

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS  
CENTRO DE TECNOLOGIA  
ENGENHARIA AMBIENTAL E SANITÁRIA

André Morais Ferreira Costa Filho

**Potencial de Produção de Biometano a partir da vinhaça no Estado de Alagoas**

Maceió/AL

2024

André Morais Ferreira Costa Filho

## **Potencial de Produção de Biometano a partir da vinhaça no Estado de Alagoas**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Engenharia Ambiental e Sanitária, do Centro de Tecnologia da Universidade Federal de Alagoas, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Ambiental e Sanitária.

Orientadora: Professora Dra. Karina Ribeiro Salomon.

Maceió/AL

2024

**Catálogo na Fonte**  
**Universidade Federal de Alagoas**  
**Biblioteca Central**  
**Divisão de Tratamento Técnico**

Bibliotecário: Marcelino de Carvalho Freitas Neto – CRB-4 – 1767

C837p Costa Filho, André Morais Ferreira.  
Potencial de produção de biometano a partir da vinhaça no estado de Alagoas  
/ André Morais Ferreira Costa Filho. – Maceió, 2024.  
44 f. : il., grafs. e tabs. color.

Orientadora: Karina Ribeiro Salomon.  
Monografia (Trabalho de conclusão de curso em Engenharia Ambiental e  
Sanitária) – Universidade Federal de Alagoas. Centro de Tecnologia. Maceió,  
2024.

Bibliografia: f. 38-43.  
Apêndices: f. 44.

1. Biocombustíveis - Alagoas. 2. Créditos de carbono. 3. Economia verde. 4.  
Energia renovável. 4. Resíduos agroindustriais. I. Título.

CDU: 662.767.1(813.5)

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço, primeiramente, a Deus por sua presença constante em minha vida, por sua orientação, proteção e as bênçãos concedidas ao longo de minha jornada.

Agradeço aos meus avós e à minha mãe, que foram minha base em toda a minha vida e não diferente na minha graduação, sem eles nada seria possível.

Agradeço também à minha companheira de vida, Layne Leite, que esteve ao meu lado nas madrugadas de estudo e me proporcionou todo apoio nas horas de desespero.

Agradeço à professora Dra. Karina Ribeiro Salomon pelo apoio incansável, encorajamento constante e valiosos conselhos que foram fundamentais não apenas neste trabalho, mas também ao longo da minha jornada acadêmica. Sua profunda compreensão do tema e dedicação exemplar ao ensino contribuíram significativamente para o desenvolvimento desse trabalho e meu desenvolvimento acadêmico e profissional.

Agradeço à professora Dra. Nélia Henriques Callado, na qual sou extremamente grato por desempenhar um papel materno ao longo da minha jornada acadêmica, por me acolher em suas pesquisas e por fornecer diversos conselhos e oportunidades durante essa jornada.

Agradeço imensamente aos meus amigos engenheiros, agora também colegas de profissão e trabalho: Alexandre Barbosa, Eduardo Duarte, Jarbas Amoedo, Nichollas Gomes, Rodrigo Medeiros e Rodrigo Paiva por terem contribuído significativamente para minha formação pessoal e profissional. Além disso expresso minha profunda gratidão aos meus amigos Elder Santana, Verena Meirelles e a todos os demais pelo apoio constante ao longo da jornada acadêmica.

## RESUMO

O estado de Alagoas tem uma rica tradição na cultura da cana-de-açúcar, resultando em uma significativa produção de etanol e açúcar. No entanto, o processo de produção de etanol gera um subproduto conhecido como vinhaça, o qual se destaca como um resíduo altamente poluente, especialmente quando comparado a outras substâncias, devido às suas características de alta carga orgânica. Entretanto essa característica faz com que esse subproduto tenha um grande potencial para a geração de biometano. Nesse contexto, este trabalho avaliou o potencial de produção de Biometano a partir da vinhaça no estado. Através dos dados coletados foi estimado o potencial de produção de Biometano e posteriormente elaborado um mapa temático que permitiu analisar as regiões com maior potencial de alocação de recursos para geração de biometano, de modo a orientar investimentos em energia renovável na região. Adicionalmente, realizou-se a quantificação do retorno financeiro com base na estimativa de produção de biometano, por meio de ativos ambientais, tais como Cbios e créditos de carbono. Observou-se que o estado apresenta grande potencial nos municípios da região leste, gerando um volume de biometano estimado em 40.119.699 Nm<sup>3</sup>, que se empregado no lugar do diesel reduziria as emissões de carbono em 89%, além de proporcionar um retorno financeiro de R\$ 30.977.011 (trinta milhões, novecentos e setenta e sete mil e onze reais) em créditos de carbono. Portanto, fica demonstrado que a utilização da vinhaça apresenta um grande potencial.

**Palavras-chave:** Biocombustíveis; Créditos de carbono; Economia verde; Energia renovável; Resíduos agroindustriais.

## ABSTRACT

The state of Alagoas has a rich tradition in sugarcane cultivation, resulting in a significant production of ethanol and sugar. However, the ethanol production process generates a byproduct known as vinasse, which stands out as a highly polluting residue, especially when compared to other substances, due to its high organic load characteristics. Nevertheless, this characteristic endows this byproduct with great potential for biogas generation. In this context, this work assessed the potential for biomethane production from vinasse in the state. Based on the collected data, the potential for biomethane production was estimated, and subsequently, a thematic map was developed to analyze the regions with the greatest potential for resource allocation for biomethane generation, in order to guide investments in renewable energy in the region. Additionally, the quantification of financial return was carried out based on the estimated biomethane production, through environmental assets such as Cbios and carbon credits. It was observed that the state presents significant potential in the municipalities of the eastern region, generating an estimated volume of biomethane of 40,119,699 Nm<sup>3</sup>, which if employed instead of diesel would reduce carbon emissions by 89%, in addition to providing a financial return of R\$ 30.977.011 (Thirty million, nine hundred and seventy-seven thousand and eleven reais.) in carbon credits. Therefore, it is demonstrated that the use of vinasse presents great potential.

**Keywords:** Biofuels; Carbon credits; Green economy; Renewable energy; Agroindustrial waste.

## LISTA DE EQUAÇÕES

Eq. (1) .....	24
Eq. (2) .....	24
Eq. (3) .....	24
Eq. (4) .....	24
Eq. (5) .....	25
Eq. (6) .....	25
Eq. (7) .....	27
Eq. (8) .....	28
Eq. (9) .....	28
Eq. (10) .....	29

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Fluxograma do Processo de Geração de Biometano.....	13
Figura 2. Planta de biogás da Raízen localizada em Guariba.....	20
Figura 3. Ônibus movido 100% a biometano fruto da parceria entre a Prefeitura de Londrina, COMPAGAS e a Scania.....	20
Figura 4. Fluxograma do desenvolvimento dos métodos do trabalho. ....	23
Figura 5. Mapa do potencial de produção de biometano a partir da vinhaça dos municípios de Alagoas. ....	34



## LISTA DE QUADROS

Quadro 1. Legislação e regulação.....	15
Quadro 2. Trabalhos correlatos na pesquisa sobre Biometano.....	21

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Parâmetros utilizados para estimativa da geração de biometano. ....	25
Tabela 2. Parâmetros utilizados para estimativa do retorno financeiro. ....	30
Tabela 3. Estimativa de geração de biometano a partir da vinhaça na safra de 2023. .....	32

## SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	8
2	OBJETIVOS.....	10
2.1	Objetivo Geral .....	10
2.2	Objetivos Específicos .....	10
3	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA .....	11
3.1	Biometano .....	11
3.2	Cenário Mundial e Brasileiro .....	13
3.3	Legislação e regulação .....	15
3.4	Ativos ambientais referenciais ao Biometano.....	17
3.5	Casos de sucesso na produção e uso de Biometano .....	19
3.6	Perspectivas Correlatas na Pesquisa sobre Biometano.....	21
4	MÉTODOS.....	23
4.1	Coleta e tratamento de dados .....	23
4.2	Estimativa do potencial de biometano.....	24
4.3	Agrupamento dos municípios.....	26
4.4	Elaboração do mapa temático referente ao potencial de biometano dos municípios de Alagoas .....	26
4.5	Estimativa e Avaliação dos Benefícios Ambientais do Biometano .....	27
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	31
5.1	Estimativa da geração de biometano dos municípios de Alagoas .....	31
5.1	Mapeamento das variações regionais do potencial de produção de biometano no território de Alagoas .....	33
5.2	Análise Quantitativa do Potencial de Ganhos por Intermédio de Ativos Ambientais .....	35
6	CONCLUSÕES.....	36
	REFERÊNCIAS.....	38
	APÊNDICE .....	44

## 1 INTRODUÇÃO

A evolução da sociedade traz consigo a demanda crescente por energia, sendo uma realidade incontestável motivada principalmente pelo consumo de combustíveis fósseis (OLIVEIRA, 2022). A matriz energética mundial é dependente majoritariamente de recursos não renováveis. Nesse contexto 31,1% dessa matriz é composta por petróleo e seus derivados, enquanto o carvão mineral corresponde a 27% e o gás natural a 23%, além disso, outras fontes de energia, como a nuclear, hidrelétrica, biomassa, e outras, totalizam 18,9% das fontes energéticas utilizadas no mundo (EPE, 2022).

Essa dependência por recursos não renováveis cria uma suscetibilidade a conflitos geopolíticos e variações de preços, de modo que o aumento nas crises ambientais devido às emissões de fontes de poluentes aceleram a procura por uma matriz energética mais rentável e sustentável (OLIVEIRA, 2022).

O Brasil, segue essa tendência de modo a ampliar sua matriz energética em fontes renováveis, como a solar, eólica e biomassa, contudo a geração de energia através dessas fontes ainda não supre a necessidade do país, tendo em vista que a sua maior fonte de energia é o petróleo e seus derivados que corresponde a 33,1%.

Contudo, outras fontes de energia ocupam as posições posteriores na matriz energética brasileira. Dentre elas, ressalta-se os derivados da cana-de-açúcar, que constitui 19,1% da matriz, e a energia hidrelétrica, com uma participação de 12,6% (EPE, 2022). Ressalta-se que apesar do consumo de petróleo ter reduzido nas últimas décadas, o consumo de gás natural aumentou. Além disso, em termos de eletricidade, o Brasil é dependente da energia hidrelétrica e precisa de maior diversificação (OLIVEIRA, 2022).

