

Potenciais aplicações da vinhaça da cana-de-açúcar visando a produção mais limpa: uma revisão integrativa.

Potential applications of sugarcane vinasse categories to cleaner production: an integrative review

Rodrigo Menezes Wheeler*, rodrigomenezeswheeler@gmail.com; Jéssica Mendonça Ribeiro Cargnin* jessica.mribeiro@gmail.com; Ana Regina de Aguiar Dutra*, ana.dutra@unisol.br; Anelise Leal Vieira Cubas*, anelise.cubas@unisol.br; Elisa Helena Siegel Moecke*, elisa.moecke@unisol.br; Jair Juarez João*, jair.joao@unisol.br

*Universidade do Sul de Santa Catarina - Programa de Pós-graduação em Ciências Ambientais

Resumo

O consumo de recursos fósseis visando a geração de energia intensifica a emissão de gases de efeito estufa (GEE), que por sua vez pressionam negativamente as mudanças climáticas globais. Diante da urgente necessidade de redução de emissões de GEE, utilizar combustíveis de fontes renováveis e menos poluentes é uma alternativa viável sob os pontos de vista ambiental, econômico e energético. No Brasil, o principal biocombustível produzido é o etanol de cana-de-açúcar. Contudo, neste processo é gerada a vinhaça, um subproduto que devido à alta carga orgânica, concentração de nutrientes e acidez tem grande potencial poluidor. Com o objetivo de elencar as possibilidades de uso da vinhaça foi feita uma revisão bibliográfica integrativa, considerando, após pré-seleção, 19 achados primários voltados à aplicação da vinhaça como insumo. Como conclusão foram elencados a digestão anaeróbia visando a obtenção de biogás, a utilização como fonte de nutrientes para o desenvolvimento de organismos e posterior extração de biomassa, ácidos orgânicos, álcoois e enzimas, assim como a tradicional aplicação *in natura* como fertilizante e suas variantes.

Palavras-chave: Aplicações alternativas, Vinhaça de cana-de-açúcar, Produção mais limpa.

Abstract

The usage of fossil resources aiming energy generation intensifies the emission of greenhouse gases (GHG) which impact negatively the global climate changes. Considering the urgent need to reduce the emission of GHG it is a viable alternative to use renewable and less polluting fuels according to the environmental, economic, and energy perspectives. Sugarcane ethanol is the main biofuel produced in Brazil, but its process generates a subproduct called vinasse which has a great polluting potential due to its high organic load, nutrients concentration, and acidity. Aiming to list the possibilities of vinasse usage, after a pre-selection of 19 documents, an integrative bibliographic review was made considering the vinasse application as a production input. Anaerobic digestion to obtain biogas was listed, the usage of a nutrients source to the development of the organisms and subsequent biomass extraction, organic acids, alcohols and enzymes, and also the traditional application in natura as fertilizer and its variations.

Keywords: Alternative applications, Sugarcane vinasse, Cleaner production

1. Introdução

Há mais de dois séculos a sociedade explora com arrojo recursos fósseis não renováveis como carvão, petróleo e gás natural visando a geração de energia. Contudo, somente nas últimas três décadas a agenda climática e ambiental tem permeado as discussões globais. Durante esse período diversos cientistas e agências internacionais têm alertado sobre as consequências de médio e longo prazo vinculadas à utilização de combustíveis dessa natureza e sua capacidade de impactar negativamente nas mudanças climáticas mundiais. Os processos industriais, e, sobretudo, o alto consumo de combustíveis fósseis foram apontados como principais responsáveis pela emissão de gases de efeito estufa (GEE). Aliados aos problemas climáticos, o esgotamento das fontes tradicionais não renováveis de energia e a instabilidade no preço do petróleo preocupa os mercados globais e impulsiona buscas constantes por fontes alternativas e renováveis de energia que atendam a demanda mundial (CASTAÑEDA-AYARZA; GODOI, 2021; DIAS *et al.*, 2018; RAJESH BANU *et al.*, 2021; VIEIRA *et al.*, 2020).

Diante da necessidade de reduzir o consumo de combustíveis fósseis e as emissões dos GEE, os biocombustíveis têm-se destacado como fontes renováveis promissoras para substituição dos derivados de petróleo, sendo produzidos no mundo todo (MORAES; ZAIAT; BONOMI, 2015). Embora existam diversas maneiras de gerar energia limpa a partir de fontes renováveis como vento, sol e água, o uso de biomassa torna-se apropriado devido o fornecimento de combustíveis líquidos, como o bioetanol e biodiesel, utilizados em transportes (ALALWAN; ALMINSHID; ALJAAFARI, 2019). A produção de bioetanol apresenta diversas vantagens, podendo ser obtido por meio do uso de inúmeras biomassas vegetais, encontradas em abundância na natureza, dentre elas: beterraba, sacarina, melão, milho, arroz, laticínios, cana de açúcar e materiais celulósicos. Além disso, é considerada uma fonte renovável e apresentam impactos ambientais inferiores quando comparados aos causados pela gasolina fóssil (HOARAU *et al.*, 2018).

