ethanol production in Brazil: Challenges and perspectives. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 44, 888–903. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.01.023>
- NADALETI, W.C., Lourenço, V.A., Filho, P.B., Santos, G.B. Dos, Przybyla, G., 2020. National potential production of methane and electrical energy from sugarcane vinasse in Brazil: A thermo-economic analysis. *J. Environ. Chem. Eng.* 8, 103422. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2019.103422>
- NKUNA, R., Roopnarain, A., Rashama, C., & Adeleke, R. (2022). Insights into organic loading rates of anaerobic digestion for biogas production: a review. *Critical Reviews in Biotechnology*, 42(4), 487-507.
- OLIVEIRA, R.A. de, 1997. 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. Universidade de São Paulo.
- PARSAEE, M., Kiani Deh Kiani, M., Karimi, K., 2019. A review of biogas production

- from sugarcane vinasse. *Biomass and Bioenergy* 122, 117–125. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2019.01.034>
- PRADO, R.D.M., Caione, G., Campos, C.N.S., 2013. Filter cake and vinasse as fertilizers contributing to conservation agriculture. *Appl. Environ. Soil Sci.* 2013. <https://doi.org/10.1155/2013/581984>
- RABII, A., Aldin, S., Dahman, Y., Elbeshbishy, E., 2019. A review on anaerobic co-digestion with a focus on the microbial populations and the effect of multi-stage digester configuration. *Energies* 12. <https://doi.org/10.3390/en12061106>
- RAINEY F. A. Bergey's Manual of Systematic Bacteriology, 2^a Ed. Volume 4, 2010.p. 585.
- RAJENDRAN, K., Mahapatra, D., Venkatraman, A.V., Muthuswamy, S., Pugazhendhi, A., 2020. Advancing anaerobic digestion through two-stage processes: Current developments and future trends. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 123, 109746. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.109746>
- RAO, A. Gangagni; Bapat, A. N. Anaerobic treatment of pre-hydrolysate liquor (PHL) from a rayon grade pulp mill: pilot and full-scale experience with UASB reactors. *Bioresource technology*, v. 97, n. 18, p. 2311-2320, 2006.
- RIPLEY, L.E., Boyle, W.C., Converse, J.C., 1986. Improved Alkalimetric Monitoring for Anaerobic Digestion of High-Strength Wastes. *J. Water Pollut. Control Fed.* 58, 406–411.
- ROCHA, D.H.D., Sakamoto, I.K., Varesche, M.B.A., 2023. Evaluation of significant factors in hydrogen production and volatile fatty acids in co-fermentation of citrus peel waste and processing wastewater. *Fuel* 354. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2023.129306>.
- SANTANA JUNIOR, A.E., Duda, R.M., Oliveira, R.A. De, 2019. Improving the energy balance of the industry of ethanol with methane production from vinasse and molasses in two-stage anaerobic reactors. *J. Clean. Prod.* <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.07.052>
- SCHMIDT, T., McCabe, B.K., Harris, P.W., Lee, S., 2018. Effect of trace element addition and increasing organic loading rates on the anaerobic digestion of cattle slaughterhouse wastewater. *Bioresour. Technol.* 264, 51–57. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2018.05.050>
- SILVA, A.F.R., Brasil, Y.L., Koch, K., Amaral, M.C.S., 2021. Resource recovery from sugarcane vinasse by anaerobic digestion – A review. *J. Environ. Manage.* 295. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.113137>
- SPEECE, R.E., 1983. Anaerobic biotechnology for industrial wastewater treatment. *Environ. Sci. Technol.* 17, 416A-427A. <https://doi.org/10.1021/es00115a001>
- TAKASHIMA, M., Shimada, K., Speece, R.E., 2011. Minimum requirements for trace metals (iron, nickel, cobalt, and zinc) in thermophilic and mesophilic methane fermentation from glucose. *Water Environ. Res.* 83, 339–346. <https://doi.org/10.2175/106143010X12780288628895>
- THANH, P.M., Ketheesan, B., Yan, Z., Stuckey, D., 2016. Trace metal speciation and bioavailability in anaerobic digestion : A review. *Biotechnol. Adv.* 34, 122–136. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2015.12.006>
- UNICA, 2023. . Histórico produção açúcar e etanol. URL <https://unicadata.com.br/listagem.php?idMn=4> (accessed 7.30.23).