No contexto estadual, a cana-de-açúcar é a cultura predominante em Alagoas, liderando em termos de produção, conforme dados obtidos através do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2023), por meio do Levantamento Sistemático da Produção Agrícola (LSPA) das safras dos anos de 2022 e 2023. Diante desse cenário, surge a necessidade de gerir os subprodutos gerados no processamento dessa cultura, como a vinhaça, resíduo de destilarias, sendo esta cem vezes mais poluente que o esgoto doméstico, devido ao seu alto teor de matéria orgânica, baixo pH e alta demanda de oxigênio (FREIRE; CORTEZ, 2000).

A vinhaça pode ser utilizada para gerar biogás, através da sua biodigestão, mediante a utilização de microrganismos anaeróbios, que metabolizam a matéria orgânica presente na vinhaça como substrato para conduzir um processo de digestão que resulta na produção de biogás. O biogás apresenta em sua composição majoritariamente metano ( $\text{CH}_4$ ), que pode variar entre 50 a 80 % de sua composição; o hidrogênio ( $\text{H}_2$ ); e o dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) (LOBATO, 2011).

Visto isso, por meio do processo de filtração do biogás, é possível obter o biometano, que pode ser equiparado em termos de conteúdo energético ao gás natural. O biometano é caracterizado pelo seu elevado teor de metano e possui qualidade para aplicação em veículos automotores ou nas redes de distribuição de gás natural (ÅHMAN, 2010; KOORNNEEF et al., 2013).

Dessa forma, o presente trabalho se concentrou em estimar a produção de biometano a partir da vinhaça dos 102 municípios do estado de Alagoas com o propósito de fornecer subsídios a gestão eficiente desse subproduto. Os benefícios adjuntos a essa abordagem incluem o reaproveitamento dos resíduos, aumento da fonte de energia renovável, redução da emissão de gases do efeito estufa, diversificação da matriz energética e desenvolvimento local.

## **2 OBJETIVOS**

### **2.1 Objetivo Geral**

O objetivo geral do presente trabalho foi avaliar o potencial de produção de biometano a partir da vinhaça no estado de Alagoas.

### **2.2 Objetivos Específicos**

1. Realizar a estimativa do potencial de produção de biometano dos municípios do Estado de Alagoas, através do levantamento do volume de vinhaça gerada nas usinas de etanol do Estado;
2. Mapear as variações regionais do potencial de produção de biometano no território de Alagoas, através do agrupamento dos municípios de acordo com o potencial de geração de biometano, de modo a identificar as regiões prioritárias para investimentos de captação e utilização de biometano no estado de Alagoas;
3. Quantificar os benefícios ambientais gerados pela adoção desse biocombustível, identificando o potencial ganho através de ativos ambientais.

### 3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste tópico, foi desempenhado o papel fundamental de fornecer base conceitual e contextual necessária para compreender o tema em questão. No contexto deste estudo sobre o potencial de produção de biometano em Alagoas, a fundamentação teórica aborda conceitos relacionados ao biometano, sua produção, especificações de qualidades e aplicações. Ademais, a fundamentação teórica discute sobre o contexto energético global e brasileiro, destacando a crescente importância das fontes de energia renovável, como o biometano. Ao explorar esses elementos, a fundamentação teórica traz uma base robusta para a análise e discussão dos resultados deste estudo.

#### 3.1 Biometano

O biometano é o produto refinado e aprimorado do biogás, que é obtido através da filtragem e tratamento desse recurso energético. O biogás, por sua vez, é definido como uma mistura de gases que podem ser formados pela decomposição anaeróbica de materiais orgânicos por bactérias metanogênicas em biodigestores (HANDBOOK ON BIOGAS UTILIZATION, 1990), sendo amplamente empregados na produção de energia por meio da combustão.

A decomposição anaeróbica é o processo bioquímico que se estende em diversas etapas essenciais, como hidrólise, acidogênese, acetogênese e metanogênese (RAMOS et al., 2022). A hidrólise abrange a quebra de matéria orgânica complexa, como proteínas, lipídios e carboidratos, em micromoléculas, obtendo como produto ácidos orgânicos, monossacarídeos e aminoácidos. Durante a acidogênese, os produtos formados na hidrólise são convertidos em intermediários por microrganismos anaeróbios, por meio de processos de fermentação e oxidação anaeróbia. Na etapa posterior, a acetogênese, as bactérias acetogênicas convertem esses compostos, juntamente com a produção de acetato,  $H_2$  e  $CO_2$ . Por fim, as *archaeas* metanogênicas utilizam os produtos da etapa anterior como substrato, dividindo-se em duas classes: acetoclásticas, que geram  $CH_4$  a partir de acetato, e hidrogênotróficas, que produzem  $CH_4$  a partir de  $CO_2$  e  $H_2$  (KUNZ et al., 2019).

Para que a digestão anaeróbica ocorra é necessário o uso de um biodigestor, entre os mais utilizados estão o Biodigestor Lagoa Coberta (BLC), o Reator Anaeróbio de Fluxo Ascendente e Manta de Lodo (UASB - Upflow Anaerobic Sludge Blanket

reactor), o Reator Contínuo de Tanque Agitado (CSTR - Continuous Stirred Tank Reactor) e o Reator de Leito Fluidizado (KUNZ et al., 2019).

Além disso, é crucial compreender as perdas de metano na geração de biogás por meio de reatores anaeróbios, a fim de realizar estimativas realistas da produção de biometano. Estudos anteriores, como os conduzidos por Agrawal et al. (1997) e Singh e Viraraghavan (1998), ao calcular as perdas de metano no efluente de reatores UASB, identificaram valores entre 50% e 60% da produção teórica de metano, respectivamente. Em uma abordagem diferente, Keller e Hartley (2003) quantificaram perdas menores, aproximadamente 14% da produção total de metano.

O biogás não apresenta composição fixa, visto que a composição varia conforme o seu substrato, contudo em maior parte é composto por metano ( $\text{CH}_4$ ), com um teor entre 50 a 80 % de sua composição; o hidrogênio ( $\text{H}_2$ ); e o dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) (LOBATO, 2011).

O potencial calorífico do biogás pode oscilar entre 15 e 30  $\text{MJ}/\text{Nm}^3$ , dependendo de sua composição (ABATZOGLOU; BOIVIN, 2009). Fato de relevância é que quanto maior o teor de metano, maior será o potencial calorífico do biogás. Ademais, a presença de outros componentes, como o dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) que pode compreender entre 20% a 30% do biogás, pode afetar esse potencial, isso ocorre devido à natureza inerte do  $\text{CO}_2$  durante uma reação de combustão (KUNZ et al., 2019).

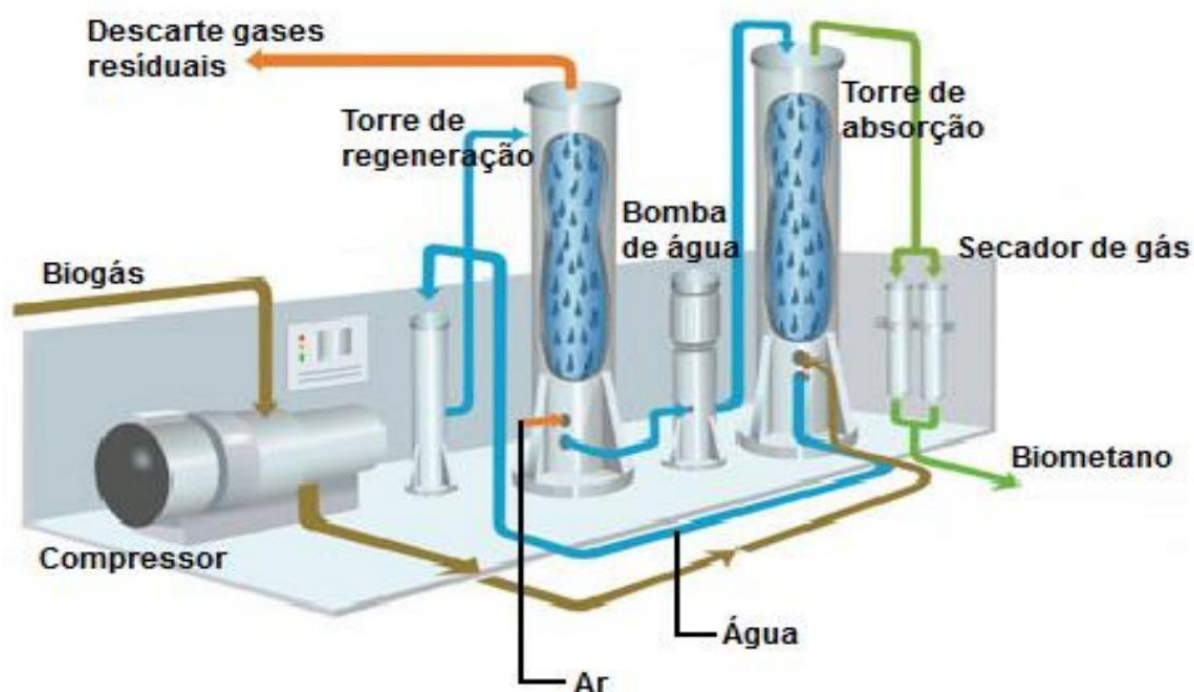
Na composição do biogás, também é possível identificar outros contaminantes, em especial o sulfeto de hidrogênio ( $\text{H}_2\text{S}$ ), cuja presença não apenas representa um risco potencial para a saúde humana, mas também pode levar à corrosão de equipamentos e à emissão de um odor desagradável em caso de vazamento. Adicionalmente, é importante destacar que o produto resultante da queima desse gás, composto por dióxido de enxofre ( $\text{SO}_2$ ) e monóxido de enxofre ( $\text{SO}$ ), contribui para a poluição atmosférica. Além disso, a amônia ( $\text{NH}_3$ ) também é outro contaminante presente no biogás (KUNZ et al., 2019).

A finalidade do processo de refino e aprimoramento do biogás é aumentar a concentração de metano através da remoção de  $\text{CO}_2$  e outros componentes (VEIGA; MERCEDES, 2015). Através desse processo de filtragem e tratamento, é possível elevar o teor de metano do biogás para próximo de 90%, resultando no biometano, conforme destacado por (BIRATH, 2008) e observado na Figura 1, possibilitando assim, o uso desse recurso energético como biocombustível em veículos automotores



ou a sua aplicação nas redes de distribuição de gás natural (ÅHMAN, 2010; KOORNNEEF et al., 2013).

