

**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS**

ENGENHARIA AMBIENTAL

BRUNA ZERLOTTI DEMASI E LETICIA RODRIGUES DE MELO

**POTENCIAL DA PRODUÇÃO DE BIOGÁS NO ESTADO DE SÃO PAULO:
Uma análise sobre o potencial energético proveniente de vinhaça de cana-de-açúcar**

SÃO PAULO

2023

**LETÍCIA RODRIGUES DE MELO
BRUNA ZERLOTTI DEMASI**

**POTENCIAL DA PRODUÇÃO DE BIOGÁS NO ESTADO DE SÃO PAULO:
Uma análise sobre o potencial energético proveniente de vinhaça de cana-de-açúcar**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentada
à Escola de Engenharia de São Carlos, da
Universidade de São Paulo para obtenção do
título de Bacharel em Engenharia Ambiental.

Orientador: Prof. Dr. Lucas Tadeu Fuess

SÃO PAULO

2023

AUTORIZO A REPRODUÇÃO E DIVULGAÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO, POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Prof. Dr. Sérgio Rodrigues
Fontes da EESC/USP

M528p Melo, Letícia Rodrigues de
Potencial da produção de biogás no Estado de São Paulo :
uma análise sobre o potencial energético proveniente da
produção de cana de açúcar e extrato de vinhaça no estado
de São Paulo / Letícia Rodrigues de Melo, Bruna Zerlotti
Demasi; orientador Lucas Tadeu Fuess. -- São Carlos, 2023.

Monografia (Graduação em Engenharia Ambiental) -- Escola
de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo,
2023.

1. Vinhaça. 2. Cana-de-açúcar. 3. Biogás. 4. Energia.
5. Estado de São Paulo. I. Demasi, Bruna Zerlotti.
II. Título.

Elaborado por Elena Luzia Palloni Gonçalves – CRB 8/4464

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidato(a): **Bruna Zerlotti Demasi e Letícia Rodrigues de Melo**

Data da Defesa: 06/07/2023

Comissão Julgadora:

Resultado:

Lucas Tadeu Fuess (Orientador(a))

Aprovadas

Matheus Neves de Araujo

Aprovadas

Renan Coghi Rogeri

Aprovadas



Prof. Dr. Marcelo Zaiat

Coordenador da Disciplina 1800091- Trabalho de Graduação

AGRADECIMENTOS

A todos os mestres que contribuíram com a nossa formação acadêmica e profissional durante a nossa vida.

Gostaria de expressar meus sinceros agradecimentos à nossa família por seu apoio incondicional ao longo desta jornada acadêmica. Agradecemos por estarem ao nosso lado, por nos encorajar nos momentos difíceis e por celebrarem conosco nas conquistas.

À Universidade de São Paulo e a todos os seus professores que sempre proporcionaram um ensino de alta qualidade.

Ao nosso orientador Lucas Tadeu Fuess pela sua dedicação e paciência durante o projeto. Seus conhecimentos fizeram grande diferença no resultado final deste trabalho.

Aos nossos colegas Luis Fernando Pereira Brito, Julia Maria dos Santos Silva, Natália Maria Canhete, Thaissa Isabelle dos Santos, Alyson Marques Gomes e Bruna Cário Cornachioni Moruzzi pelas trocas de ideias e ajuda mútua. Juntos conseguimos avançar e ultrapassar todos os obstáculos.

A nossa República Cama de Gato, que teve papel importantíssimo durante essa trajetória, se tornando uma segunda família, com momentos que jamais esquecerei.

RESUMO

Este trabalho analisa o potencial da produção de biogás a partir da vinhaça de cana-de-açúcar no Estado de São Paulo e a viabilidade de sua utilização como substituto de energias convencionais. No Estado de São Paulo, um dos principais produtores de cana-de-açúcar do mundo, a indústria sucroalcooleira gera grandes quantidades de subprodutos, incluindo a vinhaça resultante da destilação. Por meio da digestão anaeróbia, é possível transformar a qual vinhaça em um biocombustível chamado biogás, que possui alto potencial calorífico devido ao seu teor elevado de metano. No entanto, a vinhaça, altamente poluente devido à concentração de nutrientes e matéria orgânica, pode ser biodigerida e aproveitada como fertilizante natural nas culturas de cana-de-açúcar, devido às suas características nutricionais favoráveis. Com base na análise da produção de cana-de-açúcar e, conseqüentemente, da quantidade estimada de vinhaça gerada nas diferentes regiões do Estado de São Paulo, estima-se que tenham sido produzidos aproximadamente 280 milhões de m³ de vinhaça, resultando em uma vazão de 1.214.566,13 m³/dia durante a safra de 2020. A mesorregião de maior potencial para geração de eletricidade e biometano é Ribeirão Preto, com uma média de produção de energia gerada de 14.195,5 GWh em dois cenários de eficiência de conversão diferentes. Avaliando a eficiência de conversão, o cenário A (otimista) apresenta uma eficiência de 56%, enquanto o cenário B (conservador) possui uma eficiência de 43%. Já para o consumo residencial, estima-se que o valor de vinhaça produzido no cenário otimista (cenário A) possa suprir 2,21%, e no cenário conservador (cenário B), 1,70%. Também se avaliou o potencial de geração de biometano, i.e., biogás purificado, com potencial energético estimado em 28.105 GWh. Com tal valor, seria possível suprir o consumo anual de nafta e gás de refinaria no estado de São Paulo no ano de 2020, reduzindo em 12% o consumo de combustíveis fósseis. Investimentos em infraestrutura, pesquisa, desenvolvimento de tecnologias e políticas públicas são necessários para explorar o potencial do biogás em São Paulo e reduzir o consumo de combustíveis fósseis.

Palavras Chave: biorrefinaria de cana-de-açúcar ;Vinhaça, biometano, bioenergia, agroindústria paulista.

ABSTRACT

This study analyzes the potential for biogas production from sugarcane vinasse in the state of São Paulo and the feasibility of its use as a substitute for conventional energy sources. In São Paulo, one of the world's major sugarcane producers, the sugarcane industry generates significant quantities of by-products, including vinasse resulting from distillation. Through anaerobic digestion, vinasse can be transformed into a biofuel called biogas, which has high calorific value due to its high methane content. However, vinasse, highly polluting due to its nutrient and organic matter concentration, can be biodigested and utilized as a natural fertilizer in sugarcane crops, thanks to its favorable nutritional characteristics. Based on the analysis of sugarcane production and the estimated amount of vinasse generated in different regions of São Paulo, it is estimated that approximately 280 million m³ of vinasse were produced, resulting in a flow rate of 1,214,566.13 m³/day during the 2020 harvest. The mesoregion with the highest potential for electricity and biomethane generation is Ribeirão Preto, with an average energy production of 14,195.5 GWh in two different conversion efficiency scenarios. Evaluating the conversion efficiency, scenario A (optimistic) has an efficiency of 56%, while scenario B (conservative) has an efficiency of 43%. For residential consumption, it is estimated that in the optimistic scenario (scenario A), vinasse production could cover 2.21% and in the conservative scenario (scenario B), 1.70%. The potential for biomethane generation, i.e., purified biogas, is also assessed, with an estimated energy potential of 28,105 GWh. With this value, it would be possible to meet the annual consumption of naphtha and refinery gas in the state of São Paulo in 2020, reducing fossil fuel consumption by 12%. Investments in infrastructure, research, technology development, and public policies are necessary to explore the potential of biogas in São Paulo and reduce fossil fuel consumption.

Keywords: sugarcane biorefinery, vinasse, biomethane, bioenergy, São Paulo agro-industry.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1-Mapa de distribuição das Usinas no estado de São Paulo.....	13
Figura 2-Esquema simplificado de produção de etanol de primeira geração a partir da cana-de-açúcar em uma usina anexa (o processamento da fração lignocelulósica não está indicado).....	15
Figura 3- Fluxograma de etapas do processo de digestão anaeróbica.....	20
Figura 4- Recorte geográfico das Mesorregiões do Estado de São Paulo.....	22
Figura 5 - Mapa ilustrativo da Produção de Vinhaça no Estado de São Paulo.....	29
Figura 6- Potencial de geração de energia elétrica no Cenário A ($\eta = 56\%$) segundo as mesorregiões do Estado de São Paulo.....	33
Figura 7- Potencial de geração de energia elétrica no Cenário B ($\eta = 43\%$) segundo as mesorregiões do Estado de São Paulo.....	33
Figura 8- Capacidade instalada do biometano passível de produção a partir da vinhaça segundo as mesorregiões do Estado de São Paulo.....	39

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Composição química de vinhaças conforme o tipo de mosto.....	17
Tabela 2- Tipos de mosto, origem e usina produtora.....	17
Tabela 3- Parâmetros utilizados para a estimativa de produção de vinhaça nas macrorregiões.....	23
Tabela 4 - Área cultivada em Hectares nas Macrorregiões produtoras de cana-de-açúcar do Estado de São Paulo.....	24
Tabela 5- Parâmetros utilizados para estimativa de produção de biogás e potencial elétrico.....	27
Tabela 6 - Produção de vinhaça por macrorregião referente à safra de 2019/2021..	28
Tabela 7- Potencial de geração de energia elétrica a partir do biogás oriundo da vinhaça de cana-de-açúcar.....	30
Tabela 8- Capacidade de atendimento da energia elétrica gerada no Cenário A.....	31
Tabela 9- Capacidade de atendimento da energia elétrica gerada no Cenário B.....	32
Tabela 10- Os 15 maiores consumidores do estado de São Paulo	35
Tabela 11- Produção de biometano por Mesorregião.....	36
Tabela 12- Consumo de combustíveis fósseis e potencial de substituição do biometano.....	38
Tabela 13- Consumo de combustíveis fósseis e potencial de substituição do biometano.....	40