Na América do Norte, o etanol é produzido a partir de biomassa de milho, enquanto países como Brasil, Índia e Tailândia produzem etanol a partir da cana de açúcar (HOARAU *et al.*, 2018; SYDNEY *et al.*, 2020). Atualmente no mercado mundial, Brasil e Estados Unidos ocupam posições de destaque no campo da produção de biocombustíveis, em 2017 produziram 60 e 27 milhões de m³ de etanol representando 85% da produção mundial e 75% do consumo de etanol. Em 2019, foram produzidos mundialmente aproximadamente 125 milhões de m³ de etanol e estima-se que em 2024 a produção chegará a 134 milhões de m³ (CASTAÑEDA-AYARZA; GODOI, 2021; HOARAU *et al.*, 2018).

A cana-de-açúcar é uma das biomassas mais promissoras para obtenção de bioenergia e biocombustíveis no Brasil. Segundo estudos, a cana é a matéria prima mais eficiente para obtenção de etanol em termos de emissões de GEE quando comparada ao etanol proveniente de outras biomassas. A substituição da gasolina por etanol proveniente da cana reduz em 90% a emissão de GEE, enquanto o etanol proveniente do milho a taxa de redução varia entre 15% e 65%. Com o uso do etanol, entre os anos 2008 e 2018, foi possível evitar a emissão de 0,5 bilhões de toneladas de dióxido de carbono e estima-se que até 2030 sejam evitados a emissão de mais de 1,29 bilhões de toneladas de CO₂ (SYDNEY *et al.*, 2020).

O processamento da cana-de-açúcar para obtenção de etanol, gerou resultados positivos econômicos, energéticos e ambientais para o Brasil. No entanto, a produção de etanol gera grandes volumes de vinhaça, principal subproduto da etapa de destilação do mosto alcoólico (BERNAL et al., 2017; ENG SÁNCHEZ et al., 2021). Segundo Hoarau *et al.*, (2018), as indústrias sucroalcooleiras produzem com uma tonelada de biomassa 12 L de etanol, 94 kg de açúcar e geram como resíduos 156 L de vinhaça e 250 kg de bagaço, representando a geração de 13 L de vinhaça por litro de álcool produzido. Estima-se ainda que, com o aumento da produção de etanol, sejam produzidos 1742 milhões de m³ de vinhaça em 2024.

A vinhaça é considerada um dos resíduos mais poluentes provenientes da produção de etanol. É um resíduo líquido, de cor escura e odor desagradável, seu potencial poluidor é 100 vezes maior quando comparados ao esgoto sanitário devido principalmente à sua alta carga orgânica, alta demanda bioquímica de oxigênio (DBO), baixo pH (3,5 – 5,0). Além disso, a vinhaça possui em sua composição nutrientes como potássio, fósforo e nitrogênio, podendo variar conforme biomassa utilizada no processo de obtenção de etanol (HOARAU et al., 2018). Devido ao grande volume e da presença de nutrientes em sua composição, no Brasil, grande parte da vinhaça é utilizada como fertilizantes e para irrigar o próprio cultivo de cana, com objetivo de aproveitar seus nutrientes e diminuir o consumo de água. Contudo, essa prática pode ocasionar uma série de impactos ambientais como salinização e acidificação do solo, contaminação de águas subterrâneas, proliferação de insetos, liberação de odores desagradáveis, eutrofização de corpos hídricos, redução de oxigênio dissolvido e inibição de germinação (BERNAL et al., 2017; ENG SÁNCHEZ et al., 2021; MARAFON et al., 2019). Em relação ao grande volume produzido de vinhaça, tem-se ainda o problema de transporte desse resíduo. A grande quantidade produzida torna inviável seu transporte por tubulações e bombas, sendo necessário fazê-lo por canais escavados abertos, ocasionando desta forma a emissão de GEE, podendo emitir 455 g de CO₂ por L de etanol (BERNAL et al., 2017).

Sendo assim, diante do exposto, o presente artigo tem como objetivo elaborar uma revisão integrativa que apresente as formas de utilização da vinhaça, buscando tornar a produção de etanol da cana de açúcar um processo produtivo mais sustentável.