Figura 1. Fluxograma do Processo de Geração de Biometano



Fonte: GONZÁLEZ (2015).

As principais fontes de biomassa exploradas para a produção de biometano incluem biomassa orgânica agrícola, biomassa vegetal urbana, efluentes agrícolas de animais, esgoto doméstico urbano e rural, resíduos sólidos urbanos (RSU) e outras fontes (SOUZA; SCHAEFFER, 2010).

### 3.2 Cenário Mundial e Brasileiro

A matriz energética mundial é sustentada pela utilização de combustíveis fósseis, reconhecidos por suas características não renováveis e limitada. O petróleo e seus subprodutos compreendem cerca de 31,1% da contribuição total da matriz mundial, acompanhado pelo carvão mineral com 27% e o gás natural com 23%. Outras fontes de energia, tais como biomassa, hidrelétrica, nuclear, entre outras, totalizam 18,9% das fontes energéticas empregadas internacionalmente (EPE, 2022).

O cenário mundial demonstra a necessidade de investir no desenvolvimento de novas alternativas de fonte de energia, sendo o biometano uma alternativa viável e sustentável de fonte de energia renovável. Segundo o *European Biogas Association*

(2023), atualmente a União Europeia produz apenas 15% do gás que consome, demonstrando ser excessivamente dependente de fornecedores estrangeiros, como a Rússia que fornece 40% do gás importado para UE, problema na qual ocasionou em problemas no fornecimento de gás à região, devido ao contexto dos conflitos geopolíticos, como a guerra na Rússia e na Ucrânia.

Conforme relatado *no European Biogas Association*, a Europa já produz cerca de 18,4 mil milhões de metros cúbicos de biogás e biometano combinados. As projeções indicam até 2050, essa produção pode aumentar pelo menos cinco vezes em relação aos níveis atuais, o que irá representar em até 40% do consumo de gás na UE em 2021. Supondo uma menor demanda por gás, o biometano poderá cobrir até 61% da demanda de gás até 2050.

O Brasil, por sua vez, se distingue da composição energética mundial em virtude de sua ampla extensão geográfica e da diversificação de climas e topografias que abrange em seu território. Contudo, a sua maior fonte de energia continua a ser o petróleo e seus derivados que corresponde a 33,1 %. Entretanto, as fontes de energia que ocupam as posições posteriores na matriz energética brasileira, são os derivados da cana-de-açúcar, que constitui 19,1% da matriz, e a energia hidrelétrica, com uma participação de 12,6% (EPE, 2022).

Além disso, de acordo com o CIBiogás (2021), o Brasil conta com 755 plantas de biogás em operação, as quais geram 2,3 bilhões Nm<sup>3</sup>/ano; segundo informações obtidas através da ABiogás, o Brasil possui um potencial de produção de biogás estimado em 84,6 bilhões de metros cúbicos por ano. Sendo esse volume capaz de atender cerca de 40% da demanda interna de energia elétrica e suprir cerca de 70% do consumo de diesel no país (ABIogÁS, 2021). Contudo, observa-se que no cenário atual, foram gerados apenas 2,3 bilhões de metros cúbicos de biogás em 2021, sendo representado pelo setor sucroenergético que detém 49% do total, seguido pelo setor agropecuário, com 44%, enquanto o saneamento detém uma parcela de 7%, fica evidente que o Brasil está explorando apenas uma parcela reduzida desse potencial, sendo representado por 3% desse total.

### 3.3 Legislação e regulação

A base legal e regulatória desenvolve um caráter decisivo no desenvolvimento dos setores estratégicos, para a produção e utilização de biometano, que se apresenta como uma fonte de energia limpa e renovável. Em busca de estruturar políticas, diretrizes e direcionamentos que promovam a sustentabilidade e a eficiência nesse campo, é essencial compreender as legislações e regulações que norteiam a produção, distribuição e utilização do biometano em âmbito nacional e estadual, como mostra o quadro 1.

**Quadro 1. Legislação e regulação.**

Legislação	Descrição
Lei nº 13.576/2017 (RenovaBio)	Institui a Política Nacional de Biocombustíveis (RenovaBio) com o propósito de cumprir os compromissos do Acordo de Paris, melhorar a eficiência energética, reduzir emissões de gases de efeito estufa, expandir a produção de biocombustíveis, garantir o abastecimento e promover a competição no mercado (Cardoso; Costa, 2020). Estruturada em metas de redução de emissões, certificação de biocombustíveis e emissão de Créditos de Descarbonização (CBios) (MME, 2023).
Decreto nº 11.003/2022 (Estratégia Federal de Incentivo ao Uso Sustentável de Biogás e Biometano)	Estabelece diretrizes para promover o uso sustentável de biogás e biometano, estimular o mercado de carbono, amparar a criação de planos setoriais, impulsionar a adoção de tecnologias como biodigestores e sistemas de purificação, facilitar o abastecimento de veículos e embarcações com biometano, promover pesquisa e inovação para reduzir emissões de metano, estabelecer medidas de incentivo à redução dessas emissões e facilitar a cooperação nacional e internacional em tecnologias de metano. As principais fontes de biogás e biometano que são abordadas nesse decreto são as atividades agropecuárias, cadeia sucroenergética, estações de tratamento de

Legislação	Descrição
	esgoto e resíduos de aterros sanitários (BRASIL, 2022).
Resolução ANP nº 906/2022	Define especificações para biometano produzido a partir de produtos e resíduos orgânicos agrossilvopastoris e comerciais, destinado a veículos e instalações residenciais e comerciais em todo o Brasil. Inclui características como poder calorífico superior, concentração mínima de metano e outras especificações (ANP, 2022).
Lei nº 11.768/2022 (Mato Grosso)	Estabelece políticas estaduais referentes ao biometano em Mato Grosso, visando ampliar sua composição na matriz energética, promover a gestão eficiente de resíduos sólidos, enfrentar as mudanças climáticas, desenvolver tecnologias sustentáveis e estabelecer regras para a cadeia produtiva. Oferece incentivos, apoio e busca atrair investimentos em infraestrutura para fontes de energia renovável (MATO GROSSO, 2022).
Lei nº 24396/2023 (Minas Gerais)	Define objetivos para ampliar a presença do biogás e biometano na matriz energética de Minas Gerais, promover a gestão eficiente de resíduos sólidos em conjunto com energias renováveis, enfrentar as mudanças climáticas, desenvolver tecnologias sustentáveis, estabelecer regras para a cadeia produtiva, oferecer incentivos e apoio, além de atrair investimentos em infraestrutura para essas fontes de energia (MINAS GERAIS, 2023).

Fontes: Adaptado de CARDOSO; COSTA (2020). BRASIL (2022). ANP (2022). MATO GROSSO (2022). MINAS GERAIS (2023).

Para cumprir com o Acordo de Paris sobre Mudança do Clima, o Brasil assumiu o compromisso de ampliar a composição dos biocombustíveis em sua matriz energética, bem como reduzir as emissões de carbono em 37% até 2025, em comparação com os níveis de 2005. Esse comprometimento tem como objetivo incentivar a descarbonização do setor de transporte no país (Cardoso; Costa, 2020).

Dessa maneira surgiu a Lei nº 13.576/2017, que institui a Política Nacional de Biocombustíveis (RenovaBio). Outrossim, é válido destacar a Estratégia Federal de

Incentivo ao Uso Sustentável de Biogás e Biometano, através do Decreto nº 11.003/2022. Essa estratégia, portanto, estabelece diretrizes para promover o uso sustentável desses recursos.

O estado de Alagoas atualmente não possui legislação específica sobre o biometano, contudo outros estados, como Mato Grosso através da Lei nº 11.768/2022 e Minas Gerais por meio da Lei nº 24396/2023, estabeleceram suas políticas estaduais referentes ao biometano.

### **3.4 Ativos ambientais referenciais ao Biometano**

Compreender os ativos ambientais é fundamental para entender a relevância desse recurso nos tempos contemporâneos. Esses ativos apresenta uma função crucial na mitigação das emissões de gases de efeito estufa (GEE), na ampliação da sustentabilidade ambiental e no desenvolvimento de um mercado mais verde e eficiente. Desse modo, será analisado os principais ativos ambientais associados ao biometano, como os Créditos de Descarbonização (CBios), o IREC (*International Renewable Energy Certificate*), o Gasrec (Registro de Biometano) e os créditos de carbono, possibilitando assim, entender a contribuição dos mesmos para transição para uma matriz energética mais limpa e sustentável, bem como suas implicações no contexto do biometano como fonte de energia renovável.

Um dos pilares que sustentam o RenovaBio são os Créditos de Descarbonização (CBios), que são emitidos por empresas que obtêm certificação junto à ANP (Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis) e representam uma tonelada de carbono que deixou de ser liberada na atmosfera devido à produção e uso de biocombustíveis (BIASUZ, 2022).

O RenovaBio, por sua vez, estabelece metas de redução de emissões que determinam a quantidade de CBios que as distribuidoras de combustíveis fósseis devem adquirir e retirar de circulação para atingir seus objetivos. Dessa maneira, devido a oferta e a demanda é gerado uma valoração das emissões de carbono, incentivando as partes obrigadas a adquirir CBios a adotar medidas para reduzir suas próprias emissões, a fim de evitar os custos associados à compra desses créditos, de modo análogo, as partes que geram CBios obtêm lucros provenientes da venda desses créditos, o que age como um estímulo para promover um setor alinhado às

estratégias climáticas do país (BIASUZ, 2022). Importante destacar que esses créditos são transacionados no mercado financeiro brasileiro.

Diferentemente do CBios que são aplicados no contexto brasileiro e estão relacionados à produção e uso de biocombustíveis no país, o crédito de carbono, criado como parte do Protocolo de Kyoto em 1997, abrange diferentes países e setores, e está relacionado a uma variedade de atividades que visam reduzir as emissões de GEE, o crédito de carbono também é medido por uma unidade na qual cada tonelada de CO<sub>2</sub> que deixa de ser emitida na atmosfera resulta na geração de um crédito de carbono (POYER, 2020).