LISTA DE ABREVIações E SÍMBOLOS

°C - Grau Celsius

% - Porcentagem

CH₄ – Metano

CO₂ – Dióxido de carbono

DQO - Demanda Química de Oxigênio

EP_{CH₄}- Energia potencial biometano

ER_{DQO}^{met} - Eficiência de remoção da DQO na fase metanogênica

GJ - Gigajoule

GNV – Gás Natural Veicular

GWh - Megawatt-hora

GW - Gigawatt

H₂- Gás Hidrogênio

H₂S- Sulfeto de hidrogênio

ha- Habitantes

IBGE- Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

kWh - Quilowatt-hora

L - Litro

MJ - Megajoule

MW - Megawatt

N₂- Nitrogênio gasoso

PCI- Potencial calorífico inferior

PEB - Potencial elétrico biometano

pH - Potencial Hidrogeniônico

QCH₄- Vazão de metano

RM- Rendimento do metano

SP - São Paulo

TOE - Tonelada Equivalente de Petróleo

UASB - Upflow Anaerobic Sludge Blanket

1. INTRODUÇÃO.....	11
1. OBJETIVO.....	12
2.1 OBJETIVO GERAL.....	12
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	12
2. REVISÃO DE LITERATURA.....	13
3.1 EVOLUÇÃO DO SETOR ALCOOLEIRO NO BRASIL.....	13
3.2 SETOR SUCROALCOOLEIRO PAULISTA.....	14
3.3 PRODUÇÃO DE CANA-DE-AÇÚCAR E ETANOL.....	15
3.4 VINHAÇA.....	17
3. METODOLOGIA.....	22
4.1. CARACTERIZAÇÃO DAS MESORREGIÕES PAULISTAS.....	23
4.2. ESTIMATIVA DA PRODUÇÃO DE VINHAÇA.....	23
4.3. MAPEAMENTO DO POTENCIAL ENERGÉTICO DA VINHAÇA.....	26
4.4. RECUPERAÇÃO DE ENERGIA A PARTIR DA VINHAÇA.....	26
4.5. ANÁLISE COMPARATIVA.....	28
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	29
5.1. PRODUÇÃO DE VINHAÇA POR MESORREGIÃO.....	29
5.2 MAPEAMENTO DO POTENCIAL ENERGÉTICO.....	30
5.3 POTENCIAL ELÉTRICO.....	31
5.3.1 Potencial Regional das Mesorregiões do Estado de São Paulo.....	32
5.4. COMPARAÇÃO COM CONSUMO ENERGÉTICO DO ESTADO DE SÃO PAULO.....	36
5.5. POTENCIAL DE SUBSTITUIÇÃO DE ELETRICIDADE.....	37
5.3 PROJEÇÃO DE PRODUÇÃO DE BIOMETANO.....	38
5.3.1 Potencial Energético do Biometano.....	39
5.3.2. Potencial De Substituição De Combustíveis Fósseis.....	40
5. CONCLUSÃO.....	42
REFERÊNCIAS.....	43

1. INTRODUÇÃO

A cana-de-açúcar é uma das principais culturas agrícolas do Brasil, principalmente no Estado de São Paulo, que concentra a maior parte da produção nacional (ABREU et al.,2011). Segundo dados da União da Indústria de Cana-de-Açúcar em 2020, o Estado de São Paulo teve cerca de 5,9 milhões de hectares de área cultivada de cana-de-açúcar, representando aproximadamente 60% da área cultivada do Brasil. Esta acentuada produção de cana-de-açúcar em terras paulistas se deve, em grande parte, ao clima favorável e às condições adequadas do solo ao seu cultivo.

A produção de açúcar e etanol a partir da cana-de-açúcar gera um resíduo líquido denominado vinhaça, que possui grande potencial energético. A vinhaça é rica em matéria orgânica e nutrientes, caracterizando-se como um excelente substrato para produção de biogás em processos anaeróbios. Diante desse contexto, este trabalho tem como objetivo principal analisar o potencial energético da produção de biogás a partir da vinhaça de cana-de-açúcar produzida no Estado de São Paulo, utilizando-se como referência a produção do etanol na safra 2019/2020.

Com base na revisão da literatura e nos estudos realizados, espera-se que esta pesquisa possa contribuir para o desenvolvimento de políticas públicas e estratégias empresariais voltadas para a produção de energia renovável a partir da vinhaça, de modo a prover um caráter mais sustentável ao processamento da cana-de-açúcar, diversificando a produção de bioenergia e reduzindo a dependência de fontes não renováveis de energia.

1. OBJETIVO

2.1 OBJETIVO GERAL

Mapear o potencial da geração de biogás a partir da vinhaça no Estado de São Paulo a partir de dados da produção de cana-de-açúcar, quantificando e propondo-se usos para a energia gerada.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Caracterizar a produção de cana-de-açúcar no Estado de São Paulo;
- Estimar o potencial produtivo de biogás a partir da vinhaça;
- Mapear o potencial bioenergético de acordo com as Mesorregiões do Estado de São Paulo;
- Estimar a produção de eletricidade e de biometano e sua capacidade para substituir fontes convencionais de energia no Estado de São Paulo a partir da vinhaça de cana-de-açúcar;

Ressalta-se que o potencial energético do biogás oriundo da vinhaça é tema frequente em estudos. Porém, a análise espacial aqui empregada é um fator inovador, o qual permite identificar locais onde a utilização deste biogás como fonte de energia renovável tem maior potencial para ser explorado.

2. REVISÃO DE LITERATURA

A presente seção tem por objetivo prover bases para o entendimento do estudo, apresentado-se características básicas do setor sucroalcooleiro no Brasil e no Estado de São Paulo, da vinhaça gerada durante a produção de etanol, da digestão anaeróbia e do biogás gerado, incluindo possíveis usos.

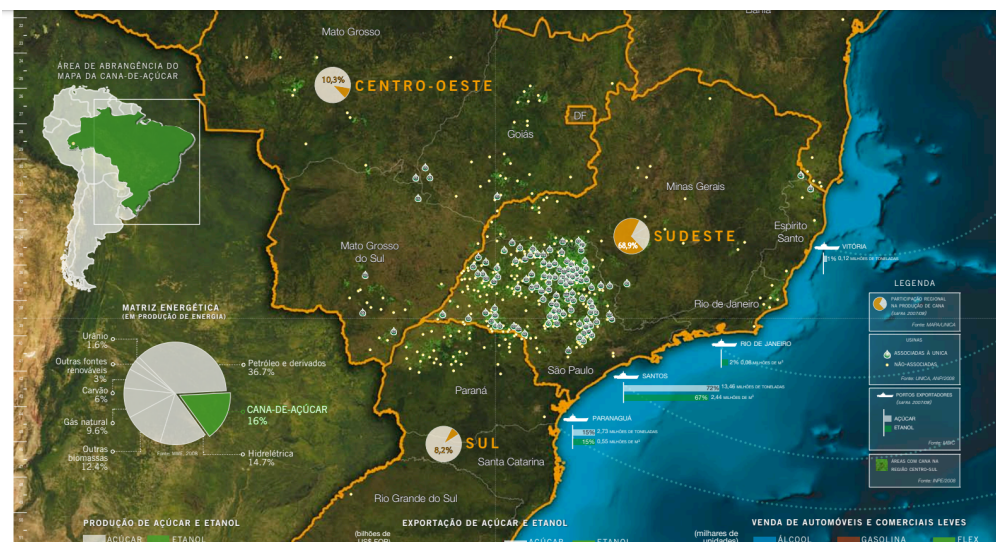
3.1 EVOLUÇÃO DO SETOR ALCOOLEIRO NO BRASIL

O Programa Nacional do Álcool (Proálcool), implementado em novembro de 1975, foi considerado um programa de referência como uma alternativa à substituição de combustíveis líquidos fósseis por fontes renováveis de energia, já que neste período ocorria a crise do petróleo. Em meados dos anos 80, o governo brasileiro promoveu incentivos e investimentos em destilarias e motivações a montadoras para a produção de automóveis movidos a etanol, por meio da [i] redução de impostos, [ii] venda de carros exclusivamente movidos a álcool e [iii] um combustível definido por lei de menor custo que a gasolina (GOLDEMBERG & LUCON, 2008). Na década de 80, cerca de 90% dos automóveis vendidos no Brasil eram movidos a etanol. Porém, com a queda do preço do petróleo, a produção de etanol hidratado declinou, resultando assim que no fim da década de 90 apenas 1% dos veículos vendidos e produzidos eram movidos ao referido biocombustíveis (ANP, 2010). A medida que foi designada a manter o etanol como ponto importante da matriz energética do país foi acrescentar à gasolina até 25% do álcool etílico em sua composição, e com o desenvolvimento da tecnologia e acompanhamento de mercado surgiram os carros denominados FLEX, veículos bicomcombustíveis capazes de operar utilizando tanto etanol quanto gasolina, dando continuidade à movimentação do mercado de energia renovável no País. De acordo com a União da Indústria de Cana-de-Açúcar (UNICA), a safra de 2021/2022 processou cerca de 578 milhões de toneladas de cana, valor aproximadamente seis vezes superior ao alcançado no início da década de 80 e que, conseqüentemente, descreve o ganho de importância do setor sucroalcooleiro no Brasil.

3.2 SETOR SUCROALCOOLEIRO PAULISTA

O Estado de São Paulo é o principal produtor de cana-de-açúcar no Brasil, sendo responsável por mais de 60% da produção brasileira. Dada a expressiva produção de etanol neste estado, São Paulo foi a área de estudo selecionada para a mensuração da produção de biogás por meio da digestão anaeróbia da vinhaça. De acordo com o IBGE, 2020, em 2020 a área cultivada chegava a cerca de 4,17 milhões de hectares, correspondendo a aproximadamente 60% da área de cultivo do país. Em relação ao volume de etanol produzido em todo território nacional, o valor obtido foi de cerca de 30 bilhões de litros, sendo que somente o estado de São Paulo possui 183 usinas (Figura 1) em operação, equivalente a 60% do total de usinas ativas no país (UNICA, 2021). Para título de estudo, somente usinas anexas serão consideradas nos cálculos. Uma destilaria anexa de cana-de-açúcar é uma instalação industrial que está diretamente conectada (anexada) a uma usina de açúcar, caracterizando um dos possíveis layouts de biorrefinarias de cana no Brasil. Há também usinas que fabricam apenas açúcar e as destilarias ditas autônomas, que produzem apenas álcool. Nas usinas com destilarias anexas os dois produtos são fabricados.

Figura 1- Mapa de distribuição das Usinas no estado de São Paulo



Fonte: UNICA, 2008.