- VILLA-MONTOYA, A.C., Ferro, M.I.T., de Oliveira, R.A., 2017. Removal of phenols and methane production with coffee processing wastewater supplemented with

- phosphorous. *Int. J. Environ. Sci. Technol.* 14, 61–74. <https://doi.org/10.1007/s13762-016-1124-y>
- WILCOX, S.J., Hawkes, D.L., Hawkes, F.R., Guwy, A.J., 1995. A neural network, based on bicarbonate monitoring, to control anaerobic digestion. *Water Res.* 29, 1465–1470. [https://doi.org/10.1016/0043-1354\(94\)00314-W](https://doi.org/10.1016/0043-1354(94)00314-W)
- WILKIE, A.C., Riedesel, K.J., Owens, J.M., 2000. Stillage characterization and anaerobic treatment of ethanol stillage from conventional and cellulosic feedstocks. *Biomass and Bioenergy* 19, 63–102. [https://doi.org/10.1016/S0961-9534\(00\)00017-9](https://doi.org/10.1016/S0961-9534(00)00017-9)
- YOLCAN, O.O., 2023. World energy outlook and state of renewable energy: 10-Year evaluation. *Innov. Green Dev.* 2, 100070. <https://doi.org/10.1016/j.igd.2023.100070>
- ZHAO, H.W., Viraraghavan, T., 2004. Analysis of the performance of an anaerobic digestion system at the Regina wastewater treatment plant. *Bioresour. Technol.* 95, 301–307. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2004.02.023>
- ZUO, Z., Wu, S., Zhang, W., Dong, R., 2013. Effects of organic loading rate and effluent recirculation on the performance of two-stage anaerobic digestion of vegetable waste. *Bioresour. Technol.* 146, 556–561. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2013.07.128>
- FERNANDES, D. M. Eficiência da biodigestão anaeróbia no manejo da biomassa residual na unidade granja Colombari. 2011. 82p. Monografia (Especialização em Gestão Ambiental em Municípios), Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Medianeira.
- JÚNIOR, Cícero Bley et al. *Agroenergia da biomassa residual*. 2009.
- PEDROZA, M. M.; SILVA, W. G.; CARVALHO, L. S.; SOUZA, A. R.; MACIEL, G. F. Methane and electricity production from poultry litter digestion in the amazona region of Brazil: A large-scale study. *Waster and Biomass Valorization. Review*. 2021. <https://doi.org/10.1007/s12649-021-01360-x>.
- ANGELIDAKI, I.; ALVES, B. M. D.; BORZACCONI, L.; CAMPOS, J. L.; GUWY, A. J.; KALYUZHNYI, S.; JENICEK, P.; VAN LIER, J. B. Defining the biomethane potential (BMP) of solid organic wastes and energy crops: a proposed protocol for batch assays. *Water Science Technology*. 59:927–934. 2009. <https://doi.org/10.2166/wst.2009.040>.
- BELLI FILHO, P.; CASTILHOS JÚNIOR, A. B.; COSTA, R. H. R.; SOARES, S. R.; PERDOMO, C. C. Tecnologias para o tratamento de dejetos de suínos. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.5, n.1, p.166-170, 2001.
- DA SILVA FERNANDES, Flávia et al. Current ethanol production requirements for the yeast *Saccharomyces cerevisiae*. *International Journal of Microbiology*, v. 2022, 2022.
- CARPANEZ, T. G. et al. Sugarcane vinasse as organo-mineral fertilizers feedstock: Opportunities and environmental risks. *Science of The Total Environment*, p. 154998, 2022.
- LEMOS, J.C.M.; TANCREDO, M. O. de. Uma análise comparativa entre o difusor e a moenda na extração da sacarose. 2010. 67 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Química) – Universidade de Franca, Franca, 2010
- VANDENBERGHE, L. P. S. et al. Beyond sugar and ethanol: The future of sugarcane biorefineries in Brazil. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 167, p. 112721, 2022.

- MADIGAN M. T., CLARK D. P., STAHL D., MARTINKO J. M. Brock Biology of Microorganisms. 13th ed. San Francisco: Benjamin Cummings, 2010.
- MAGOWO, Webster Edzai; SHERIDAN, Craig; RUMBOLD, Karl. Global Co-occurrence of Acid Mine Drainage and Organic Rich Industrial and Domestic Effluent: Biological sulfate reduction as a co-treatment-option, *Journal of Water Process Engineering* , v. 38, p. 101650, 2020.
- SILVA, da A. Vinhaça concentrada da cana-de-açúcar: monitoramento das propriedades químicas do solo e mineralização líquida do líquido. 2012. 109 p. Tese (Doutorado em Ciências. Área de concentração: Energia na Agricultura e no Ambiente) - Centro de Energia Nuclear na Agricultura, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2012.
- NOGUEIRA, CEC; SOUZA, SNM; MICUANSKI, VC; AZEVEDO, RL (2015). Explorando possibilidades de inserção energética do biogás da vinhaça na matriz energética do Paraná Estado, Brasil. *Comentários sobre energia renovável e sustentável*. v. 48, n. 1, 300-305p.