Destaca-se que existem dois tipos diferentes de mercados de carbono aos quais as empresas podem operar: os mercados voluntários e os mercados regulados. Nos mercados voluntários, as empresas adquirem créditos de carbono de forma voluntária para cumprir compromissos de mitigação, e esses mercados são geralmente caracterizados por regulamentações menos rigorosas em relação às transações. De modo que, nos mercados regulados, as empresas adquirem créditos de carbono com o propósito de atender a obrigações estabelecidas por legislações nacionais ou acordos internacionais, sendo mais rigoroso em relação a sua transação (LANGER; SEYMOUR, 2023).

No contexto global de mitigação das mudanças climáticas, os *International Renewable Energy Certificates* (IRECs), em português "*Certificados Internacionais de Energias Renováveis*", de acordo com a simpleenergy (2023), são certificados emitidos para rastrear e documentar a geração de eletricidade a partir de fontes de energia renovável em nível internacional, cada certificado I-REC corresponde a um megawatt-hora (MWh) de eletricidade produzida de forma sustentável. Os IRECs são utilizados para comprovar que uma determinada quantidade de eletricidade foi gerada a partir de fontes limpas e renováveis, como solar, eólica, hidrelétrica, biomassa, entre outras, de modo que reduza assim as emissões de GEE de escopo 2 — emissões indiretas resultantes do uso da rede elétrica.

Seguindo a mesma premissa que os IRECs, a certificação GAS-REC desenvolvida pelo Instituto Totum com o propósito de reconhecer e agregar valor às usinas produtoras de biogás e biometano, busca dar valor comercial a geração de gás dessas usinas. De acordo com o instituto Totum, a certificação GAS-REC permite rastrear o biogás ou o biometano ao longo da cadeia de fornecimento, comprovando que o consumidor de gás está incorporando a parcela renovável do gás que consome.

Ademais, a certificação oferece aos consumidores finais de gás, sejam eles de biogás ou biometano, a oportunidade de adquirir esse certificado. Permitindo assim, a rastreabilidade do gás e a substituição do fator de emissão por um fator de fontes renováveis.

### **3.5 Casos de sucesso na produção e uso de Biometano**

Demonstrar os casos de sucesso na produção e uso do biometano desempenha uma função fundamental para demonstrar de maneira prática e tangível a importância e os benefícios da produção e uso de utilizar o biometano como fonte de energia renovável. Além disso, apresentar esses casos ilustra como o biometano pode contribuir para metas de sustentabilidade, redução de emissões de gases de efeito estufa e desenvolvimento econômico em diversas regiões, inspirando assim a replicação dessas práticas, de modo a ser uma solução energética eficiente e sustentavelmente responsável

Conforme informações disponíveis no site da Adecoagro (2023), é possível observar um exemplo notável de sucesso na implementação de biogás e biometano. A Usina Ivinhema no Mato Grosso do Sul produz biogás a partir da vinhaça e utiliza para aquecer a água da caldeira seu processo de cogeração de energia. Além disso, pretende-se que parte desse biogás seja purificado e transformado em biometano que posteriormente será utilizado como combustível nos veículos e caminhões de sua frota, que serão adaptados como veículos a gás natural (GNV).

De acordo com o site da Raízen (2023), a Raízen Geo Biogás S.A., uma parceria entre a Raízen e a Geo Energética, outro caso de sucesso foi inaugurado em 2020 uma das maiores plantas de biogás do mundo, localizada em Guariba, São Paulo, com uma capacidade instalada de 21 MW. A planta, construída adjacente à usina Bonfim da Raízen, espera produzir cerca de 138 mil MWh, utilizando a vinhaça na safra e a torta de filtro no decorrer do ano. Este empreendimento possui uma área total de 363.000 m<sup>2</sup>, onde teve um investimento total de R\$ 153 milhões, esse projeto demonstra que o país vem cumprindo com o estabelecido através do RenovaBio, diversificando sua matriz energética e reduzindo as emissões de GEE.

**Figura 2. Planta de biogás da Raízen localizada em Guariba.**



Fonte: Raízen (2023)

Além disso, destaca-se o notável caso de utilização do biometano na cidade de Londrina/PR. Segundo a agência estadual de notícias do Paraná, essa iniciativa pode marcar o início de uma nova era na mobilidade sustentável do Brasil. A cidade realizou com êxito o primeiro teste no país com um ônibus movido 100% a biometano no transporte urbano de passageiros, conforme ilustrado na figura 3. Essa conquista resultou da parceria entre a Prefeitura de Londrina, a Companhia Paranaense de Gás (COMPAGAS) e a Scania.

**Figura 3. Ônibus movido 100% a biometano fruto da parceria entre a Prefeitura de Londrina, COMPAGAS e a Scania**



Fonte: Agência Estadual de notícias do Paraná (2023).



O objetivo principal dessa colaboração é comprovar a redução de poluentes e avaliar a eficiência do uso do biometano como uma alternativa sustentável no setor de transporte. Essa ação inovadora, na qual o biometano é utilizado como fonte de energia em operações regulares de transporte urbano, representa um marco que poderá inspirar outras cidades comprometidas com a redução das emissões de poluentes a adotar frotas de veículos mais eficientes e sustentáveis.

### 3.6 Perspectivas Correlatas na Pesquisa sobre Biometano

A pesquisa na área da produção de biometano é caracterizada por uma variedade de abordagens e descobertas que ampliam o entendimento dessa fonte de energia renovável. Neste contexto, a revisão da literatura desempenha um papel crucial para contextualizar e sintetizar as contribuições dos estudos existentes.

Dessa maneira, se propõe uma análise dos trabalhos correlatos, apresentados no Quadro 2, os quais foram divididos em categorias distintas para facilitar a compreensão e a organização das informações.

**Quadro 2. Trabalhos correlatos na pesquisa sobre Biometano.**

Referências	Território de Pesquisa	Principais achados
Atlas de Energia de Alagoas, 2015	Potencialidade energética através de biomassa em Alagoas	Este trabalho aborda a potencialidade energética de diversas biomassas, inclusive a vinhaça. No decorrer da pesquisa, são delineadas as definições da vinhaça, assim como dados relevantes associados a ela durante o período de elaboração do trabalho, como a produção de etano no estado de Alagoas. Adicionalmente, são apresentados equacionamentos para a conversão da geração de metano a partir da vinhaça e o respectivo potencial energético. Além disso, o trabalho inclui mapas de alagoas que ilustram o potencial energético de diferentes biomassas nos municípios do estado.
Souza et al., 2020	Estimativa do potencial de produção de biogás a partir da digestão anaeróbia da vinhaça na safra 2018/2019 em São Paulo	O estudo proporciona uma análise detalhada e específica do potencial de aproveitamento energético da vinhaça no contexto do estado de São Paulo. Adicionalmente, o trabalho apresenta formulações para a conversão da geração de biogás a partir da vinhaça, destacando assim o potencial energético inerente a esse processo.
Piroutek, 2022	Estimativa de Potencial de Produção de Biogás a partir da Vinhaça no Estado de São Paulo	Este trabalho oferece uma abordagem abrangente sobre a cana-de-açúcar, começando pela sua definição e explorando os subprodutos gerados durante seu processo

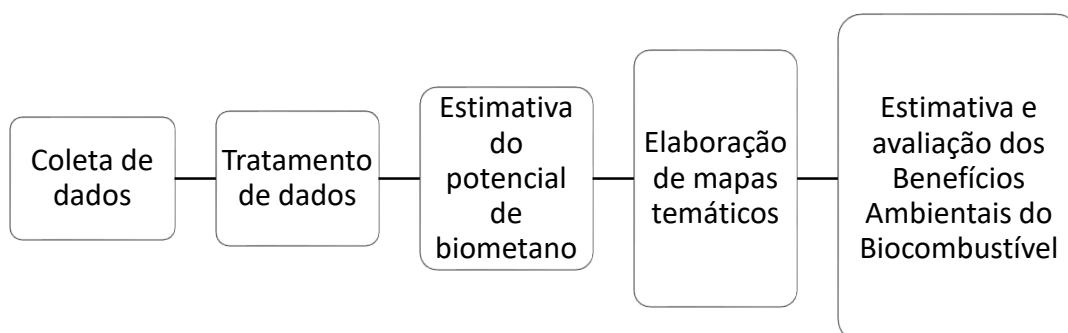
Referências	Território de Pesquisa	Principais achados
		<p>produtivo. Aprofunda-se na vinhaça, delineando sua definição e analisando suas características, com foco nas propriedades físico-químicas que a tornam um componente distintivo no cenário energético.</p> <p>O trabalho amplia a visão ao abordar os diferentes processos de tratamento, trazendo debates relacionados aos reatores/biodigestores. Explora-se, nesse contexto, a viabilidade e eficácia de reatores específicos, como UASB (Reator Anaeróbio de Fluxo Ascendente), CSTR (<i>Continuous Stirred Tank Reactor</i>) e BLC ((Biodigestor Lagoa Coberta), proporcionando uma análise aprofundada e crítica dessas tecnologias no contexto da produção de biogás a partir da vinhaça.</p>
Adaniya, 2019	<p>Estimativa do Potencial Brasileiro de Produção de Biogás Através da Biodigestão da Vinhaça e Seus Aspectos Práticos e Econômicos Dentro do Contexto da Renovabio na Visão do Setor Sucroalcooleiro.</p>	<p>Este trabalho se concentra na avaliação da viabilidade econômica da produção de biogás e biometano a partir da vinhaça. A seção de Estudo de Viabilidade explora indicadores financeiros como Payback, Valor Presente Líquido (VPL), Taxa Interna de Retorno (TIR) e realiza uma análise SWOT. Os Resultados da Pesquisa destacam o potencial brasileiro de produção de biogás e biometano a partir da vinhaça</p>

Fonte: Adaptado de Atlas de Energia de Alagoas (2015). Souza et al (2020). Piroutek (2022)

## 4 MÉTODOS

Nessa seção, são apresentadas as etapas realizadas para atingir o objetivo principal do trabalho, que é realizar a estimativa da produção de biometano em todos os 11 municípios produtores de etanol do estado de Alagoas, com o intuito de identificar as regiões geográficas que apresentam as melhores oportunidades para a produção de biometano a partir da vinhaça. Essa metodologia foi dividida em quatro principais fases: coleta e tratamento de dados, cálculo da estimativa de potencial de biometano, elaboração do mapa temático e a quantificação dos benefícios ambientais gerados pela adoção desse biocombustível. Dessa forma, as etapas foram desenvolvidas conforme ilustrado no fluxograma apresentado na figura 4.