3.3 PRODUÇÃO DE CANA-DE-AÇÚCAR E ETANOL

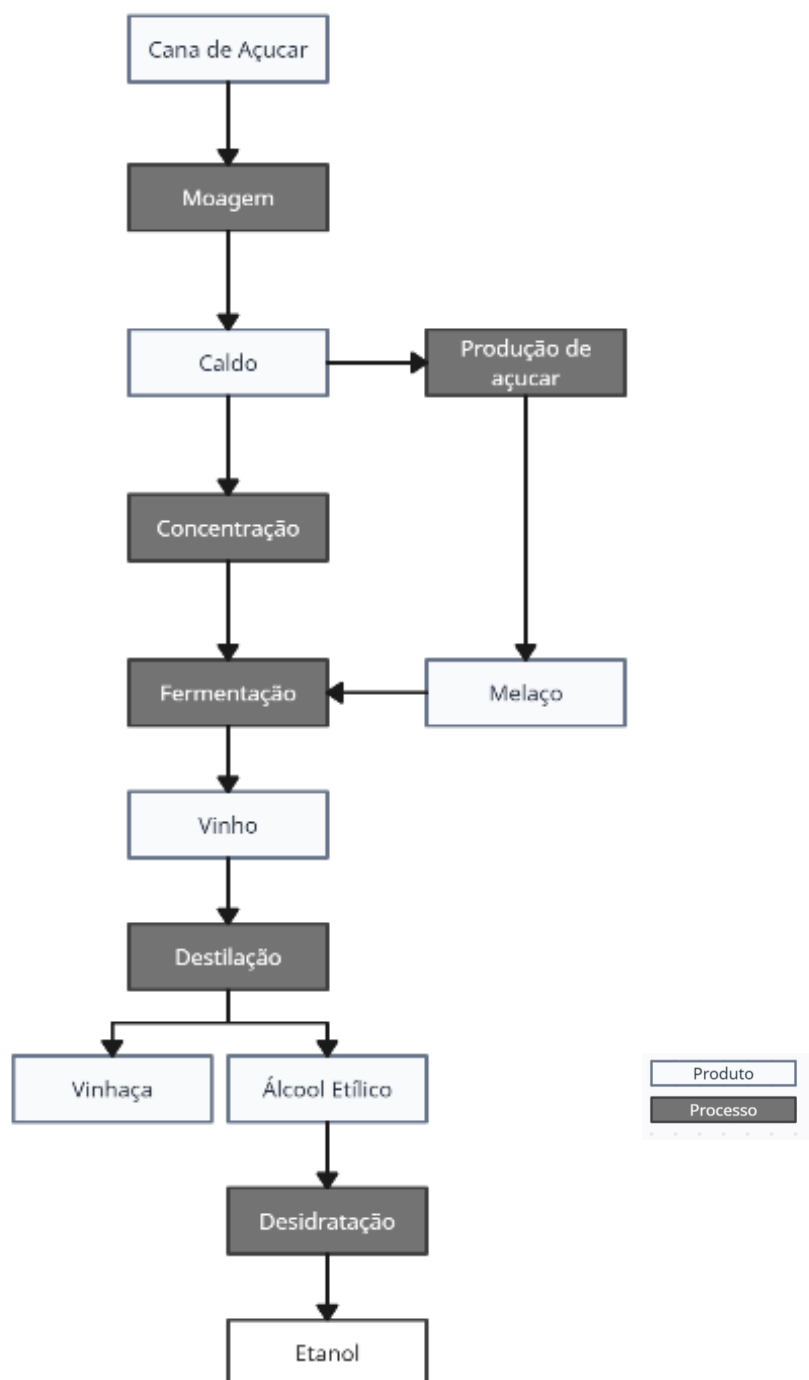
O processo de produção de etanol a partir de cana-de-açúcar pode ser dividido em cinco principais etapas descritas pela UNICA, a saber, colheita, moagem, fermentação, destilação e desidratação.

A cana-de-açúcar é colhida nos campos quando atinge o ponto de maturação adequado, quando então é cortada rente ao solo e transportada para a usina, onde será processada. Ao ser recepcionada na usina, a cana é inicialmente submetida ao processo de moagem, sendo triturada para extrair o caldo, que é caracterizado como uma mistura de água e açúcares (NOVA CANA, 2017). Desta etapa resulta o bagaço, material lignocelulósico destinado para caldeiras nas quais são cogerados vapor e eletricidade.

O caldo obtido na moagem é aquecido e passa pelo processo de clarificação, onde são removidos sólidos e impurezas, em seguida, transferido para tanques de fermentação. Nas usinas anexas, o melaço proveniente da produção de açúcar também é misturado ao caldo. Nos tanques, é adicionada levedura (*Saccharomyces cerevisiae*) para que ocorra a fermentação alcoólica, na qual os açúcares presentes no caldo são convertidos em álcool etílico (etanol) e dióxido de carbono (CO₂). Em seguida, o líquido resultante, chamado de vinho, é submetido ao processo de destilação, que consiste em aquecê-lo e separar o álcool etílico dos demais componentes, aproveitando-se das diferentes temperaturas de ebulição. O vapor rico em etanol é condensado e coletado, resultando em um líquido com maior concentração de etanol chamado de destilado (NOVA CANA, 2017). A vinhaça é uma água residual (aqui considerada como subproduto) do processo de destilação do vinho, sendo caracterizada como um líquido escuro que contém matéria orgânica e minerais (DIAS *et al.*, 2014), cuja caracterização mais detalhada será abordada no tópico 3.4. Este destilado ainda contém pequenas quantidades de água. Para produzir etanol combustível com teor alcoólico elevado, i.e., etanol anidro (geralmente em torno de 99,5% de etanol), é necessário remover a água residual. Isso é feito através de processos de desidratação, como a destilação azeotrópica ou o uso de agentes desidratantes, como a zeólita. A desidratação final resulta em um etanol com teor alcoólico elevado, adequado para ser utilizado como combustível (Embrapa, 2020).

Na Figura 2 é apresentado um fluxograma simplificado do processo de produção de etanol a partir da cana-de-açúcar em uma usina do tipo anexa.

Figura 2- Esquema simplificado de produção de etanol de primeira geração a partir da cana-de-açúcar em uma usina anexa (o processamento da fração lignocelulósica não está indicado).



Fonte: Autoras (2023)

3.4 VINHAÇA

A vinhaça de cana-de-açúcar é um subproduto gerado no processo de produção de etanol, podendo ser conhecida por outros nomes, tais como caldo, garapão, restilo ou vinhoto (MACHADO; FREIRE, 2009). É um líquido marrom escura de forte odor adocicado que contém água, nutrientes e outros compostos orgânicos, substância rica em potássio, fósforo e nitrogênio, como apresentado na Tabela 1. De acordo com Elias Neto (1988) existem três tipos de substratos fermentáveis (mosto) que podem dar origem a vinhaça, conforme apresentado na Tabela 2: mosto oriundo exclusivamente do caldo (usinas autônomas), mosto resultante da mistura de caldo e melaço (usinas anexas) e mosto obtido diretamente do melaço. O último caso não é comumente realizado em usinas brasileiras, caracterizando o processo padrão na Índia, onde a produção de açúcar ocorre separadamente da produção de etanol. O melaço gerado em uma planta é levado para a destilaria, onde é processado e transformado em etanol.

Tabela 1- Composição química de vinhaças conforme o tipo de mosto

Parâmetro	Mosto de Melaço	Mosto de Caldo	Mosto Misto
pH	4,2 - 5,0	3,7. 4,6	4.4 - 4.6
Temperatura (°C)	80 - 100	80-100	80 - 100
DBO ¹ (mg O ₂ /L)	25.000	6.000 - 16.500	19.800
DQO ² (mg O ₂ /L)	65.000	15.000 - 33.000	45.000
Sólidos totais (mg/L)	81.500	23.700	52.700
Sólidos voláteis (mg/L)	60.000	20.000	40 000
Sólidos Fixos (mg/L)	21.500	3.700	12.700
Nitrogênio (mg N /L)	450 -1.610	150 - 700	480-710
Fósforo (mg P ₂ O ₅ /L)	100 - 290	10 - 210	9 - 200
Potássio (mg K ₂ O/L)	3.740 - 7.830	1.200 - 2.100	3.340 - 4.600
Cálcio (mg CaO/L)	450 - 5.180	130 - 1.540	1.330 - 4.570
Magnésio (mg MgO/L)	420 - 1.520	200 - 490	580 - 700
Sulfato (mg SO ₄ /L)	6.400	600 - 760	3.700 - 3.730
Carbono (mg C/L)	11.200 - 22.900	5.700-13.400	8.700 - 12.100
Relação C/N	16 - 16,27	19,7 - 21,07	16,4 - 16,43
Matéria Orgânica (mg/IL	63.400	19.500	3.800
Subst. Redutoras (mg/L)	9.500	7.900	8.300

Fonte: Adaptado de Marques (2006)

Tabela 2- Tipos de mosto, origem e usina produtora.

Tipo de Mosto	Origem	Tipo de usina
Melaço	Subproduto da produção de açúcar.	Fermentadora de melaço
Caldo	Advinda de caldo direto para a fermentação alcoólica	Autônomas
Misto	Preparado através da mistura de caldo e melaço	Anexas

Fonte: Adaptado de Elias Neto (1988)

¹ DBO- Demanda Bioquímica de Oxigênio² DQO - Demanda Química de Oxigênio

É possível encontrar na literatura que, a cada litro de etanol produzido, são gerados cerca de 10 a 15 L de vinhaça (FREIRE;CORTEZ, 2000). Atualmente, o principal uso da vinhaça se dá pela fertilização da lavoura em dosagens controladas (processo de fertirrigação), reduzindo os valores gastos com fertilizantes minerais comercializados, sendo economicamente viável a depender do custo do transporte da vinhaça até o local de utilização. Porém, a legislação brasileira, derivada principalmente de normativas da Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB), utiliza apenas o teor de potássio na vinhaça e no solo como parâmetros de cálculo, negligenciado a quantidade de matéria orgânica e de outros constituintes relevantes (p.ex. sulfatos) e seu potencial poluidor no meio (MORAES et al. 2014).

De acordo com a Agência Nacional de Águas (2010), a composição da vinhaça é dependente do sistema de fermentação utilizado, no processo de destilação, qualidade e procedência da água utilizada no processo e a composição da matéria-prima utilizada na fermentação (mosto). Como resultado, a demanda química de oxigênio (DQO) pode variar entre 10 a 65 g/L, sendo sua temperatura elevada, na faixa de 85 a 90°C (Souza et al, 1992).

O descarte inadequado da vinhaça pode causar impactos ambientais negativos, sem os devidos cuidados pode levar à contaminação do solo e da água com excesso de nutrientes como nitrogênio e fósforo, além de compostos tóxicos como o próprio potássio. Essa poluição pode impactar negativamente os ecossistemas, incluindo a perda de biodiversidade e a deterioração da qualidade da água (Bollis et al., 2018).