2. Metodologia

Esta revisão foi elaborada considerando seis etapas principais: identificação do tema e seleção da questão da pesquisa, estabelecimentos de critérios de inclusão e exclusão de artigos, identificação dos estudos pré-selecionados, categorização dos estudos, análise e interpretação dos dados e síntese das informações. Para tal, as informações foram extraídas da base de dados *Science Direct*, utilizando as palavras-chave: “sugarcane vinasse”, “cleaner production”, “GHG reduction” e “ethanol production”. Não foram definidos intervalos temporais, idioma de publicação ou critérios quanto à originalidade dos dados.

Após a seleção primária dos artigos, que indexou 74 publicações, foram realizadas a leitura do título, palavras-chave e resumo dos 74 documentos, sendo excluídos os artigos que não mencionaram possíveis métodos de utilização da vinhaça de cana-de-açúcar, resultando em um conjunto de 19 referências publicadas entre os anos de 2014 e 2021.

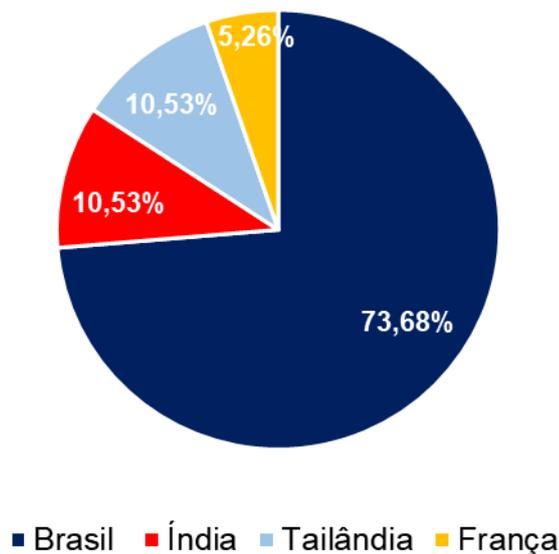
Para a análise das possíveis aplicações da vinhaça bem como as palavras mais citadas nos artigos estudados, foi utilizado o software VOSviewer, que é capaz de gerar mapas de similaridades após considerar os dados bibliométricos dos artigos selecionados.

Para a análise e posterior síntese dos artigos que atenderam aos critérios de inclusão foi utilizado um quadro sinóptico com título da pesquisa, nome dos autores, intervenção proposta, resultados e recomendações/conclusões.

3. Revisão integrativa

Dentre os 19 artigos selecionados, 14 foram publicados por instituições brasileiras, 2 por instituições indianas, 2 por instituições tailandesas e 1 por instituição francesa (figura 1).