**Figura 4. Fluxograma do desenvolvimento dos métodos do trabalho.**



Fonte: Autor, 2024.

### 4.1 Coleta e tratamento de dados

Nesta fase, foram coletados os dados da safra de 2022/2023 com posição acumulada até 31 de agosto de 2023, relacionado ao volume em metros cúbicos produzido de etanol das unidades produtoras do estado de Alagoas, informações essas obtidas por meio do Sindicato da Indústria do Açúcar e do Álcool no Estado de Alagoas (Sindaçúcar-AL). Os dados passaram por tratamento por meio do Excel 2013 para estabelecer a relação entre as unidades produtoras e os municípios onde estão localizadas, permitindo assim relacionar a produção de vinhaça aos municípios.

## 4.2 Estimativa do potencial de biometano

Nesse contexto, com o objetivo de estimar o potencial de biometano no estado de Alagoas, utilizaram-se as equações 01 a 06, as quais foram adaptadas com base no trabalho de Bernal et al. (2017). Para efetuar os cálculos relativos à quantidade de metano gerado em cada município alagoano, onde foi empregado o software Excel 2013.

$$Vol_{Vinhaça} = Vol_{Etanol} \times Prod_{Etanol \rightarrow Vinhaça} \quad \text{Eq. (1)}$$

Onde:

$Vol_{Vinhaça}$  = Volume de vinhaça (m<sup>3</sup>);

$Vol_{Etanol}$  = Volume de etanol (m<sup>3</sup>);

$Prod_{Etanol \rightarrow Vinhaça}$  = Produção específica de vinhaça através do etanol (m<sup>3</sup>);

$$DQO_{Total} = Vol_{Vinhaça} \times DQO_{Vinhaça} \quad \text{Eq. (2)}$$

Onde:

$DQO_{Total}$  = Quantidade de demanda química de oxigênio total (kg);

$Vol_{Vinhaça}$  = Volume de vinhaça (m<sup>3</sup>);

$DQO_{Vinhaça}$  = Quantidade de demanda química de oxigênio da vinhaça (kg m<sup>-3</sup>).

$$DQO_{removido} = DQO_{Total} \times Ef_{Remoção\ do\ reator} \quad \text{Eq. (3)}$$

Onde:

$DQO_{removido}$  = Quantidade de demanda química de oxigênio removido no tratamento (kg);

$DQO_{Total}$  = Quantidade de demanda química de oxigênio total (kg);

$Ef_{Remoção\ do\ reator}$  = Eficiência de remoção de DQO do reator.

$$Q_{metano} = DQO_{removido} \times Coef_{Rendimento\ de\ metano} \quad \text{Eq. (4)}$$

Onde:

$Q_{metano}$  = Vazão do metano (Nm<sup>3</sup>);

$DQO_{removido}$  = Quantidade de demanda química de oxigênio removido no tratamento (kg);

$Coef_{Rendimento\ de\ metano}$  = Coeficiente de rendimento de metano no reator (Nm<sup>3</sup> kg<sup>-1</sup>).

$$Q_{\text{metano real}} = Q_{\text{metano}} \times (1 - P_{\text{metano para biogás}}) \quad \text{Eq. (5)}$$

Onde:

$Q_{\text{metano real}}$  = Vazão do metano real (Nm<sup>3</sup>);

$Q_{\text{metano}}$  = Vazão do metano (Nm<sup>3</sup>);

$P_{\text{metano para biogás}}$  = Perda de metano na geração de biogás.

$$Q_{\text{Biometano}} = \frac{Q_{\text{metano real}} \times (1 - P_{\text{metano para biometano}})}{0,9} \quad \text{Eq. (6)}$$

Onde:

$Q_{\text{biometano}}$  = Vazão do biometano real (Nm<sup>3</sup>);

$Q_{\text{metano real}}$  = Vazão do metano real (Nm<sup>3</sup>);

$P_{\text{metano para biometano}}$  = Perda de metano na purificação do biogás para produzir biometano.

As variáveis utilizadas nas equações para o cálculo destas estimativas foram extraídas de diversas fontes, as quais são detalhadas nas devidas citações contidas na Tabela 1.

**Tabela 1. Parâmetros utilizados para estimativa da geração de biometano.**

Parâmetro	Indicador	Unidade	Referência
$\text{Prod}_{\text{Etanol} \rightarrow \text{Vinhaça}}$	12	m <sup>3</sup> .m <sup>-3</sup> de etanol	(BULLER et al., 2021)
$\text{DQO}_{\text{Vinhaça}}$	27,5	kg m <sup>-3</sup>	(PARSAEE et al., 2019)
$\text{Ef}_{\text{Remoção do DQO do reator}}$	71,7%	-	(SOUZA; FUZARO; POLEGATO, 1992)
$\text{Coef}_{\text{Rendimento de metano}}$	0,37	Nm <sup>3</sup> kg <sup>-1</sup> DQO removida	(SOUZA; FUZARO; POLEGATO, 1992)
Percentual de metano (Biogás)	60%	-	(SOUZA; FUZARO; POLEGATO, 1992) e (POMPERMAYER, 2000)
Percentual de metano (Biometano)	90%	-	Resolução ANP nº 906/2022
Perda de metano na geração de biogás	14%	-	(KELLER; HARTLEY, 2003)
Perda de metano na purificação para biometano	1,4%	-	(GUERREIRO, 2020)

Fonte: Autor, 2024.

O volume da vinhaça foi estimado com base no pressuposto de que 1 litro de etanol produz de 12 a 20 litros de vinhaça (BULLER et al., 2021), sendo adotado para essa estimativa o menor valor, 12 litros. Além disso, com base nas estimativas de concentração de CH<sub>4</sub> e nas possíveis perdas em processos de purificação de biogás, analisado no estudo de Guerreiro (2020) que compilou informações de diversas fontes bibliográficas, identificou-se uma média de 1,4% de perda de metano na purificação de biogás, média essa que abrange os diversos tipos de processos de purificação.

### **4.3 Agrupamento dos municípios**

O agrupamento dos municípios foi fundamentado no potencial de geração de biometano, sendo realizado através do *software XLSTAT statistical and data analysis solution*, suplemento do Excel. Através dessa ferramenta foi realizada uma análise de *clusters*.

Segundo Everitt et al. (2011), essa análise oferece a capacidade de estruturar extensos conjuntos de dados em um número reduzido de grupos, facilitando a interpretação das informações.

Para tanto, são empregadas funções de similaridade ou dissimilaridade que consideram a distância entre os objetos, buscando formar grupos caracterizados por uma consistência interna significativa e uma diferença externa acentuada (LINDEN, 2009).

Nesse contexto, a escolha do método de agrupamento no software incidiu sobre a distância Euclidiana como medida de dissimilaridade entre os grupos, utilizando o método aglomerativo hierárquico de Ward. Possibilitando, assim, classificar os municípios nas categorias de alto potencial, médio potencial e nenhum potencial para a produção de biometano.

### **4.4 Elaboração do mapa temático referente ao potencial de biometano dos municípios de Alagoas**

Por meio do software QGIS (Quantum Geographic Information System), as informações contidas na tabela de atributos da camada dos municípios foram processadas e os dados referentes à geração de metano de cada município foram incluídos. Em seguida, os municípios foram categorizados em alto, médio e baixo

potencial de geração de biometano, utilizando o agrupamento previamente realizado com base nos valores de geração de metano.

#### 4.5 Estimativa e Avaliação dos Benefícios Ambientais do Biometano

Para calcular a quantidade de carbono que deixou de ser emitida para a atmosfera devido à produção e utilização de biocombustíveis, foi utilizada a estimativa de potencial de biometano previamente calculada, após isso foi identificado o equivalente em combustíveis fósseis, no caso diesel, visto que o biometano é utilizado majoritariamente em veículos de frota pesada que utiliza o diesel como fonte de energia.

Esse equivalente foi obtido através do poder calorífico do biometano, adquirido através de dados presentes no estudo conduzido por Joppert et al. (2018), onde observa-se que o poder calorífico do biometano, contendo 92% de metano, é de 32,94 MJ/Nm<sup>3</sup>. No entanto, para este caso específico, será considerado um teor de metano de 90%, conforme estipulado pelo mínimo exigido na Resolução ANP nº 906/2022. Portanto, será utilizado um valor proporcional de 32,22 MJ/Nm<sup>3</sup>.

Por outro lado, a Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP; 2020), considerou o poder calorífico inferior do óleo diesel como sendo de 10.100 kcal/kg, equivalente a 42,29 MJ/kg. Conseqüentemente, estabelece-se uma relação de 1,31 Nm<sup>3</sup> de biometano por quilograma de óleo diesel, sendo assim possível obter o equivalente de óleo diesel que será substituído pelo biometano como combustível.

$$EC_{Diesel} = \frac{IC_{Diesel} \times PCI_{Diesel} \times \rho_{Diesel} \times V_{Diesel}}{1000000} \quad \text{Eq. (7)}$$

Onde:

$EC_{Diesel}$  = Emissão de carbono do diesel (t);

$IC_{Diesel}$  = Intensidade de carbono do diesel (gCO<sub>2</sub>/MJ);

$PCI_{Diesel}$  = Poder calorífico do óleo diesel (MJ/kg).

$\rho_{Diesel}$  = Densidade específica do diesel (kg/litro)

$V_{Diesel}$  = Volume do diesel (l).

$$EC_{Biometano} = \frac{IC_{Biometano} \times PCI_{Biometano} \times V_{Biometano}}{1000000} \quad \text{Eq. (8)}$$

Onde:

$EC_{Biometano}$  = Emissão de carbono do biometano (t);

$IC_{Biometano}$  = Intensidade de carbono do biometano (gCO<sub>2</sub>/MJ);

$PCI_{Biometano}$  = Poder calorífico do biometano (MJ/ Nm<sup>3</sup>).

$V_{biometano}$  = Volume do biometano (m<sup>3</sup>).

E, por fim, foi subtraído as emissões, obtidas através das Equações 7 e 8, resultante do uso dessas fontes, obtendo assim a quantidade de carbono que deixou de ser emitida. Esses cálculos foram baseados na intensidade de carbono inerente a essas fontes de energia.