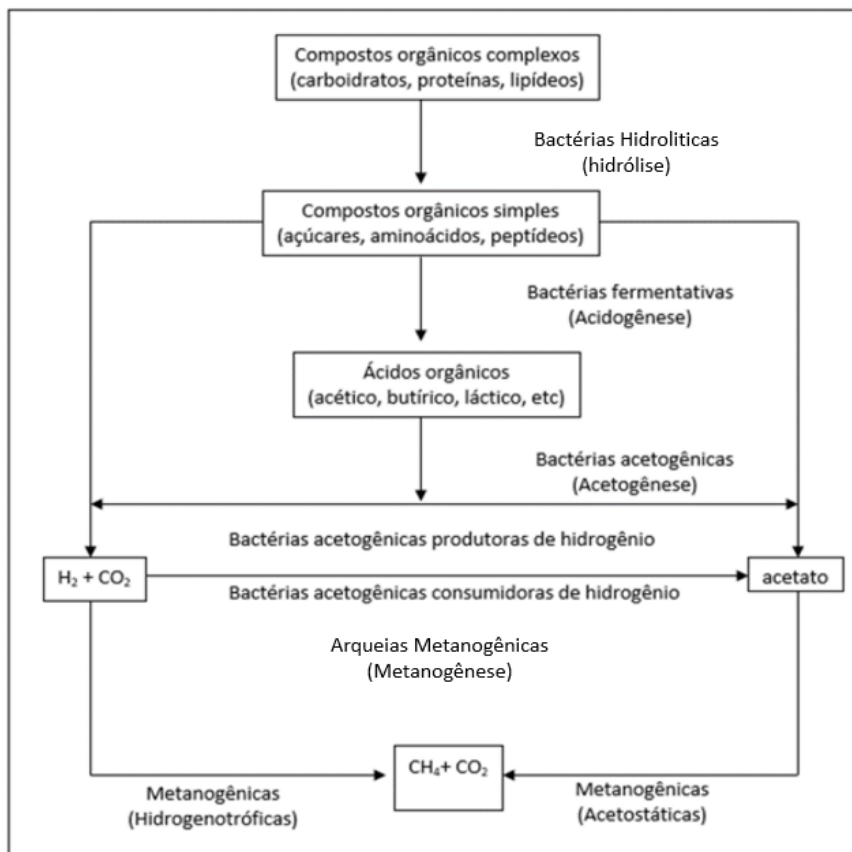
3.5 BIODIGESTÃO ANAERÓBIA E BIOGÁS

A biodigestão anaeróbia é um dos principais processos para o aproveitamento da vinhaça como alternativa à fertirrigação (Moraes et al.,2014). É um processo biológico que pode ocorrer de forma natural ou em sistemas controlados (biorreatores ou biodigestores), sendo dividido em quatro etapas principais: hidrólise, acidogênese, acetogênese e metanogênese, etapa onde é produzido o CH₄, um dos principais constituintes do biogás (CASTRO; MATEUS, 2016). A Figura 3 apresenta um fluxograma simplificado do processo anaeróbio, seguindo-se as principais etapas mencionadas anteriormente (a redução de sulfato não foi incluída neste caso). A

composição do biogás oriundo da vinhaça é de cerca de 60 a 65% de CH_4 e 35 a 40% de dióxido de carbono (CO_2) (IANNICELLI,2008). Quando tratada num biodigestor apropriado, às características fertilizantes da vinhaça são mantidas no efluente do biodigestor (i.e.vinhaça biodigerida) , dado que a remoção de nutrientes é extremamente incipiente nos processos anaeróbios. Além disso, o risco ambiental (em termos de poluição) é bastante reduzido, devido à diminuição em cerca de 90% da DQO e aumento do pH (PINTO, 1999). Tais características tornam a vinhaça biodigerida um material ambientalmente mais seguro para ser reutilizado na lavoura de cana-de-açúcar (ROCHA, 2012), embora estudos que caracterizem a viabilidade técnico-ambiental de tal processo ainda sejam escassos.

A biodigestão da vinhaça é considerada uma tecnologia limpa de acordo com os princípios do desenvolvimento sustentável. Ao aproveitar o biogás gerado a partir da vinhaça, é possível maximizar a utilização dos recursos provenientes da cana-de-açúcar, melhorando a eficiência energética do processo. Além disso, essa abordagem não descarta a possibilidade de utilizar a vinhaça na fertirrigação (FUESS et. al.,2017), somente possibilita a redução do potencial poluidor da vinhaça ao converter a matéria orgânica a CH_4 em condições controladas através do biorreator evitando assim a emissões de CH_4 (GEE) caso haja condições de sobrecarga orgânica no solo e indução de condições anaeróbias.

Figura 3- Fluxograma de etapas do processo de digestão anaeróbia



Fonte: adaptado de BALDACIN e PINTO, 2015

3.6 USOS DO BIOGÁS E BIOMETANO

O uso mais imediato do biogás é sua queima para obtenção de energia térmica, cuja aplicação pode se dar das mais diversas maneiras, seja para cocção (no caso de pequenos sistemas de biodigestão) ou para o aquecimento de etapas específicas em processos industriais. Em grandes instalações industriais, nas quais é possível a geração de grandes vazões de biogás rico em CH_4 (caso das usinas), este pode ser direcionado a diferentes acionadores primários (p.ex. motores a combustão interna, turbinas a gás e turbinas a gás acopladas a turbinas a vapor no chamado “ciclo combinado”) buscando a geração de eletricidade, a qual pode ser usada na própria planta industrial e eventualmente ter seu excesso comercializado. Em casos específicos (uso de motores e de turbinas a gás), é possível associar a geração de eletricidade e recuperação de energia térmica, o que aumenta consideravelmente o aproveitamento energético do biogás.

O poder calorífico do biogás varia de acordo com a concentração de CH_4 presente na mistura: quanto mais puro, i.e., quanto maior o teor de metano, maior o poder calorífico, podendo variar de 15 a 30 MJ/Nm³ (KUNZ et al., 2019). Para as aplicações supracitadas, basta a remoção de alguns contaminantes, sobretudo o sulfeto de hidrogênio (H_2S , normalmente presente no caso da vinhaça, dada a presença de sulfato na mesma; Tabela 1), para que o biogás seja convertido em energia.

Além da geração de eletricidade e energia térmica com o objetivo de obter um combustível de alta qualidade para geração de energia e com menor quantidade de impurezas e contaminantes, é realizado o processo de purificação do biogás a partir de processos tendo como objetivo principal a remoção de CO_2 . O tratamento visa melhorar o potencial calorífico do biogás removendo os principais contaminantes e aumentando o teor de gás metano, o que resulta em uma nova denominação para o combustível, chamado biometano (KUNZ, et al., 2019).

O biometano é um combustível que pode substituir o gás natural residencial que é composto principalmente de metano, mas tem origem fóssil na extração de poços de petróleo e gás, necessitando ter um teor de no mínimo de 90% de metano em sua composição, podendo assim ser um substituto para combustíveis fósseis, como por exemplo o diesel e outros combustíveis no setor de transportes. (KUNZ et al., 2019). Vale ressaltar que as usinas possuem permissão de acordo com a Legislação brasileira ANP 8/2015 em que as usinas possuem a permissão para inserir biometano em seus gasodutos de distribuição ou utilizar em sua própria frota na área de transporte e colheita como substituto ao Diesel, um combustível fóssil (ANP,2015)

3. METODOLOGIA

A metodologia foi dividida em quatro etapas, compreendendo [i] a caracterização das Mesorregiões do Estado no que tange à produção de cana-de-açúcar; [ii] a estimativa da produção de vinhaça, biogás e seus produtos energéticos; [iii] a elaboração de mapas ilustrativos apontando as potenciais regiões para a produção de biogás; e, por fim, [iv] a estimativa do potencial de recuperação de energia do biogás nas formas de eletricidade e de biometano.

4.1. CARACTERIZAÇÃO DAS MESORREGIÕES PAULISTAS

Foi realizado um recorte geográfico em Mesorregiões do Estado de São Paulo, apresentadas na Figura 4: Araçatuba, Araraquara, Assis, Bauru, Campinas, Itapetininga, Litoral Sul Paulista, Macro Metropolitana Paulista, Marília, Piracicaba, Metropolitana de São Paulo, Presidente Prudente, Ribeirão Preto, São José do Rio Preto e Vale do Paraíba Paulista. A divisão do território em mesorregiões é pautada no agrupamento de municípios com características sociais e principalmente econômicas similares. Os dados de área cultivada disponibilizados na base de dados da UNICA estão agrupados em macrorregiões, daí a manutenção destas na análise espacial realizada neste trabalho. A área total cultivada abrange 5.907.647 ha. Foram consideradas todas as usinas anexas produtoras do estado durante a safra de 2019/2020 dados obtidos através da UNICA (2020).

Figura 4- Recorte geográfico das mesorregiões do Estado de São Paulo



Fonte: IBGE (2018)

4.2. ESTIMATIVA DA PRODUÇÃO DE VINHAÇA

Com auxílio do software Microsoft Excel® foi calculada, para as 13 macrorregiões do Estado de São Paulo com produção ativa de cana-de-açúcar, a geração de vinhaça na safra 2019/2020, baseando-se nos parâmetros descritos na Tabela 3 e utilizando-se as Equações (1) a (4).

Tabela 3- Parâmetros utilizados para a estimativa de produção de vinhaça nas macrorregiões.

Parâmetros	Indicador	Unidade	Referência
Produtividade estimada do estado de SP (P_{Estim})	74.295	kg/ha	(CONAB, 2022)
Coeficiente de rendimento do Etanol para usinas anexas (C_{re})	53,4	L/TC	(Moraes et. al., 2014)
Produção específica de vinhaça (P_{ev})	12	L _{vinhaça} /L _{etanol}	(UNICA, 2012)
Duração da safra	232	Dias	(Santos et al., 2019)

Fonte: Das Autoras (2023)

De acordo com a Equação (1), do produto da área cultivada (A_{Cult}) e produtividade estimada do estado de SP (P_{Estim}) obtém-se a produção de cana-de-açúcar em cada mesorregião, em kg (P_{Macro}). As áreas cultivadas de cana-de-açúcar em cada mesorregião são listadas na Tabela 4.

$$P_{Macro} = A_{Cult} \cdot P_{Estim} \quad (\text{Equação 1})$$

O resultado obtido na Equação (1) foi convertido para toneladas, sendo posteriormente utilizado na Equação (2), na qual foi calculada a produção de etanol (V_{Etanol}) a partir do produto entre P_{Macro} e o coeficiente de rendimento de etanol (C_{re}) listado na Tabela 3.

$$V_{Etanol} = P_{Macro} \cdot C_{re} \quad (\text{Equação 2})$$

Tendo que a produção específica da vinhaça considerada é de 12 L vinhaça/L etanol (Tabela 3), obteve-se o volume total de vinhaça produzida por mesorregião (V_{vin}) a partir da Equação (3), que calcula o produto entre V_{Etanol} e P_{ev} .

$$V_{vin} = V_{Etanol} \cdot P_{ev} \quad (\text{Equação 3})$$

Tabela 4 - Área cultivada nas mesorregiões produtoras de cana-de-açúcar do Estado de São Paulo.