Figura 1 – Localização das instituições dos artigos selecionados

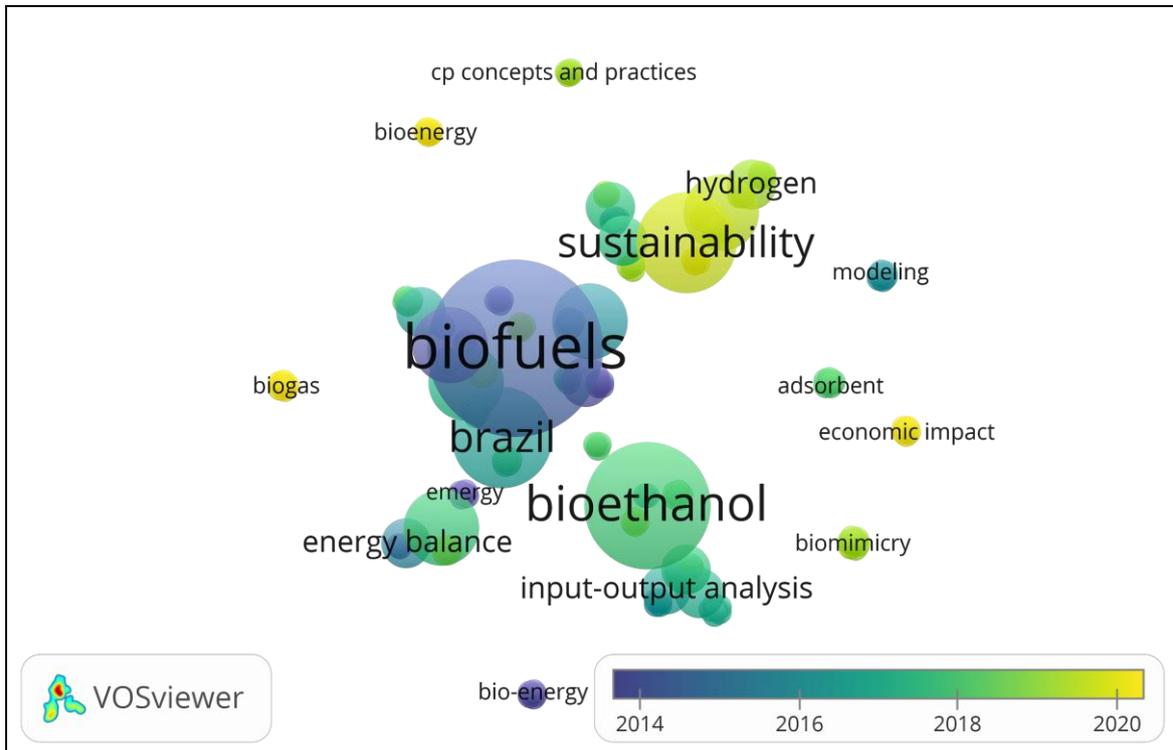


Fonte: Autores, (2021)

Considerando que o Brasil detém aproximadamente 18% da produção e 36% do comércio mundial de açúcar do globo, justifica-se a maior produção de estudos e pesquisas que envolvam esta cadeia produtiva em detrimento de outras nações (VIDAL, 2020).

As palavras mais citadas nos artigos são apresentadas na figura 2, que representa a quantidade de ocorrências através do tamanho dos círculos e o ano da ocorrência através de sua cor.

Figura 2 – Análise de ocorrência de palavras



Fonte: Autores, (2021)

Considerando o resultado na análise de ocorrências, entre as palavras mais citadas nas publicações estão biocombustíveis, energia, bioetanol, sustentabilidade, hidrogênio, biogás e Brasil.

Dentre os 19 artigos selecionados, 11 artigos mencionam a produção de biogás (energia, hidrogênio e metano) como aplicação da vinhaça, 8 mencionam o seu uso como fertilizantes, 3 mencionam a produção de biomassa e 3 a produção de ácidos orgânicos.

Os artigos que mencionaram a utilização da vinhaça para a obtenção de biogás e posterior geração de energia foram majoritariamente publicados por instituições e pesquisadores brasileiros, 63,64%, contudo, foram selecionados artigos de instituições indianas, 18,18%, de instituições tailandesas, 9,09% e francesas, 9,09%. A maioria das obras, ou seja, 54,55% foram publicadas recentemente, entre 2020 e 2021, enquanto o restante foi publicado entre 2015 e 2019.

Considerando as publicações que reportaram a possibilidade de empregar a vinhaça como fertilizante, 3 foram publicados por instituições nacionais, 2 por instituições indianas, 2 por instituições tailandesas e um deles publicado por instituição francesa. Esta heterogeneidade demonstra que esta aplicação é difundida e dominada mundialmente. As obras foram publicadas com regularidade entre os anos de 2015 e 2021, com exceção de 2017.

Os três artigos que citaram o emprego da vinhaça como fonte de nutrientes para a produção de biomassa foram publicados por instituições de três países distintos, Brasil, Índia e França nos anos de 2020, 2021 e 2018 respectivamente. Os três artigos são bem

fundamentados, especialmente a obra de Sydney et al., (2020) que apresenta conclusões de ensaios onde a vinhaça foi utilizada, diluída ou não, como meio de desenvolvimento de microrganismos distintos.

Considerando as publicações que reportaram a possibilidade de empregar a vinhaça como fertilizante, 3 foram publicados por instituições nacionais, 2 por instituições indianas, 2 por instituições tailandesas e um deles publicado por instituição francesa. Esta heterogeneidade demonstra que esta aplicação é difundida e dominada mundialmente. As obras foram publicadas com regularidade entre os anos de 2015 e 2021, com exceção de 2017.

Analisando os artigos que apresentavam a utilização da vinhaça de cana-de-açúcar na produção de ácidos orgânicos, 2 são recentes, publicados em 2020 e 2021 e outro publicado em 2018. Os três artigos foram publicados por instituições de países distintos, a publicação de 2021 é de instituição nacional, a obra de 2020 é de instituição indiana e o artigo de 2018 é francês.

4. Resultados e análises

4.1 Fertilizantes

Atualmente, a principal aplicação da vinhaça é como fertilizante. Segundo Eng Sánchez *et al.*, (2021) 97% da vinhaça produzida nos engenhos brasileiros são voltadas para a fertirrigação do próprio cultivo de cana-de-açúcar a fim de reciclar os seus nutrientes. A vinhaça é um resíduo rico em nutrientes como potássio, fósforo, nitrogênio e sulfatos, possui alta carga de materiais orgânicos biodegradáveis e baixo pH. No entanto, essa prática comum pode causar alguns impactos negativos, como afetar a estrutura do solo, contaminar corpos d'água próximos e reduzir o rendimento das culturas (BERNAL *et al.*, 2017).