Subsequentemente a essa etapa, considerando que um crédito (Crédito de Descarbonização, ou, Crédito de Carbono) representa uma tonelada de carbono que deixou de ser liberada na atmosfera devido à produção e uso de biocombustíveis, foi constatado que o resultado da Equação 9 é diretamente equivalente a quantidade de créditos de carbono.

$$CC = EDE = EC_{Diesel} - EC_{Biometano} \quad \text{Eq. (9)}$$

Onde:

$EDE$  = Carbono que deixou de ser emitido (t);

$CC$  = Créditos de carbono;

$EC_{Diesel}$  = Emissão de carbono do diesel (t);

$EC_{Biometano}$  = Emissão de carbono do biometano (t);

Em seguida, foi realizada a estimativa do ganho financeiro proveniente da comercialização com base nessa quantidade de créditos, tomando como referência o valor vigente no mercado.

Desse modo, por meio do site Investing (2024), foi possível extrair dados históricos relacionados ao crédito de carbono expresso em dólares. Notadamente,



durante o mês de janeiro de 2023, o valor do crédito de carbono era cotado a US\$90,13 dólares. Contrastando com a realidade atual, no mês de janeiro de 2024, o mencionado valor reduziu significativamente para US\$62,59 dólares. Esta variação expressa uma queda substancial de 30,52% no período analisado.

Para fins de análise, foi concentrado nos dados mais recentes disponíveis, referentes ao último mês, ou seja, janeiro de 2024. Essa abordagem possibilitou uma compreensão mais detalhada das oscilações no preço do crédito de carbono, permitindo mais precisão do cenário financeiro associado a esse ativo.

No mesmo intervalo temporal, a taxa de câmbio para o dólar estava estabelecida em R\$ 4,95 como observado no site Investing (2024), refletindo diretamente no valor do crédito de carbono, fixado em R\$ 309,82. Este último montante foi empregado como referência na conversão da estimativa do potencial de ganhos provenientes de ativos ambientais gerados através da produção de biometano a partir da vinhaça em Alagoas.

$$VGC = CC \times VCC \times Dólar \quad \text{Eq. (10)}$$

Onde:

*VGC* = Valor gerado em créditos de carbono (R\$);

*CC* = Créditos de carbono;

*VCC* = Valor de um crédito de carbono (\$);

*Dólar* = Valor do cambio de dólar para real (R\$);

Dessa maneira, foi possível obter os dados apresentados na tabela 2 que foram utilizados nas equações acima para estimar a redução da emissão de carbono e o retorno financeiro gerado pelos créditos de carbono.

**Tabela 2. Parâmetros utilizados para estimativa do retorno financeiro.**

<b>Parâmetro</b>	<b>Indicador</b>	<b>Unidade</b>	<b>Referência</b>
Credito de carbono	62,59	\$	Investing (2024),
Dólar	4,95	R\$	Investing (2024),
Poder calorífico do biometano	32,22	MJ/Nm <sup>3</sup> .	Adaptado de Joppert et al. (2018)
Poder calorífico do óleo diesel	42,29	MJ/kg	ANP (2020)
Relação Biometano por diesel	1,31	Nm <sup>3</sup> /kg	-
Densidade especifica do diesel	0,84	kg/litro	Petrobras (2024)
Intensidade de carbono do diesel	86,5	gCO <sub>2</sub> /MJ	ANP (2018 e 2023)
Intensidade de carbono do biometano	9,32	gCO <sub>2</sub> /MJ	ANP (2018 e 2023)

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 5.1 Estimativa da geração de biometano dos municípios de Alagoas

Através da Tabela 3 é possível observar que a safra de 2023 trouxe consigo um crescimento do potencial de produção de biometano referente à safra anterior, com um aumento significativo de 8,7%. Essa tendência pode ser atribuída, possivelmente, à interrupção das atividades durante a pandemia e à recuperação gradual da economia, levando a um retorno à produção.

Como evidenciado na Tabela 3 a presença de unidades produtoras de cana-de-açúcar em um município não garante seu potencial para produção de biometano, uma vez que nem todas essas unidades são responsáveis pela geração do subproduto vinhaça, essencial para a produção de biometano.

É interessante notar que, apesar da usina Caeté possuir o segundo maior índice de cana-de-açúcar moída, ocupa apenas a décima posição na produção de etanol do estado. Por outro lado, a usina Pindorama, classificada como a segunda maior produtora de etanol, está em décimo segundo lugar no índice de cana-de-açúcar moída.

Em contra ponto, destaca-se que a usina Coruripe lidera em ambas as categorias, tanto na produção de etanol quanto no índice de cana moída. Isso sugere que além da quantidade de cana processada, a destinação dessa matéria prima influencia na geração de biometano através da vinhaça.

Essas observações ressaltam a complexidade do cenário e a importância de uma análise minuciosa para identificar verdadeiramente o potencial de cada região para a produção de biometano. Dessa maneira, torna-se imperativo destacar a necessidade de mapear as regiões do estado de Alagoas que exibem um potencial significativo para a produção de biometano. Essa análise é crucial para avaliar a viabilidade de investimentos nesse setor.

Tabela 3. Estimativa de geração de biometano a partir da vinhaça na safra de 2023.

Unidades Produtoras	Município	Cana Total Moída (T)	Etanol Produzido (M³)	Volume Vinhaça (m³)	DQO Total (kg)	DQO removido (kg)	Volume Metano (Nm³)	Volume Metano Real (Nm³)	Volume Biometano (Nm³)
Camargibe	<b>Matriz De Camargibe</b>	709.542		0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	<b>0,00</b>
Santa Maria	<b>Porto Calvo</b>	515.810	17.628	211.536,00	5.817.240,00	4.170.961,08	1.543.255,60	1.327.199,82	<b>1.454.021,13</b>
Santo Antônio	<b>São Luís Do Quitunde e Matriz Do Camargibe</b>	2.053.029	53.303	639.636,00	17.589.990,00	12.612.022,83	4.666.448,45	4.013.145,66	<b>4.396.624,03</b>
Região 1 Litoral Norte		3.278.381	70.931	851.172,00	23.407.230,00	16.782.983,91	6.209.704,05	5.340.345,48	<b>5.850.645,16</b>
Cachoeira	<b>Maceió</b>			0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	<b>0,00</b>
Caeté	<b>São Miguel Dos Campos</b>	2.134.744	44.023	528.276,00	14.527.590,00	10.416.282,03	3.854.024,35	3.314.460,94	<b>3.631.176,10</b>
Santa Clotilde	<b>Rio Largo</b>	1.114.695	25.644	307.728,00	8.462.520,00	6.067.626,84	2.245.021,93	1.930.718,86	<b>2.115.209,77</b>
Sinimbu	<b>Jequiá Da Praia</b>			0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	<b>0,00</b>
Sumaúma	<b>Marechal Deodoro</b>	1.438.271	31.979	383.748,00	10.553.070,00	7.566.551,19	2.799.623,94	2.407.676,59	<b>2.637.743,46</b>
Utinga	<b>Rio Largo</b>	1.063.319	23.174	278.088,00	7.647.420,00	5.483.200,14	2.028.784,05	1.744.754,28	<b>1.911.475,25</b>
Região 2 Litoral Centro		5.751.029	124.820	1.497.840,00	41.190.600,00	29.533.660,20	10.927.454,27	9.397.610,68	<b>10.295.604,58</b>
Coruripe	<b>Coruripe</b>	3.220.130	63.190	758.280,00	20.852.700,00	14.951.385,90	5.532.012,78	4.757.530,99	<b>5.212.139,51</b>
Pindorama	<b>Coruripe</b>	1.204.415	62.141	745.692,00	20.506.530,00	14.703.182,01	5.440.177,34	4.678.552,52	<b>5.125.614,20</b>
Região 3 Litoral Sul		4.424.545	125.331	1.503.972,00	41.359.230,00	29.654.567,91	10.972.190,13	9.436.083,51	<b>10.337.753,71</b>
Impacto	<b>Teotônio Vilela</b>	1.418.706	46.152	553.824,00	15.230.160,00	10.920.024,72	4.040.409,15	3.474.751,87	<b>3.806.783,71</b>
Marituba	<b>Igreja Nova</b>	1.461.490	47.605	571.260,00	15.709.650,00	11.263.819,05	4.167.613,05	3.584.147,22	<b>3.926.632,40</b>
Penedo	<b>Penedo</b>			0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	<b>0,00</b>
Região 4 Sul		2.880.196	93.757	1.125.084,00	30.939.810,00	22.183.843,77	8.208.022,19	7.058.899,09	<b>7.733.416,11</b>
Porto Rico	<b>Campo Alegre</b>	2.114.773	48.077	576.924,00	15.865.410,00	11.375.498,97	4.208.934,62	3.619.683,77	<b>3.965.564,67</b>
Região 5 Centro Sul		2.114.773	48.077	576.924,00	15.865.410,00	11.375.498,97	4.208.934,62	3.619.683,77	<b>3.965.564,67</b>
Capricho	<b>Cajueiro</b>			0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	<b>0,00</b>
Copervales	<b>Atalaia</b>	915.651		0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	<b>0,00</b>
Região 6 Centro Norte		915.651		0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	<b>0,00</b>
Porto Alegre	<b>Colônia Leopoldina</b>			0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	<b>0,00</b>
Serra Grande	<b>São José Da Laje</b>	1.258.733	23.480	281.760,00	7.748.400,00	5.555.602,80	2.055.573,04	1.767.792,81	<b>1.936.715,24</b>
Taquara	<b>Col. Leopoldina</b>	252.843		0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	<b>0,00</b>
Região 7 Norte	-	1.511.576	23.480	281.760,00	7.748.400,00	5.555.602,80	2.055.573,04	1.767.792,81	<b>1.936.715,24</b>
<b>Total Geral</b>	-	20.876.151	486.396	5.836.752,00	160.510.680,00	115.086.157,56	42.581.878,30	36.620.415,34	<b>40.119.699,47</b>
<b>Safra Anterior 2021/2022</b>	-	18.227.493	447.185	5.366.220,00	147.571.050,00	105.808.442,85	39.149.123,85	33.668.246,51	<b>36.885.434,52</b>