Macrorregião	Área total cultivada (ha)
Araçatuba	642.856
Araraquara	440.205
Assis	338.426
Bauru	687.991
Campinas	236.016
Itapetininga	52.649
Macro Metropolitana Paulista	24.246
Marília	87.279
Piracicaba	298.680
Presidente Prudente	569.335
Ribeirão Preto	1.402.877
São José do Rio Preto	1.127.087
Total do Estado	5.907.647

Fonte: UNICA (2020)

Por fim, dividiu-se o volume total de vinhaça gerado pela duração da safra (232 d; Tabela 3) para se obter a vazão de vinhaça ($Q_{vinhaça}$) em m³/d, como apresentado na Equação (4).

$$Q_{vinhaça} = \frac{V_{vin}}{232} \quad (\text{Equação 4})$$

4.3. MAPEAMENTO DO POTENCIAL ENERGÉTICO DA VINHAÇA

Com auxílio software QGIS 3.30.2, apresentou-se graficamente os valores de vinhaça produzida e de potencial energético (produção de eletricidade e biometano) segundo as mesorregiões do Estado de São Paulo. O *ShapeFile* de Mesorregiões obtido através da base de dados do IBGE (2020) para ilustrar as zonas potenciais no estado para a produção de eletricidade e volume de biometano, já que a produção do gás depende diretamente da vinhaça produzida.

4.4. RECUPERAÇÃO DE ENERGIA A PARTIR DA VINHAÇA

Para estimar a produção de eletricidade e de biometano a partir da vinhaça produzida no Estado de São Paulo, foi utilizada a base de cálculos proposta por Fuess e Zaiat (2018). Primeiramente foi estabelecida a vazão de metano (QCH_4), em $Nm^3 dia^{-1}$, por meio da Equação (5), considerando a vazão de vinhaça previamente calculada ($Qvinhaça$), em m^3/dia , a demanda química de oxigênio (DQO) da vinhaça, em $g L^{-1}$ ou $kg m^{-3}$, a eficiência de remoção de DQO na fase metanogênica (ER_{DQO}^{met}), em porcentagem, e o rendimento do metano (RM), em $Nm^3 CH_4 kg^{-1} DQO_{removida}$. Os valores dos parâmetros supracitados são listados na Tabela 5. É importante ressaltar que, para fins de simplificação, não se trabalhou com a vazão de biogás, cujo cálculo depende da composição do biogás (não disponível no trabalho em que RM foi obtido; Santos et al., 2019).

$$QCH_4 = Qvinhaça \cdot DQO \cdot ER_{DQO}^{met} \cdot RM \quad (\text{Equação 5})$$

A vazão de biometano ($Qbiometano$), também em $Nm^3 dia^{-1}$, foi calculada considerando-se uma perda de 2% (Muñoz et al., 2015), i.e., multiplicando-se QCH_4 por um (equivalente à eficiência de conversão η) de 98% (Equação 6). Reitera-se que a vazão de metano (QCH_4) é a vazão do referido gás diretamente liberada

durante a conversão do substrato orgânico, ao passo que a vazão de biometano ($Q_{biometano}$) é a quantidade de metano passível de exploração energética.

$$Q_{biometano} = QCH_4 \cdot \eta \quad (\text{Equação 6})$$

O potencial elétrico do metano oriunda da vinhaça (PE), em MW , foi calculado multiplicando-se QCH_4 pelo poder calorífico inferior do metano (PCI) em $MJ Nm^{-3}$ e pela eficiência de conversão elétrica (η), e dividido por 86400 para ajustes de unidade de tempo, conforme observado na Equação (7). Foram considerados dois valores distintos para a eficiência de conversão elétrica, a saber, 43% e 56%, os quais representam diferentes tecnologias de conversão do biogás. O primeiro valor se refere à aplicação de um motor de combustão interna, caracterizando um cenário conservador (cenário A). O segundo valor representa a condição operacional na qual a geração de eletricidade a partir do biogás é maximizada, utilizando-se, para tanto, um ciclo combinado (turbina a gás acoplada a uma turbina a vapor). Neste caso tem-se um cenário dito otimista (cenário B).

$$PE = \left(\frac{QCH_4 \cdot PCI \cdot \eta}{86400} \right) \quad (\text{Equação 7})$$

Para fins de análise o valor de PE , é convertido de GW para GWh .

Os valores das variáveis utilizadas foram compilados na tabela 5 com suas respectivas unidades e fontes.

Tabela 5 - Parâmetros utilizados para estimativa de produção de biogás e potencial elétrico.

Parâmetros	Indicador	Unidade	Referência
DQO	35,4	g/L (kg m^{-3})	Santos et al. (2019)
ER_{DQO}^{met}	87	%	Santos et al. (2019)
RM	0,33	$\text{Nm}^3 \text{CH}_4 \text{ kg}^{-1} \text{COD}_{removida}$	Santos et al. (2019)
η biometano	98	%	Muñoz et al., 2015
η potencial elétrico	56	%	Fuess e Zaiat (2018)
η potencial elétrico	43	%	(Fuess et al., 2017)
PCI	35,72	MJ Nm^{-3}	Santos et al. (2019)

Fonte: Das Autoras (2023)

4.5. ANÁLISE COMPARATIVA

Para fins comparativos, foram utilizados os dados sobre a produção de cana-de-açúcar, área cultivada de acordo com cada mesorregião do estado de São Paulo provenientes da base de dados da UNICA sobre a safra de 2020/2021. Já sobre os dados de consumo populacional, residencial do Estado de São Paulo foram utilizados os dados provenientes do Balanço Energético do Estado de São Paulo- Ano base 2021 (2022)

Para o cálculo da população atendida nas mesorregiões foi realizada a razão entre a produção de energia do Cenário em questão pelo consumo final energético per

capita durante o período de 232 dias (8.866,85 KWh) resultando na quantidade de população atendida com a energia produzida em cada Cenário.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nesta seção são apresentados e discutidos os resultados obtidos, incluindo a estimativa da produção de vinhaça e biogás e os potenciais usos deste, tendo em vista a segmentação do Estado de São Paulo em mesorregiões.

5.1. PRODUÇÃO DE VINHAÇA POR MESORREGIÃO

A Tabela 6 apresenta os valores de produção de vinhaça obtidos para as mesorregiões do estado, sendo possível determinar que as zonas que possuem maior produção de vinhaça são Ribeirão Preto e São José do Rio Preto. Vale ressaltar que as zonas de Litoral Sul Paulista, Vale do Paraíba Paulista e Metropolitana de São Paulo não possuem produções ativas de cana-de-açúcar.

Tabela 6 - Produção de vinhaça por macrorregião referente à safra de 2019/2021

Macrorregião	Área total cultivada (ha)	Produção cana (ton)	de Produção etanol (L)	de Produção vinhaça (L)	de
Araçatuba	642.856	47.760.986,52	2.550.436.680,17	30.662.553.345,84	
Araraquara	440.205	32.705.030,48	1.746.448.627,37	20.996.629.564,95	
Assis	338.426	25.143.359,67	1.342.655.406,38	16.142.036.908,14	
Bauru	687.991	51.114.291,35	2.729.503.157,82	32.815.375.043,49	
Campinas	236.016	17.534.808,72	936.358.785,65	11.257.347.198,24	
Itapetininga	52.649	3.911.557,46	208.877.168,10	2.511.219.886,11	
Litoral Sul Paulista	-	-	-	-	
Macro Metropolitana Paulista	24.246	1.801.356,57	96.192.440,84	1.156.470.917,94	
Metropolitana de São Paulo	-	-	-	-	
Marília	87.279	6.484.393,31	346.266.602,49	4.162.980.501,81	
Piracicaba	298.680	22.190.430,60	1.184.968.994,04	14.246.256.445,20	
Presidente Prudente	569.335	42.298.743,83	2.258.752.920,26	27.155.793.535,65	
Ribeirão Preto	1.402.877	104.226.746,72	5.565.708.274,58	66.913.571.391,03	
São José do Rio Preto	1.127.087	83.736.928,67	4.471.551.990,71	53.759.108.202,93	
Vale do Paraíba Paulista	-	-	-	-	
Total Estado	5.907.647	438.908.633,87	23.437.721.048,39	281.779.342.941,33	

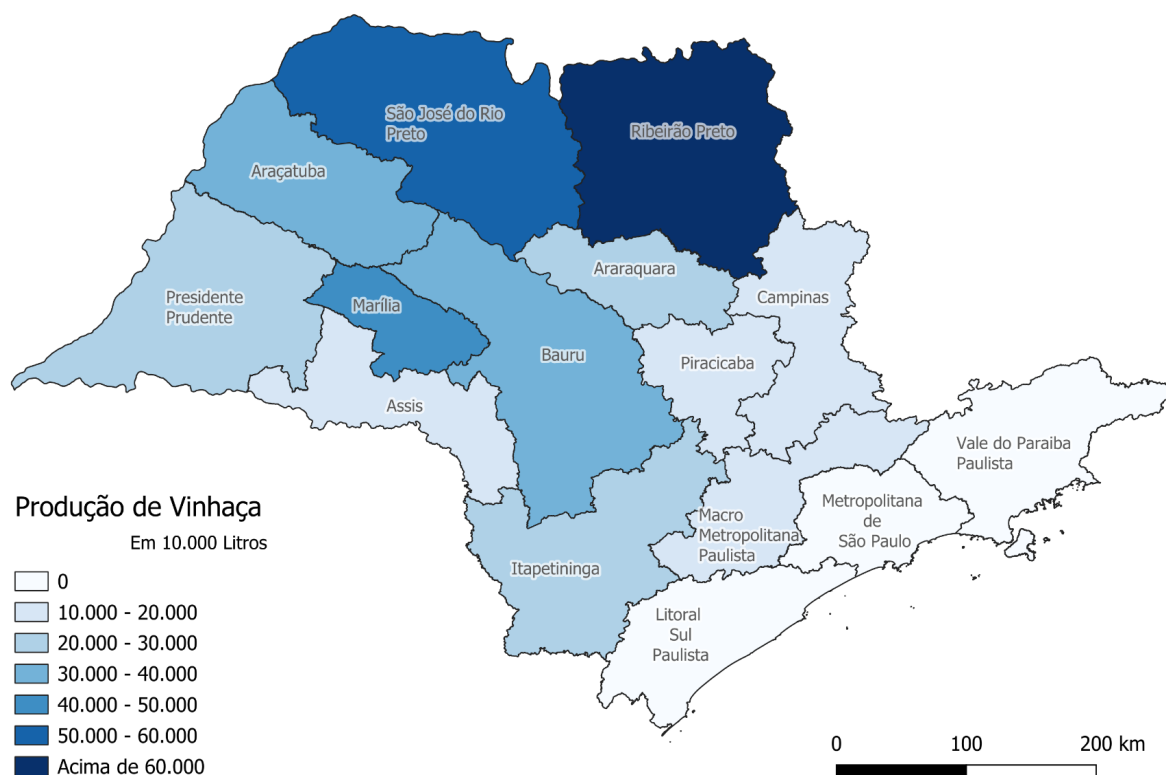
Fonte: Das autoras (2023)

5.2 MAPEAMENTO DO POTENCIAL ENERGÉTICO

Seguindo-se a distribuição da produção de cana-de-açúcar no Estado de São Paulo, identifica-se uma maior produção de vinhaça na região Norte do estado, onde estão localizadas as mesorregiões de Ribeirão Preto e São José do Rio Preto, sendo a

maior concentração produtiva do estado localizada na região Norte e Noroeste (Figura 5). Se por um lado isso indica um maior potencial energético nesta região, conforme indicado nos tópicos seguintes, por outro lado verifica-se uma maior susceptibilidade da mesma à ocorrência de impactos ambientais no caso da aplicação inadequada da vinhaça nas lavouras, ressaltando-se a importância da biodigestão como estratégia de gerenciamento para controle da poluição.