Uma alternativa para essa problemática seria a biodigestão da vinhaça, o qual reduziria a matéria orgânica do resíduo, mantendo suas propriedades para ser utilizado como biofertilizante. Segundo Marafon *et al.*, (2019), no processo de digestão a matéria orgânica presente na vinhaça é degradada em compostos mais simples. A redução da relação carbono/nitrogênio ocasionada pela biodigestão favorece a aplicação da biomassa digerida como biofertilizante e corretivo do solo. As vantagens de aplicar a vinhaça no próprio cultivo incluem o aumento na produção de cana-de-açúcar, a otimização de recursos hídricos, uma vez que a vinhaça possui em sua composição 93% de água e a redução do uso de fertilizantes químicos (SYDNEY *et al.*, 2020).

Segundo Hoarau *et al.*, (2018) o pré tratamento anaeróbio é capaz de reduzir a toxicidade da vinhaça, possibilitando sua aplicação em concentrações de até 10% para irrigação de outros cultivos, como milho e hortaliças, gerando maior crescimento de raiz, número de folhas, biomassa, proteína e amido. Algumas plantas mostraram-se mais resistentes, sendo possível aplicar concentrações de vinhaça de até 50% sem efeitos inibitórios.

4.2 Biogás

Outro método de aplicação da vinhaça tem atraído a atenção de pesquisadores e industriais por seus resultados: a digestão anaeróbia. Moraes, Zaiat e Bonomi, (2015) descrevem a digestão anaeróbica como um conjunto de processos metabólicos vinculados à atividade de ao menos três grupos de microrganismos, bactérias acidogênicas, bactérias acetogênicas e arqueas metanogênicas, que ocorrem na ausência de oxigênio molecular e na presença de matéria orgânica (WIRTH *et al.*, 2012)

Durante o processo, gases com grande potencial energético, como hidrogênio e metano, são formados. Enquanto o hidrogênio é gerado pelos microrganismos acidogênicos durante a acidificação da vinhaça, o metano, constituinte principal do biogás, é produzido pelos microrganismos metanogênicos, que utilizam o hidrogênio gerado na etapa anterior como substrato (SYDNEY *et al.*, 2020).

O hidrogênio é um gás combustível de queima ambientalmente limpa e possui grande potencial calorífico, 122 MJ/Kg. Esse potencial supera o poder calorífico de diversos combustíveis, como o gás natural, com 47 MJ/Kg, o diesel, com 43 MJ/Kg, e o carvão mineral, com 25 MJ/Kg (KAPDAN; KARGI, 2006). Diante das vantagens proporcionadas por este combustível, o hidrogênio é considerado uma alternativa promissora para geração de energia e aplicações industriais (SHARMA; GHOSHAL, 2015).

O biogás é outro combustível com grande potencial de uso e por isso também é considerado uma alternativa promissora ao uso de combustíveis fósseis. Após ser submetido a processos de purificação, obtém-se valor calorífico semelhante ao observado no gás natural, 47 MJ/Kg, com a vantagem de ser obtido a partir de matriz renovável com grande disponibilidade (SZYMANSKI; BALBINOT; SCHIRMER, 2010).

Atualmente o processo de biodigestão anaeróbia é considerado a principal e mais vantajosa alternativa para a gestão da vinhaça produzida nas biorrefinarias de açúcar e álcool. A técnica de biodigestão anaeróbia supera a fertirrigação da vinhaça *in natura* pois apresenta algumas vantagens incluindo a grande redução da carga orgânica presente e os gases produzidos têm grande potencial para utilização na geração de energia, que em excesso é descarregada na rede, gerando receita (MORAES; ZAIAT; BONOMI, 2015).

A tabela 1 apresenta a caracterização da vinhaça antes e depois do processo de digestão anaeróbia. Fica evidente que a remoção de nutrientes essenciais para o desenvolvimento da lavoura como nitrogênio, fósforo e potássio em sistemas de biodigestão anaeróbia é desprezível, o que significa que o potencial fertilizante da vinhaça é mantido no efluente digerido. Além de manter esta característica, o pH da vinhaça é corrigido no processo, o que é benéfico para a lavoura e o desenvolvimento de microrganismos essenciais à saúde do solo (MORAES; ZAIAT; BONOMI, 2015).