- VAN HAANDEL, A. et al. Methanosaeta dominate acetoclastic methanogenesis during high-rate methane production in anaerobic reactors treating distillery wastewaters. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, v. 89, n. 11, p. 1751–1759, 2014
- PAZUCH, Felix Augusto; NOGUEIRA, Carlos Eduardo Camargo; SOUZA, Samuel Nelson Melegari; MICUANSKI, Viviane Cavaler; FRIEDRICH, Leandro; LENZ, Anderson Miguel. Economic evaluation of the replacement of sugar cane bagasse by vinasse, as a source of energy in a power plant in the state of Paraná, Brazil. *63 Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 76, no. December 2015, p. 34–42, 2017. DOI 10.1016/j.rser.2017.03.047. Available at:<http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2017.03.047>.
- GAO, Ruiling et al. Production of acetone-butanol-ethanol and lipids from sugarcane molasses via coupled fermentation by *Clostridium acetobutylicum* and oleaginous yeasts. *Industrial Crops and Products*, v. 185, p. 115131, 2022.
- KABEYI, Moses Jeremiah Barasa; OLANREWAJU, Oludolapo Akanni. Sugarcane molasses to energy conversion for sustainable production and energy transition. In: 12th annual Istanbul international conference on industrial engineering and operations management. Istanbul, Turkey. 2022. p. 405.
- VILELA, R. S. et al. Biofuel production from sugarcane molasses in thermophilic anaerobic structured-bed reactors. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 144, p. 110974, 2021.
- VOLPI, Maria Paula C. et al. Use of lignocellulosic residue from second-generation ethanol production to enhance methane production through co-digestion. *BioEnergy Research*, v. 15, n. 1, p. 602-616, 2022.
- ZHANG, C. et al. Reviewing the anaerobic digestion of food waste for biogas production. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 38, p. 383–392, out. 2014.
- ZHANG, Shuhang; WANG, Jingjing; JIANG, Hong. Microbial production of value-added bioproducts and enzymes from molasses, a by-product of sugar industry. *Food chemistry*, v. 346, p. 128860, 2021.
- ZHANG, X., Jiao, P., Zhang, M., Wu, P., Zhang, Y., Wang, Y., ... & Ma, L. (2023). Impacts of organic loading rate and hydraulic retention time on organics degradation, interspecies interactions and functional traits in thermophilic

- anaerobic co-digestion of food waste and sewage sludge. *Bioresource Technology*, 370, 128578.a
- ZHANG, S., Ma, X., Sun, H., Zhao, P., Wang, Q., Wu, C., & Gao, M. (2023). Resposta da digestão anaeróbica semi-contínua de resíduos alimentares ao aumento progressivo da temperatura: comunidade metanogênica, análise de correlação e balanço energético. *Culturas e produtos industriais*, 192, 116066.b
- GONÇALVES, Carlos André et al. Chemical and technological attributes of sugarcane as functions of organomineral fertilizer based on filter cake or sewage sludge as organic matter sources. *Plos one*, v. 16, n. 12, p. e0236852, 2021.
- WONGARMAT, Worapong et al. Acidogenic phase anaerobic digestion of pretreated sugarcane filter cake for co-digestion with biogas effluent to enhance the methane production. *Fuel*, v. 310, p. 122466, 2022.
- 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.
- SIQUEIRA, J. C., Assemany, P., & Siniscalchi, L. A. B. (2022). Microbial dynamics and methanogenic potential of co-digestion of sugarcane vinasse and dairy secondary effluent in an upflow anaerobic sludge blanket reactor. *Bioresource Technology*, 361, 127654.
- RAMOS, Lucas Rodrigues; SILVA, Edson Luiz. Continuous hydrogen production from cofermentation of sugarcane vinasse and cheese whey in a thermophilic anaerobic fluidized bed reactor, 2018. *International Journal of Hydrogen Energy*, v. 43, n. 29, p. 13081-13089.
- WANG, M., Fan, Z., Wang, R., Liu, Z., Gao, F., Zhang, Z., ... & Lu, M. (2022). Nitrogen removal performance, and microbial community structure of water and its association with nitrogen metabolism of an ecological engineering pond aquaculture system. *Aquaculture Reports*, 25, 101258.
- APHA (1995) Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. 19th Edition, American Public Health Association Inc., New York.
- 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. 1997. 359 f. (vol. I e II). Tese (Doutorado em Hidráulica e Saneamento) - Escola de Engenharia, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1997., 1997.
- PASALARI, H., Gholami, M., Rezaee, A., Esrafil, A., & Farzadkia, M. (2021). Perspectives on microbial community in anaerobic digestion with emphasis on environmental parameters: a systematic review. *Chemosphere*, 270, 128618.