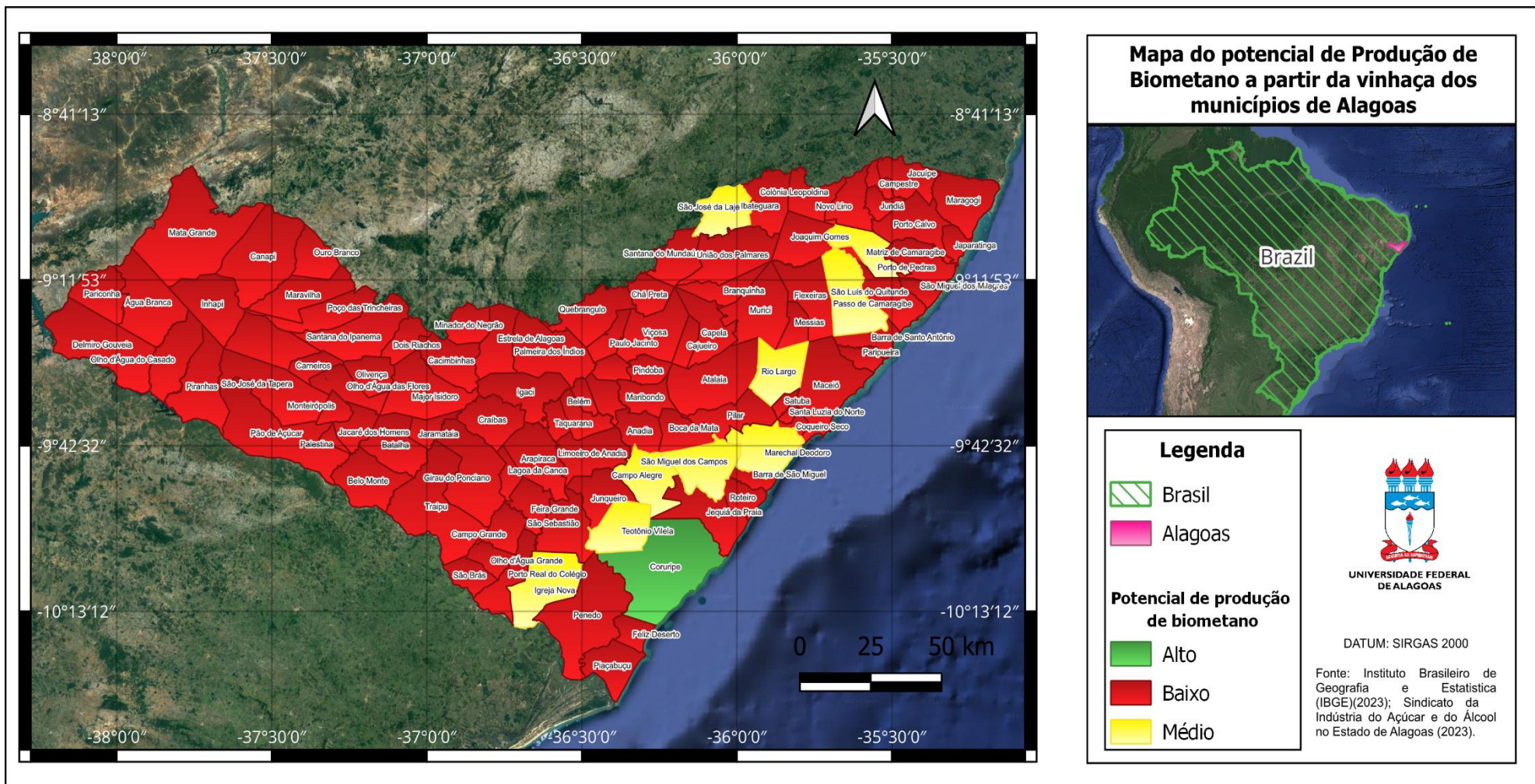
Fonte: Autor, 2024

## **5.2 Mapeamento das variações regionais do potencial de produção de biometano no território de Alagoas**

A análise do potencial de produção de biometano a partir da vinhaça por município é fundamental para tomada de decisões estratégicas. Desse modo, nesse tópico é apresentado o resultado da classificação dos municípios e o seu enquadramento nas diferentes categorias de potencial para a produção de biometano, conforme apresentado no apêndice 1 e na Figura 5.

Possibilitando observar que o potencial preponderante para a produção de biometano a partir da vinhaça reside na região leste de Alagoas, fato esse atribuído à proximidade das usinas produtoras de etanol com as áreas de cultivo de cana-de-açúcar. Nessa localidade, identificam-se municípios com médio e alto potencial para a geração desse substrato. Diferentemente das regiões do sertão e agreste alagoano que não apresentam potencial significativo.

Figura 5. Mapa do potencial de produção de biometano a partir da vinhaça dos municípios de Alagoas.



Fonte: Autor, 2024

Vale ressaltar que Coruripe emergiu como o município de maior destaque, exibindo um elevado potencial para a produção de biometano a partir da vinhaça. Portanto, este município assume um papel prioritário para investimentos, visando tornar-se um exemplo a ser seguido por outros municípios.

Adicionalmente, os municípios do leste alagoano, por estarem próximos ao litoral, usufruem da possibilidade de transportar o biometano para outras localidades por meio do transporte marítimo, caso a opção seja pela exportação. Além disso, a proximidade com a capital favorece parcerias intersetoriais e denota uma infraestrutura mais robusta, devido à proximidade com as principais zonas industriais do Estado.

Destaca-se ainda que essa estratégia regional pode impulsionar a geração de empregos e renda, resultando em efeitos como o aumento da migração de indivíduos de municípios circunvizinhos, inclusive da capital, para essas localidades, a fim de criar novas fontes de renda em Alagoas.

### **5.3 Análise Quantitativa do Potencial de Ganhos por Intermédio de Ativos Ambientais**

Considerando que a estimativa do presente trabalho foi o volume gerado em biometano de 40.119.699 Nm<sup>3</sup>, o que corresponde a 31.625.724 kg de diesel, ao converter esses valores para litros, utilizando a densidade específica obtemos um total de 36.459.195 litros de diesel.

Além disso, ao subtrair, devido a substituição do combustível, as emissões de carbono do diesel que totaliza 112.031,5 toneladas de carbono para o biometano com uma emissão total de 12.047,6 toneladas de carbono, teríamos 99.983,9 toneladas de carbono que deixariam de ser emitidas, uma redução de 89,25% das emissões de carbono, resultando em 99.983,9 créditos de carbono. Portanto, seria gerado um total de R\$ 30.977.011 (Trinta milhões, novecentos e setenta e sete mil e onze reais) em crédito de carbono apenas pela substituição do diesel por biometano gerado a partir da vinhaça no Estado.

Esses resultados evidenciam não apenas os benefícios ambientais da substituição do diesel pelo biometano, mas também os ganhos econômicos associados à redução das emissões de carbono.

## 6 CONCLUSÕES

Os objetivos propostos neste trabalho foram alcançados, contudo a ausência de dados específicos sobre as características da vinhaça gerada no estado de Alagoas emerge como uma barreira na capacidade de retratar com precisão os aspectos fundamentais relacionados à produção e ao potencial de biometano a partir desse subproduto.

Observou-se que o gerenciamento eficaz da vinhaça pode proporcionar retornos significativos, tanto do ponto de vista ambiental quanto financeiro. A redução potencial das emissões de carbono em até 89,25% destaca-se como uma das vantagens primordiais dessa abordagem, evidenciando o seu impacto positivo na mitigação das mudanças climáticas e na promoção da sustentabilidade.

Do ponto de vista financeiro, a substituição do diesel por biometano gerado a partir da vinhaça em todo o estado resultaria em um total de R\$ 30.977.011 (Trinta milhões, novecentos e setenta e sete mil e onze reais) em créditos de carbono para o ano de 2023.

Adicionalmente, é crucial notar que o estado possui outros potenciais para geração do biometano, como aterros sanitários, laticínios, estações de tratamento de água e outros. Portanto, o retorno financeiro advindo de créditos de carbono através do biometano é consideravelmente maior do que o analisado exclusivamente neste trabalho.

Além disso, através do mapa elaborado foi possível observar que a região próxima da capital, Maceió, apresenta potencial de geração de biometano a partir da vinhaça. Este fato não só justifica, mas também incentiva maiores investimentos nesta região, proporcionando oportunidades para o desenvolvimento sustentável da região, visto que nessa região está inserida a maior parte da frota de veículos do estado.

Mais especificamente, destaca-se que a região com o maior potencial para a geração de biometano no estado é no município de Coruripe e seus municípios circunvizinhos, situados a uma distância relativamente próxima da capital, cerca de 86,5 km. Esta proximidade apresenta uma oportunidade estratégica para grandes investimentos, especialmente devido à localização costeira de Coruripe.



Nesse contexto, o município poderia emergir como um centro significativo de produção de biocombustíveis, com capacidade para exportar seus produtos para outros estados e até mesmo para outros países.

Desse modo, torna-se evidente a necessidade de aumentar os incentivos fiscais por parte dos Governos, visando atrair mais investimentos nessa área, seguindo o exemplo de outros países e até mesmo de estados brasileiros.

Por acréscimo, é importante destacar que estudos subsequentes devem ser direcionados de modo a explorar outras fontes potenciais de geração de biometano, tais como aterros sanitários, laticínios, estações de tratamento de águas residuárias e outros. Além disso, é recomendável a condução de estudos de viabilidade técnico-econômica (EVTE) para avaliar a viabilidade financeira dos investimentos nesses setores emergentes, visando fornecer insights valiosos para *stakeholders* e tomadores de decisão.