Tabela 1 - Caracterização da vinhaça antes e após processo de digestão anaeróbia

Características	Vinhaça (antes da digestão)	Vinhaça (depois da digestão)
pH	4	6,9
DQO (g/L)	29	9
N total (g/L N)	0,55	0,6
N amoniacal (g/L)	0,04	0,22
Potássio (g/L O)	1,4	1,4
Fósforo (g/L)	0,017	0,032
Sulfato (g/L)	0,45	0,032

Fonte: Adaptado de Marafon *et al.*(2019)

4.3 Obtenção de ácidos orgânicos

Poucos são os estudos que relatam a obtenção de ácidos orgânicos através da digestão anaeróbica da vinhaça, a maioria das pesquisas é voltada para a produção de biocombustíveis como biohidrogênio e metano. Segundo Eng Sánchez *et al.*, (2021) a digestão anaeróbica da vinhaça é capaz de gerar intermediários de fase solúvel, os quais possuem valor agregado e diversas aplicações.

A digestão anaeróbica pode ser dividida em quatro fases: hidrólise, acetogênese, acidogênese e metanogênese, onde ao final das quatro etapas, tem-se biogás rico em metano que pode ser convertido posteriormente em eletricidade, combustíveis entre outras aplicações. Os ácidos orgânicos são formados na etapa acidogênica e consumidos na etapa metanogênica, sendo assim para obtenção de ácidos é necessária uma atenção maior no processo acidogênico. Através do processo de acidogênese é possível obter uma extensa variedade de ácidos orgânicos como ácido acético, propiônico, butírico e láctico e álcoois como etanol e butanol (ENG SÁNCHEZ *et al.*, 2021; MORAES; ZAIAT; BONOMI, 2015).

Segundo Hoarau *et al.*, (2018) o ácido láctico é o mais estudado por ser um produto químico versátil, podendo ser utilizado em diversos processos industriais como aromatizante, acidificante, amaciante de couro, antimicrobiano e como conservante. O ácido propiônico, é comumente utilizado na produção de aromatizantes artificiais, emulsificantes, perfumes, fungicidas e herbicidas, sendo muito utilizados em indústrias alimentícias e farmacêuticas. O ácido butírico, por sua vez, pode ser utilizado em indústrias alimentícias, na produção de emulsificantes e plastificantes.

Os ácidos orgânicos, atualmente, são obtidos através de processos químicos utilizando recursos fósseis. No entanto, estes também podem ser obtidos através do processo de digestão de efluentes ricos em matéria orgânica, assim como a vinhaça. Desta forma, a

biodigestão da vinhaça para obtenção de ácidos orgânicos, pode ser um caminho alternativo para seu uso, apresentando vantagens quando comparado aos processos químicos e condizendo com o desenvolvimento de fontes de energia sustentáveis, uso de matérias-primas de baixo custo e reaproveitamento dos resíduos (ENG SÁNCHEZ et al., 2021).

4.4 Produção de biomassa

Considerando as características principais da vinhaça, como fonte de nutrientes e relação DQO/DBO média, situação que indica a biodegradabilidade, e por existirem limitações ambientais que restringem seu uso *in natura* como fertilizante, outra alternativa é utilizá-la como fonte de nutrientes para a produção de biomassa microbiana e metabólitos (NASPOLINI et al., 2017).

A produção de biomassa demanda pouca adaptação nos processos já existentes nas biorefinarias e tem grande potencial para gerar receita a partir de resíduo que diversas vezes é descartado. A vinhaça excedente, que não é aproveitada para fertirrigação, é disposta em locais chamados de “áreas de sacrifício”, locais que devido às características da vinhaça e volume descartado, tornam-se impróprios para o cultivo. O descarte da vinhaça, além de tornar o solo improdutivo, também pode ocasionar processos de erosão do solo, eutrofização de cursos d'água, contaminação subaquática devido à lixiviação de ânions e desertificação - condições já observadas no Brasil (SYDNEY et al., 2020).

Os fungos, além de adaptarem-se às características da vinhaça, são organismos capazes de degradar compostos complexos presentes, como meloidinas e compostos fenólicos (PARNAUDEAU *et al.*, 2008). Estes organismos são conhecidos por produzir enzimas, que tem uma vasta aplicação industrial, e possuem alto teor de proteína, o que os torna uma opção para a indústria de nutrição animal. Este processo alia o alto valor agregado da biomassa gerada à redução considerável do potencial poluidor da vinhaça, o que é valioso sob a ótica da produção mais limpa (SYDNEY et al., 2020).