Figura 5 - Mapa ilustrativo da Produção de Vinhaça no Estado de São Paulo



Fonte: Autoras (2023)

5.3 POTENCIAL ELÉTRICO

Para cálculo do potencial elétrico a partir da Q_{metano} foram avaliados dois cenários diferentes para eficiência de conversão (η), sendo o cenário (A) considerado otimista, utilizando uma eficiência de conversão de 56%, justificada pelo uso de ciclo combinado de turbina a gás e turbina a vapor e o cenário (B) sendo mais

conservador, utilizando eficiência de conversão de 43% para um motor a combustão interna. Os resultados considerando-se a produção elétrica total no estado são listados na Tabela 7.

Tabela 7- Potencial de geração de energia elétrica a partir do biogás oriundo da vinhaça de cana-de-açúcar.

	Cenário A	Cenário B
Potencial Elétrico (GW)	2,88	2,21
Energia Gerada (GWh)	16.060	12.331

Fonte: Autoras (2023)

5.3.1 Potencial Regional das Mesorregiões do Estado de São Paulo

Analizando a relação entre a possível produção de energia de cada mesorregião e o quanto poderia ser atendida com a produção atendida foi obtido os valores na Tabela 9, indicando a possível porcentagem de população atendida de acordo com a energia produzida no período da safra (232 dias).

De acordo com a divisão de cenários otimista (Cenário A) e conservador (Cenário B), foram separadas análises entre A e B para análise do potencial. Em relação ao cenário A, as mesorregiões de Araçatuba e Presidente Prudente têm potencial de suprir energeticamente mais de 20% do consumo de sua população, conforme apresentado na Tabela 8. Já no cenário conservador (Cenário B), apresentado na Tabela 8, a porcentagem mais alta de atendimento da população foi de 19,50% em Araçatuba e 16,85% em Presidente Prudente. O mapeamento do potencial de geração de eletricidade a partir da vinhaça no estado está apresentado nas Figuras 6 e 7, representando os cenários A e B, respectivamente. Em ambos os cenários, as Mesorregiões de Litoral Sul Paulista, Macro Metropolitana de São Paulo e Vale do Paraíba Paulista não possuem produção de cana-de-açúcar registrada.

Tabela 8- Capacidade de atendimento da energia elétrica gerada no Cenário A.

Macrorregião	Produção de energia (GWh)	População da Mesorregião	População atendida	Porcentagem da população Atendida
Araçatuba	1.747,61	775.953	197.095,36	25,40%
Araraquara	1.196,70	924.978	134.963,91	14,59%
Assis	920,02	606.278	103.759,15	17,11%
Bauru	1.870,32	1.637.013	210.933,44	12,89%
Campinas	641,61	4.412.254	72.360,93	1,64%
Itapetininga	143,13	923.575	16.141,83	1,75%
Litoral Sul Paulista	0,00	513.766	0,00	0,00
Macro Metropolitana Paulista	65,91	3.108.371	7.433,66	0,24%
Marília	237,27	475.126	26.759,16	5,63%
Metropolitana de São Paulo	0,00	0,00	0,00	0,00
Piracicaba	811,97	1.815.689	1.573,29	5,04%
Presidente Prudente	1.547,75	795.338	174.554,31	21,95%
Ribeirão Preto	3.813,74	2.714.030	430.112,72	15,85%
São José do Rio Preto	3.064,00	1.761.991	345.557,35	19,61%
Vale do Paraíba Paulista	0,00	0,00	0,00	0,00
Total Estado	16.060,04	46.777.020	1.151.257,16	2,61%

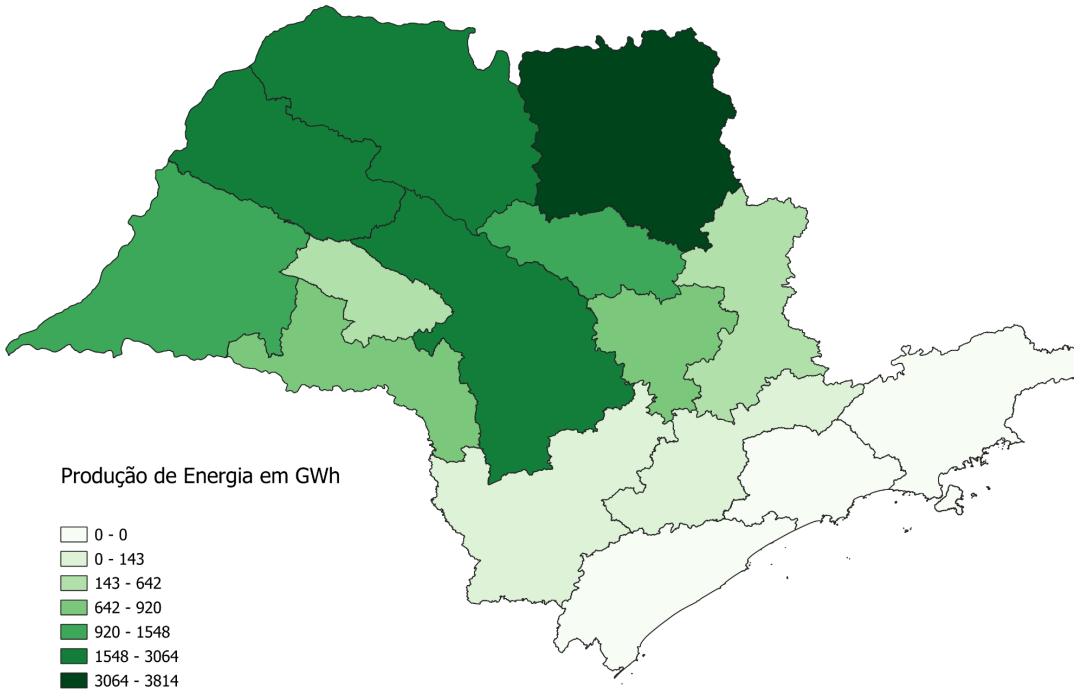
Fonte: Das autoras (2023)

Tabela 9- Capacidade de atendimento da energia elétrica gerada no Cenário B.

Macrorregião	Produção de energia (GWh)	População da Mesorregião	População atendida	Porcentagem da população Atendida
Araçatuba	1.342	775.953	151.341,08	19,50%
Araraquara	919	924.978	103.633,00	11,20%
Assis	706	606.278	79.672,21	13,14%
Bauru	1.436	1.637.013	161.966,75	9,89%
Campinas	493	4.412.254	55.562,86	1,26%
Itapetininga	110	923.575	12.394,62	1,34%
Litoral Sul Paulista	0,00	0,00	0,00	0,00
Macro Metropolitana Paulista	51	3.108.371	5.707,99	0,18%
Marília	182	475.126	20.547,21	4,32%
Metropolitana de São Paulo	0,00	0,00	0,00	0,00
Piracicaba	623	1.815.689	70.315,21	3,87%
Presidente Prudente	1.188	795.338	134.032,77	16,85%
Ribeirão Preto	2.928	2.714.030	330.265,12	12,17%
São José do Rio Preto	2.353	1.761.991	265.338,68	15,06%
Vale do Paraíba Paulista	0,00	0,00	0,00	0,00
Total Estado	12.332	44.177.802	884.001,04	2,00%

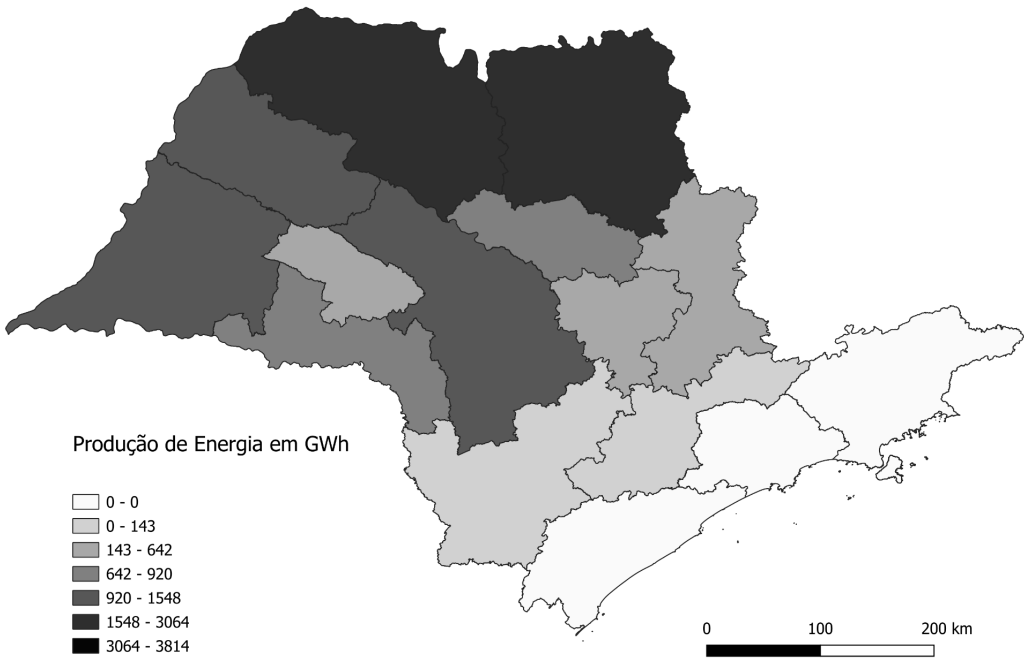
Fonte: Das autoras (2023)

Figura 6- Potencial de geração de energia elétrica no Cenário A ($\eta = 56\%$) segundo as mesorregiões do Estado de São Paulo.



Fonte: Das autoras (2023)

Figura 7- Potencial de geração de energia elétrica no Cenário B ($\eta = 43\%$) segundo as mesorregiões do Estado de São Paulo.



Fonte: Das autoras (2023)

5.4. COMPARAÇÃO COM CONSUMO ENERGÉTICO DO ESTADO DE SÃO PAULO

De acordo com o Anuário de Energéticos por Município 2022 - Ano base 2021 (2022), o consumo total de energia elétrica no Estado de São Paulo no ano de 2021 foi de 134.699,490 GWh, dos quais 42.240 GWh correspondem ao consumo residencial. As concessionárias do setor no estado contabilizaram um total de 18.212.546 residências, o que leva a um consumo de 2.319 kWh por residência.

Utilizando os dados informados no Anuário de Energéticos por município no Estado de São Paulo, tem-se a lista dos 15 municípios com maior consumo de energia elétrica residencial no Estado de São Paulo (Tabela 10), ressaltando que, os municípios apresentados estão elencados em maiores consumidores somando todos os tipos de consumo (Residencial, Comercial, Industrial, Iluminação Pública, Poder Público, Serviço Público e consumo próprio) e realizado um recorte somente no setor residencial. Os resultados obtidos para a geração de eletricidade a partir do biogás indicam o potencial de suprir totalmente o consumo energético residencial da capital do estado. Considerando o somatório dos 15 maiores consumidores, cerca de 64% (Cenário B) e 84% (Cenário A) do consumo total seriam atendidos. Destaca-se que alguns dos municípios listados na Tabela 10 estão fora das mesorregiões avaliadas, sendo um eventual abastecimento destes municípios com eletricidade derivada da vinhaça dependente de uma eficiente distribuição na rede, acarretando em maiores perdas.

Em relação ao consumo final energético per capita, utilizando os valores estimados pelo Balanço Energético do Estado de São Paulo (2021) que tem como o consumo por habitante de 1,395 toe/hab anual e por safra convertendo TOE para kWh um consumo em 232 dias o consumo per capita anual é de 16223,85 kWh/hab. Nos 232 dias de safra o consumo é 10312,15 kWh/hab, o que resulta em populações atendidas de cerca de 1,6 milhões no Cenário A e 1,2 milhões no Cenário B. Vale ressaltar que, o valor de consumo per capita engloba todos os consumos energéticos do estado (Residencial, Comercial, industrial, etc) com isso é possível

observar diferenças em relação aos resultados entre o consumo residencial e per capita apresentados.

Tabela 10- Os 15 maiores consumidores do estado de São Paulo.

Municípios	Número de consumidores (residenciais)	Consumo (GWh)
Alumínio	5.490	11,86
Cubatão	35.879	85,83
Pindamonhangaba	62.840	132,55
Limeira	120.418	276,35
Piracicaba	178.665	436,89
Jundiaí	185.142	461,7
São José dos Campos	273.558	614,43
Osasco	285.225	649,82
Ribeirão Preto	295.399	818,73
Sorocaba	304.273	728,58
Santo André	306.439	730,65
São Bernardo do Campo	319.204	739,04
Guarulhos	462.778	990,98
Campinas	471.430	1.174,43
São Paulo	4.736.032	11.297,55
Total das 15 maiores	8.042.772	19.149,34

Fonte: Anuário de Energéticos por município do Estado.

5.5. POTENCIAL DE SUBSTITUIÇÃO DE ELETRICIDADE

De acordo com o Balanço energético do Estado de São Paulo (2022), as usinas hidrelétricas e termelétricas localizadas no Estado de São Paulo possuem uma capacidade instalada de 23.908 MW, representando cerca de 13,7% da capacidade total instalada no Brasil, sendo em sua maioria de matriz hidráulica, como Pequena Central Hidrelétrica (PCH), Centrais Geradoras Hidrelétricas (CGH) e Usina Hidrelétrica (UHE).

Foi comparado o potencial energético da vazão de biogás aplicada à produção de energia elétrica, Cenário A e Cenário B, com as outras fontes energéticas do Estado de São Paulo e compilado na Tabela 11.

Tabela 11 - Potencial de substituição energético por categoria

Categoria	MW	Biomassa cenário B	Biomassa cenário A
CGH	53,97	2%	2%
PCH	307,598	11%	14%
UHE	14536,38	504%	656%
UTE ³ BIOMASSA	6620,312	230%	299%
UTE ³ FÓSSIL	2372,099	82%	107%
FOTOVOLTAICA	587,064	20%	27%
BIOGÁS CENARIO A	2884,346	-	-
BIOGÁS CENARIO B	2214,766	-	-

fonte: Autoras(2023)

Observa-se que o potencial elétrico tanto do Cenário A quanto do Cenário B é capaz de superar o potencial Fotovoltaico e Térmica Fóssil produzidos no Estado. Tendo de fato que, a matriz energética brasileira é baseada na energia hidroelétrica, sendo que as térmicas fósseis são acionadas somente para suprir eletricamente em caso de baixa nos reservatórios, fator ligado diretamente a falta de pluviosidade. Como a safra de Cana-de-açúcar ocorre entre os meses de Abril a Novembro, coincidentemente é o período com baixa pluviosidade, tendo em comum ambas as sazonalidades de suprimento de energia no período de baixa pluviosidade.

5.3 PROJEÇÃO DE PRODUÇÃO DE BIOMETANO

A partir da vazão da vinhaça obtida 1.214.566,13 m³/dia, a qual representa o valor total para o Estado, foi calculada a vazão do metano (QCH_4), resultando em 12.5

³ Usina Termo Elétrica

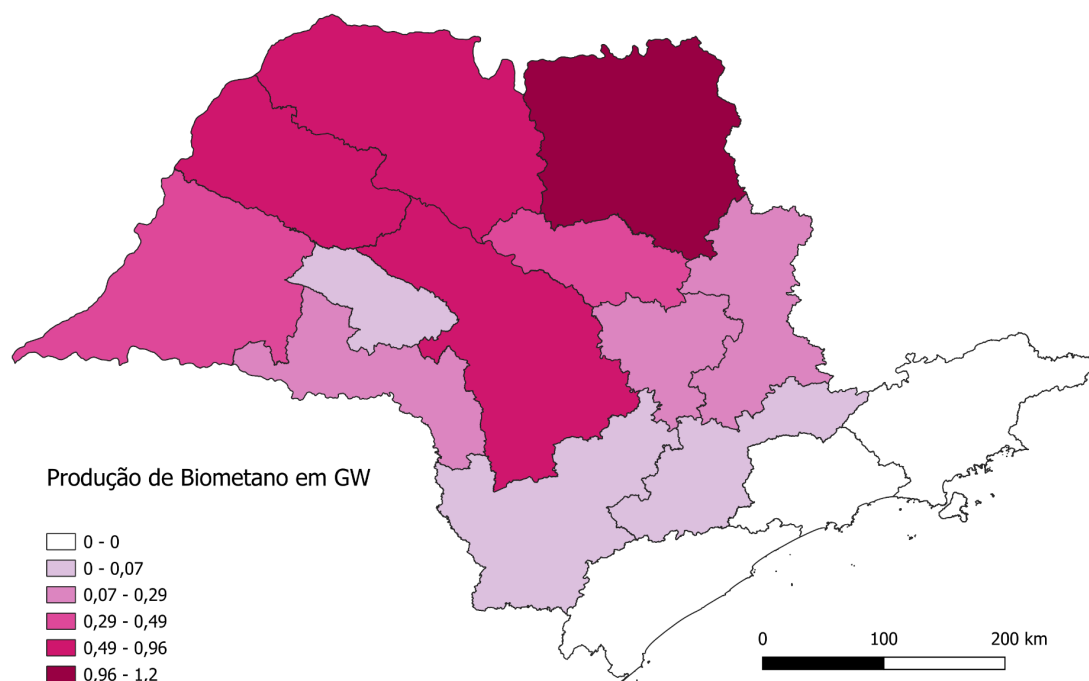
milhões de m³/dia. Considerando-se a perda de 2%, a produção de biometano chegou a 12.2 milhões de m³/dia para todo o estado.

5.3.1 Potencial Energético do Biometano

A capacidade referente ao biometano oriundo da vinhaça foi estimada em 5,05 GW, levando a uma geração de energia de 28.105 GWh ao se considerar o período de safra.

Para melhor análise do potencial energético do biometano foi avaliado o desempenho em mesorregiões, listado na Tabela 12, e mapeado na Figura 8. O padrão é o mesmo observado para a geração de vinhaça, com uma maior capacidade de geração no norte do estado, e diminuindo conforme se aproxima das áreas mais metropolitanas.

Figura 8- Capacidade instalada do biometano passível de produção a partir da vinhaça segundo as mesorregiões do Estado de São Paulo.



Fonte: Das Autoras (2023)

Tabela 12- Produção de biometano por Mesorregião

Macrorregião	Potencial de energia (GW)
Araçatuba	0,55
Araraquara	0,38
Assis	0,29
Bauru	0,59
Campinas	0,20
Itapetininga	0,04
Litoral Sul Paulista	0,00
Macro Metropolitana Paulista	0,02
Marília	0,07
Metropolitana de São Paulo	0,00
Piracicaba	0,26
Presidente Prudente	0,49
Ribeirão Preto	1,20
São José do Rio Preto	0,96
Vale do Paraíba Paulista	0

Fonte: Das autoras, 2023

5.3.2. Potencial De Substituição De Combustíveis Fósseis

O potencial energético do biometano (28.105 GWh) foi comparado com o consumo de combustíveis fósseis no Estado de São Paulo, informados no Balanço Energético do Estado em 2021 (Tabela 12). O comparativo indica que o biometano produzido a partir da vinhaça seria suficiente para substituir o uso de nafta e gás de refinaria juntos.

A tabela 13 também apresenta as informações entre todos os combustíveis fósseis e o biometano, indicando que seria possível reduzir o consumo de combustíveis fósseis em 12% em comparação com a quantidade atualmente utilizada.