Devido às características da vinhaça como seu alto teor de potássio, fósforo e magnésio, este substrato é bastante explorado para a produção de microalgas. A produção de microalgas tem inúmeras vantagens, pois esses organismos são boas fontes de lipídios, que podem ser utilizados para a produção de biodiesel, e carboidratos e proteínas, que tem grande aplicação na indústria de nutrição animal, além de serem excelentes fixadores de dióxido de carbono, e possuem taxa de crescimento e fotossíntese maiores do que culturas terrestres (BHOLA *et al.*, 2014).

A tabela 2 apresenta estudos que descrevem o crescimento de fungos e microalgas em meio à base de vinhaça de cana de açúcar.

Tabela 2 – Exemplos de estudos que cultivaram algas e fungos em meio à base de vinhaça.

Microrganismo	Condições da cultura	Interesse	Aplicação	Vantagens ambientais	Referência
<i>Rhizopus oligosporus</i>	75% de vinhaça + nitrogênio + fósforo	Proteína	Alimentação	80% de redução de DQO	(NITAYAVAR DHANA; KHANAL, 2010)
<i>Aspergillus oryzae</i> , <i>Neurospora intermedia</i> , <i>Rizhopus oryzae</i> , <i>Monascus purpureus</i> e <i>Fusarium venenatum</i>	≤ 50% de vinhaça	Proteína	Alimentação de peixes	33-46% de redução de DQO	(KARIMI et al., 2019)
<i>Trametes versicolor</i>	10% de vinhaça	Lacase	Tratamento biológico	60% de redução de DQO, 80% de redução de fenol, 20% de redução de cor	(ESPAÑA-GAMBOA et al., 2015)
<i>Pleurotus sajorcaju</i> , <i>Pleurotus ostreatus</i> and <i>Trichoderma reesei</i>	Bagaço alcalino tratado + vinhaça	Enzimas celulolíticas e lignolíticas	Produção de enzimas	-	(AGUIAR; FERREIRA; MONTEIRO, 2010)
<i>Pleurotus sajorcaju</i> , <i>P. ostreatus</i> , <i>P. albidus</i> and <i>P. flabellatus</i>	Vinhaça <i>in natura</i>	Biomassa	Alimentação de peixes	-	(SARTORI et al., 2015)
<i>Scenedesmus sp.</i>	<i>Guillard</i> adaptado + 40% de vinhaça	-	Avaliação de vinhaça como fonte de nutrientes	-	(RAMIREZ; FARENZENA; TRIERWEILER, 2014)
<i>Micractinium sp. e Chlamydomonas biconvexa</i>	Vinhaça clarificada e 50% diluída	Biomassa	Produção de biomassa	67% de redução de açúcares redutores	(SANTANA et al., 2017)

Fonte: Adaptado de Sydney et al., (2020)

5. Conclusões

As biorefinarias de cana-de-açúcar são referências em produção de combustíveis de fontes renováveis, contudo geram diversos resíduos em suas operações, dentre eles a vinhaça, que por suas características, têm grande potencial poluidor e precisa ser gerenciada de forma ambientalmente correta.

Com o avanço das pesquisas e com a tecnologia mais acessível sob o ponto de vista econômico, diversas aplicações têm sido propostas à vinhaça, gerando resultados

ambientalmente e economicamente benéficos à gestão da indústria de processamento de cana-de-açúcar.

Como a vinhaça é rica em diversos nutrientes, como fósforo, potássio e magnésio e possui grande carga orgânica, é possível utilizá-la em processos de fertirrigação, que une a fertilização e irrigação, nos canaviais da própria indústria, na geração de biogás e hidrogênio através da digestão anaeróbica, que além de agregar mais valor à indústria, mantém o potencial fertilizante do meio e como base para produção de microrganismos, como fungos e microalgas, visando a produção de biomassa, que é utilizada na indústria de nutrição, e metabólitos como enzimas e ácidos orgânicos, que possuem diversas aplicações industriais.