Tabela 13- Consumo de combustíveis fósseis e potencial de substituição do biometano

Combustível	GWh	Potencial de substituição (%)
DERIVADOS DE PETRÓLEO	235.660	12%
Óleo Diesel	106.870	26%
Gasolina	1.290	2179%
GLP	49.790	56%
Querosene	19.860	142%
Nafta	12.670	222%
Gás de Refinaria	17.990	156%
Gás Canalizado	9.540	295%
POSSÍVEL POTENCIAL DE BIOMETANO 28.105		

Fonte: Balanço Energético do Estado de São Paulo de 2021 (Adaptado, autores 2023)

5. CONCLUSÃO

A partir dos resultados elencados no dado trabalho foi possível concluir que, a utilização da vinhaça para produção de biometano puro é viabilizado tecnicamente, já que, com a sua destinação correta é possível, no estado de São Paulo, gerar cerca de 12,2 milhões de m³/dia, tendo um potencial energético de 28.105 GWh.

As regiões Norte e Noroeste do estado são as maiores produtoras, porém as regiões que têm potencial para suprir o consumo per capita em mais de 15% são as mesorregiões de Araçatuba e Presidente Prudente, independentemente da eficiência de conversão elétrica assumida. Observa-se que quanto mais próximos de regiões metropolitanas o potencial energético diminui significativamente.

Tratando sobre o potencial de substituição de acordo com o consumo no estado é possível reduzir diretamente aproximadamente 12% da utilização de fontes de combustíveis fósseis via emprego do biometano, enquanto a eletricidade gerada tem potencial para suprir a demanda residencial por completa da mesorregião de Araçatuba ou Litoral Sul Paulista.

Com um investimento governamental significativo seria possível a implementação deste projeto energético, desafogando outras fontes utilizadas e diminuindo consequentemente o impacto gerado no meio ambiente, já que, com a utilização da vinhaça diminuiria a quantidade de matéria orgânica depositada como fertilizantes e contaminando indiretamente os lençóis freáticos da região.

REFERÊNCIAS

ABREU, D., et al. (2011). A produção da cana-de-açúcar no Brasil e a saúde do trabalhador rural. Revista Brasileira de Medicina do Trabalho, Vol.9 nº2, 13 pag. Disponível em: <https://www.rbmt.org.br/details/87/pt-BR/a-producao-da-cana-de-acucar-no-brasil-e-a-saude-do-trabalhador-rural>.

Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. Resolução à ANP nº 8, 8/2015 Disponível em : <https://atosoficiais.com.br/anp/resolucao-n-8-2015?origin=instituicao&q=8/2015>.

ANP, Produção brasileira de etanol. Disponível em: [https://informa.seade.gov.br/sao-paulo-lidera-producao-de-etanol-no-pais/#:~:text=C%20apacidade%20de%20produ%C3%A7%C3%A3o%20de%20etanol&text=Das%20360%20unidades%20autorizadas%20pela,%25%20do%20total%20do%20Brasil\)](https://informa.seade.gov.br/sao-paulo-lidera-producao-de-etanol-no-pais/#:~:text=C%20apacidade%20de%20produ%C3%A7%C3%A3o%20de%20etanol&text=Das%20360%20unidades%20autorizadas%20pela,%25%20do%20total%20do%20Brasil)).

BALDACIN, A. C. S.; PINTO, G. M. F. Biodigestão Anaeróbia da Vinhaça: Aproveitamento Energético do Biogás. Revista Eletrônica FACP, ano III, nº 07, jan. 2015.

COELHO, Suani Teixeira. et al. Geração de energia elétrica a partir do biogás proveniente do tratamento de esgoto.. In: ENCONTRO DE ENERGIA NO MEIO RURAL, 6., 2006, Campinas. Proceedings online... Disponível em: http://www.proceedings.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=MSC0000000022006000100070&lng=en&nrm=abn>.

CONSELHO DOS PRODUTORES DE CANA-DE-AÇÚCAR, AÇÚCAR E ETANOL DO ESTADO DE SÃO PAULO – CONSECANA-SP. Circulares. Disponível em: <https://www.consecana.com.br>.

DIAS, Marina Oliveira de Souza et al. Sugarcane processing for ethanol and sugar in Brazil. 2014. Disponível em:

https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/4096217/mod_resource/content/1/Sugarcane%20processing.pdf.

ELIAS NETO, A. Biodigestão da vinhaça com reator anaeróbio de manta de lodo. São Carlos, EESC/USP, 1988. 30p.

EPE, 2021, Brasília. Anuário Estatístico de Energia Elétrica 2021: Ano base 2020. Brasília: Ministério de Minas e Energia, 2021. 255 p. Disponível em: https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-160/topico-168/Anu%C3%A1rio_2021.

FUESS, L. Designing full-scale biodigestion plants for the treatment of vinasse in sugarcane biorefineries: How phase separation and alkalization impact biogas and electricity productions costs? Elsevier, 18 ago. 2016.

Fuess, L. et. al., (2017) Fertirrigation with sugarcane vinasse: Foreseeing potential impacts on soil and water resources through vinasse characterization, Journal of Environmental Science and Health, Part A, 52:11, 1063-1072, DOI:10.1080/10934529.2017.1338892

Fuess, L. T., & Zaiat, M. (2018). Economics of anaerobic digestion for processing sugarcane vinasse: Applying sensitivity analysis to increase process profitability in diversified biogas applications. Biological Process Laboratory, São Carlos School of Engineering, University of São Paulo (LPB/EESC/USP)

FREIRE, W. j.: CORTEZ, L.A.B Vinhaça de cana-de-açúcar. Guaíba: Agropecuária, 2000.

GOVERNO DO ESTADO DE SÃO PAULO. (2022). Anuário de Energéticos por Município no Estado de São Paulo - 2022, Ano base 2021. Disponível em: https://dadosenergeticos.energia.sp.gov.br/portalcev2/intranet/BiblioVirtual/diversos/anuario_energetico_municipio.pdf

IANNICELLI, A. L. Reaproveitamento energético do biogás de uma indústria cervejeira. 2008. 83 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade de Taubaté, São Paulo, 2008.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Produção Agrícola Municipal 2020. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/estatisticas/economicas/agricultura-e-pecuaria/9221-producao-agricola-municipal.html?=&t=o-que-e>.

KUNZ, Airton et al. Fundamentos da digestão anaeróbio, purificação do biogás, uso e tratamento do digestato. Concórdia, Sbera: Embrapa Suínos e Aves, 2019.

LAMO, P. Sistema Produtor de Gás Metano Através de Tratamento de Efluentes Industriais - METHAX/BIOPAQ - CODISTIL - Piracicaba, 1991.

LORA, Electo Eduardo Silva; VENTURINI, Osvaldo José. Biocombustíveis. Rio de Janeiro: Editora Interciência, 2012.

LUDOVICE, M.T.F. Estudo do efeito poluente da vinhaça infiltrada em canal condutor de terra sobre o lençol freático. 1997. Dissertação- UNICAMP, Campinas. Disponível em: http://bdtd.ibict.br/vufind/Record/UNICAMP-30_3a4cc9d8c20d3e02db2c3ad9722f296b.

MAGALHÃES, Agenor P. T. Biogás: um projeto de saneamento urbano. São Paulo: Nobel, 1986, 120p.

MACHADO, O. J.; FREIRE, F. B. Tratamento de vinhaça em reator anaeróbio de fluxo ascendente e manta de lodo (UASB). Olam - Ciência & Tecnologia, v. 2, n. especial, p. 170, set 2009.

MARQUES, M. O. Aspectos técnicos e legais da produção, transporte e aplicação de vinhaça. In: SEGATO, S. V. et al. (Org.). Atualização em produção de cana-de-açúcar. Piracicaba: CP 2, 2006. p. 369-375.

MORAES, Bruna S et al. Anaerobic digestion of vinasse from sugarcane biorefineries in Brazil from energy, environmental, and economic perspectives: profit or expense?. Applied Energy, v. 113, n. Jan 2014, p. 825-835, 2014 Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.07.018>.

NOGUEIRA, L. A. H. Biodigestão a Alternativa Energética. Editora Nobel, São Paulo. 93p, 1986.

NOVA CANA. Processos da fabricação do etanol. Disponível em: <https://www.novacana.com/etanol/fabricacao>

OLIVEIRA, R. D. (2009). Geração de energia elétrica a partir do biogás produzido pela fermentação anaeróbia de dejetos em abatedouro e as possibilidades no mercado de carbono. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Elétrica com ênfase em Sistemas de Energia e Automação) – Universidade de São Paulo, Brasil.

PINTO, C. P. Tecnologia da Digestão Anaeróbica da Vinhaça e Desenvolvimento Sustentável, Tese de Mestrado, Faculdade de Engenharia Mecânica, Unicamp, 1999.

PINTO, G. M. F. Biodigestão Anaeróbica da Vinhaça: Aproveitamento Energético do Biogás. Revista Eletrônica FACP, ano III, nº 07, jan. 2015.

ROCHA, Vinícius Carvalho. Processamento Anaeróbio de Vinhaça Pré-tratada com Biopolímero à Base de Cálcio. 2012. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos - Departamento de Hidráulica e Saneamento – Universidade de São Carlos, São Carlos, 2012.

SANTOS, P. S. Biodigestão anaeróbia de vinhaças de cana-de-açúcar: influência da variação composicional sobre o rendimento energético. 2018. 101 f. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso). – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2018.

SOUZA M. E. G. FUZARO; A. R. POLEGATO. Thermophilic Anaerobic Digestion of Vinasse in Pilot Plant UASB Reactor. Water Sci Technol (1992) 25 (7): 213–222. Acesso em: 23 maio 2023.

UNICA – Cresce Utilização de Vinhaça de Cana Para Gerar Energia e Como Fertilizante, 2012. Disponível em: <
[<http://www.unica.com.br/noticia/39870311920324775593/cresce-utilizacao-de-vinhacade-cana-para-gerar-energia-e-como-fertilizante-/](http://www.unica.com.br/noticia/39870311920324775593/cresce-utilizacao-de-vinhacade-cana-para-gerar-energia-e-como-fertilizante-/)>

UNICA. Dados e fatos: Safra 2020/2021. Disponível em:
<https://www.unica.com.br/dados-e-fatos/>.

VIEIRA, Henrique Gois; POLLI, Henrique Quero. O biogás como fonte alternativa de energia. Taquaritinga: Fatec, SP, Interface Tecnológica - v. 17 n. 1, p. 388-400, 2020.

VON SPERLING, M.; GONÇALVES, R. F. Lodo de esgotos: características e produção. In: ANDREOLI, C. V.; VON SPERLING, M.; FERNANDES, F. (Org.) Lodo de esgotos: tratamento e disposição final. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, UFMG; Curitiba: SANEPAR,