Referências

- AGUIAR, M. M.; FERREIRA, L. F. R.; MONTEIRO, R. T. R. Use of vinasse and sugarcane bagasse for the production of enzymes by lignocellulolytic fungi. **Brazilian Archives of Biology and Technology**, v. 53, n. 5, p. 1245–1254, 2010.
- ALALWAN, H. A.; ALMINSHID, A. H.; ALJAAFARI, H. A. S. Promising evolution of biofuel generations. Subject review. **Renewable Energy Focus**, v. 28, n. 00, p. 127–139, 2019.
- BERNAL, A. P. et al. Vinasse biogas for energy generation in Brazil An assessment of economic feasibility, energy potential and avoided CO₂ emissions. **Journal of Cleaner Production**, v. 151, p. 260–271, 2017.
- BHOLA, V. et al. Overview of the potential of microalgae for CO₂ sequestration. **International Journal of Environmental Science and Technology**, v. 11, n. 7, p. 2103–2118, 2014.
- CASTAÑEDA-AYARZA, J. A.; GODOI, B. A. Macro-environmental influence on the development of Brazilian fuel ethanol between 1975 and 2019. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 137, n. October, p. 110457, 2021.
- ENG SÁNCHEZ, F. et al. Value-added soluble metabolite production from sugarcane vinasse within the carboxylate platform: An application of the anaerobic biorefinery beyond biogas production. **Fuel**, v. 286, n. September 2020, 2021.
- ESPAÑA-GAMBOA, E. et al. Phenol and color removal in hydrous ethanol vinasse in an air-pulsed bioreactor using *Trametes versicolor*. **Journal of Biochemical Technology**, v. 6, n. 3, p. 982–986, 2015.
- HOARAU, J. et al. Sugarcane vinasse processing: Toward a status shift from waste to valuable resource. A review. **Journal of Water Process Engineering**, v. 24, n. May, p. 11–25, 2018.
- KAPDAN, I. K.; KARGI, F. Bio-hydrogen production from waste materials. **Enzyme and Microbial Technology**, v. 38, n. 5, p. 569–582, 2006.
- KARIMI, S. et al. Evaluation of filamentous fungal biomass cultivated on vinasse as an alternative nutrient source of fish feed: Protein, lipid, and mineral composition. **Fermentation**, v. 5, n. 4, p. 1–19, 2019.
- MARAFON, A. C. et al. **Use of sugarcane vinasse to biogas, bioenergy, and**

biofertilizer production. [s.l.] Elsevier Inc., 2019.

MORAES, B. S.; ZAIAT, M.; BONOMI, A. Anaerobic digestion of vinasse from sugarcane ethanol production in Brazil: Challenges and perspectives. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 44, p. 888–903, 2015.

NASPOLINI, B. F. et al. Bioconversion of sugarcane vinasse into high-Added value products and energy. **BioMed Research International**, v. 2017, 2017.

NITAYAVARDHANA, S.; KHANAL, S. K. Innovative biorefinery concept for sugar-based ethanol industries: Production of protein-rich fungal biomass on vinasse as an aquaculture feed ingredient. **Bioresource Technology**, v. 101, n. 23, p. 9078–9085, 2010.

PARNAUDEAU, V. et al. Vinasse organic matter quality and mineralization potential, as influenced by raw material, fermentation and concentration processes. **Bioresource Technology**, v. 99, n. 6, p. 1553–1562, 2008.

RAJESH BANU, J. et al. Integrated biorefinery routes of biohydrogen: Possible utilization of acidogenic fermentative effluent. **Bioresource Technology**, v. 319, n. August 2020, p. 124241, 2021.

RAMIREZ, N. N. V.; FARENZENA, M.; TRIERWEILER, J. O. Growth of microalgae *Scenedesmus* sp in ethanol vinasse. **Brazilian Archives of Biology and Technology**, v. 57, n. 5, p. 630–635, 2014.

SANTANA, H. et al. Microalgae cultivation in sugarcane vinasse: Selection, growth and biochemical characterization. **Bioresource Technology**, v. 228, p. 133–140, 2017.

SARTORI, S. B. et al. Pleurotus biomass production on vinasse and its potential use for aquaculture feed. **Mycology**, v. 6, n. 1, p. 28–34, 2015.

SHARMA, S.; GHOSHAL, S. K. Hydrogen the future transportation fuel: From production to applications. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 43, p. 1151–1158, 2015.

SYDNEY, E. B. et al. Current developments and challenges of green technologies for the valorization of liquid, solid, and gaseous wastes from sugarcane ethanol production. **Journal of Hazardous Materials**, 2020.

SZYMANSKI, M. S. E.; BALBINOT, R.; SCHIRMER, W. N. Biodigestão anaeróbia da vinhaça: aproveitamento energético do biogás e obtenção de créditos de carbono – estudo de caso Anaerobic digestion of vinasse: energetic application of biogas and acquisition of credits of carbon – a case. **Semina: Ciências Agrárias**, v. 31, n. 4, p. 901–912, 2010.

VIDAL, F. Produção e mercado de açúcar. **Caderno Setorial ETENE**, p. 1–9, 2020.

VIEIRA, S. et al. Journal Pre-proofs. 2019.

WIRTH, R. et al. Characterization of a biogas-producing microbial community by short-read next generation DNA sequencing. **Biotechnology for Biofuels**, v. 5, p. 1–16, 2012.