## REFERÊNCIAS

- ABATZOGLOU, Nicolas; BOIVIN, Steve. **A review of biogas purification processes**. Biofuels, Bioproducts and Biorefining, v. 3, n. 1, p. 42-71, 2009
- ABIOGÁS, ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE BIOGÁS E BIOMETANO. **ABiogás divulga novo potencial do biogás para o mercado brasileiro**. São Paulo: ABiogás, 2021. Disponível em: <<https://abiogas.org.br/abiogas-divulga-novo-potencial-do-biogas-para-o-mercado-brasileiro-durante-forum-em-sao-paulo/>>. Acesso em: 10 set. 2023.
- ADANIYA, Roberto Kiyoshi. **Estimativa do Potencial Brasileiro de Produção de Biogás Através da Biodigestão da Vinhaça e Seus Aspectos Práticos e Econômicos Dentro do Contexto da Renovabio na Visão do Setor Sucroalcooleiro**. Monografia. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Diretoria de Pesquisa e Pós-Graduação, Especialização em Tecnologias da Cadeia Produtiva do Biogás, 2019.
- ADECOAGRO. **Relatório de sustentabilidade 2020**. Disponível em: <<https://sustainability.adecoagro.com/pt/planeta-pt/eficiencia-energetica/biogas-e-biometano/>>. Acesso em: 13 set. 2023.
- AGRAWAL, Lalit K.; HARADA, Hideki; OKUI, Hiroyuki. **Treatment of dilute wastewater in a UASB reactor at a moderate temperature: performance aspects**. Journal of fermentation and bioengineering, v. 83, n. 2, p. 179-184, 1997.
- AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCMBUSTÍVEIS (ANP). **Apresentação: Abiogás: cenário atual e perspectivas**. Disponível em: <<https://www.gov.br/anp/pt-br/centrais-de-conteudo/apresentacoes-palestras/2023/arquivos/3-seminario-sbq/27-03-2023-tema2-abiogas.pdf>>. Acesso em: 14 fev. 2024.
- AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCMBUSTÍVEIS. Resolução ANP nº 906, de 18 de novembro de 2022. **Dispõe sobre as especificações do biometano oriundo de produtos e resíduos orgânicos agrossilvopastoris e comerciais destinado ao uso veicular e às instalações residenciais e comerciais a ser comercializado em todo o território nacional**. Disponível em: <<https://atosoficiais.com.br/anp/resolucao-n-906-2022-dispoe-sobre-as-especificacoes-do-biometano-oriundo-de-produtos-e-residuos-organicos-agrossilvopastoris-e-comerciais-destinado-ao-uso-veicular-e-as-instalacoes-residenciais-e-comerciais-a-ser-comercializado-em-todo-o-territorio-nacional?origin=instituicao>>. Acesso em: 09 nov. 2023.
- AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCMBUSTÍVEIS (ANP). **FATORES DE CONVERSÃO, DENSIDADES E PODERES CALORÍFICOS INFERIORES: Valores médios para o ano de 2022**. Disponível em: <<https://www.gov.br/anp/pt-br/centrais-de-conteudo/publicacoes/anuario-estatistico/arquivos-anuario-estatistico-2022/outras-pecas-documentais/fatores-conversao-2022.pdf>>. Acesso em: 14 fev. 2024.

ALAGOAS. Governo do Estado. Secretaria do Desenvolvimento Econômico e Turismo. **Atlas de Energia de Alagoas**, 2015. Karina Ribeiro Salomon et al. Maceió, 2015.

BEBÉ, Felizarda V. et al. **Avaliação de solos sob diferentes períodos de aplicação com vinhaça**. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v. 13, p. 781-787, 2009.

BERNAL, Andressa Picionieri 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.

BIASUZ, MARINA SANDI. **Comercialização de CBios: o impacto econômico em usinas de biocombustíveis**. Porto Alegre, 2022.

BIRATH, K. et al. **Technical guidance for biofuels**, Utrecht, The Netherlands: European Commission nor the co-ordination Action Biofuel Cities European Partneship Consortium, 2008. Disponível em:<<http://biofuel-cities.eu/>>. Acesso em: 08 set. 2023.

BRASIL. Decreto nº 11.003, de 21 de março de 2022. **Institui a Estratégia Federal de Incentivo ao Uso Sustentável de Biogás e Biometano**. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 22 mar. 2022. Disponível em:<< [https://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_ato2019/2022/2022/decreto/d11003.htm#:~:text=DECRETO%20N%C2%BA%2011.003%2C%20DE%2021,Sustent%C3%A1vel%20de%20Biog%C3%A1s%20e%20Biometano](https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2019/2022/2022/decreto/d11003.htm#:~:text=DECRETO%20N%C2%BA%2011.003%2C%20DE%2021,Sustent%C3%A1vel%20de%20Biog%C3%A1s%20e%20Biometano)>. Acesso em: 09 nov. 2023.

BRASIL. Lei nº 13.576, de 26 de dezembro de 2017. Institui a Política Nacional de Biocombustíveis (RenovaBio), e dá outras providências. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 27 dez. 2017. Seção 1, p. 1-2.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. Resolução nº 758, de 23 de novembro de 2018. **Regulamenta a certificação da produção ou importação eficiente de biocombustíveis de que trata o art. 18 da Lei nº 13.576, de 26 de dezembro de 2017, e o credenciamento de firmas inspetoras**. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 26 nov. 2018. Seção 1, p. 92.

BRITO, Sabrina Sobrinho de. **Produção de Biogás a partir da Vinhaça**. Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) - Universidade Federal da Paraíba Centro de Tecnologia em Desenvolvimento Regional Departamento de Tecnologia Sucroalcooleira, João Pessoa/PB, 2021.

BULLER, Luz Selene et al. **A spatially explicit assessment of sugarcane vinasse as a sustainable by-product**. Science of The Total Environment, v. 765, p. 142717, 2021.

CARDOSO, Maxiane; COSTA, HKM. Renovabio, uma análise sobre o programa e sua influência no desenvolvimento do mercado do biometano. Revista Brasileira de Energia, v. 26, n. 3, 2020.

CiBiogás, Centro Internacional de Energias Renováveis. **Panorama do biogás no Brasil 2021**. CiBiogás. Disponível em: <https://cibiogas.org/>. Acesso em: 10 set. 2023.

EPE. **Matriz Energética e Elétrica. 2022**. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/abcdenergia/matriz-energetica-e-eletrica>. Acesso em 06 set. 2023

EUROPEAN BIOGAS ASSOCIATION (2023). **Biogas & biomethane in a nutshell**. Disponível em: <https://www.europeanbiogas.eu/>. Acesso em: 10 set. 2023.

EVERITT, B. S.; LANDAU, S.; LEESE, M.; STAHL, D. **Cluster Analysis**. 5 Ed. London: Wiley, 2011.

FREIRE, W. J.; CORTEZ, L. A. B. **Vinhaça de cana-de-açúcar**. Guaíba: Agropecuária, 2000. 203p.

Governo do Paraná. **Londrina inicia teste inédito no País com ônibus movido 100% a biometano no transporte urbano**. Disponível em: <https://www.aen.pr.gov.br/Noticia/Londrina-inicia-teste-inedito-no-Pais-com-onibus-movido-100-biometano-no-transporte-urbano>. Acesso em: 12 set. 2023.

González, Thiago. **Purificação de biogás e identificação de equipamentos para geração de energia elétrica, térmica e veicular**. Rio de Janeiro, 2015. Eng. Agrônomo. Núcleo de Projetos e Tecnologias, Centro Internacional de Energias Renováveis – CiBiogás-ER.

GUERREIRO, Érica Machado da Silva. **Potencial de Aproveitamento Energético de Biometano Gerado em Aterros Sanitários: Estudos de Casos**. 2020. 104 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, 2020

**Handbook on biogas utilization**. Published for U. S. Department of Energy Southeastern Regional Biomass Energy Program Tennessee Valley Authority Muscle Shoals, Alabama 35660. Research institute Georgia institute of Technology Atlanta, Georgia 30332, 1990

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Levantamento Sistemático da Produção Agrícola (LSPA) - Alagoas**. Disponível em: <https://sidra.ibge.gov.br/home/lspa/alagoas>. Acesso em 08 set. 2023.

Instituto Totum. **Certificação GAS-REC**. Disponível em: <https://www.institutototum.com.br/index.php/servicos/412-certificacao-gas-rec>. Acesso em: 8 set. 2023.

Investing. **USD/BRL Dados Históricos**. Disponível em: <https://br.investing.com/currencies/usd-brl-historical-data>. Acesso em: 5 fev. 2024.

Investing. **Dados históricos de emissões de carbono em commodities**. Disponível em: <https://br.investing.com/commodities/carbon-emissions-historical-data>. Acesso em: 5 fev. 2024.

- JOPPERS, C.I. et al. **A short-cut model for predicting biomethane availability after biogas upgrading.** Journal Of Cleaner Production, v. 200, p.148-160, nov. 2018
- KELLER, J.; HARTLEY, K. **Greenhouse gas production in wastewater treatment: process selection is the major factor.** Water Science and Technology, v.47, n.12, p.43-48, 2003.
- KOORNNEEF, J. et al. **Global potential for biomethane production with carbon capture, transport and storage up to 2050.** Energy Procedia. Anais, 2013
- KUNZ, Airton et al. **Fundamentos da digestão anaeróbia, purificação do biogás, uso e tratamento do digestato.** Concórdia, Sbera: Embrapa Suínos e Aves, 2019.
- LANGER, PAIGE; SEYMOUR, FRANCES. **Como as empresas podem usar mercados voluntários de carbono para ajudar a proteger as florestas tropicais.** WRI BRASIL, 2023. Disponível em: <https://www.wribrasil.org.br/noticias/empresas-mercados-voluntarios-de-carbono-protger-florestas>. Acesso em: 8 set. 2023.
- LEITÃO, R. C.; VAN HAANDEL, A. C.; ZEEMAN, G.; LETTINGA, G. **The effects of operational and environmental variations on anaerobic wastewater treatment systems: a review.** Bioresource Technology, v. 97, p. 1105-1118, 2006.
- LINDEN, R. **Técnicas de agrupamento.** Revista de Sistemas de Informação da FSMA, v. 4, n. 4, p. 18-36, 2009.
- LOBATO, LÍVIA CRISTINA DA SILVA. **Aproveitamento energético de biogás gerado em reatores UASB tratando esgoto doméstico. 2011.** 184 f. Tese (Doutorado) - Curso de Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos, Escola de Engenharia da Ufmg, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2011. Disponível em: <https://repositorio.ufmg.br/handle/1843/ENGD-8KYNF3>. Acesso em: 08 set. 2023.
- LUMIVERO. **XLSTAT statistical and data analysis solution. 2023.** New York, USA. Disponível em: <https://www.xlstat.com>. Acesso em: 23 nov. 2023.
- MATO GROSSO. Assembleia Legislativa. Lei Ordinária nº 11768, de 24 de maio de 2022. **Dispõe sobre a Política Estadual do Biogás e Biometano e adota outras providências.** Diário Oficial do Estado, 24 de maio de 2022. Disponível em: <https://www.al.mt.gov.br/norma-juridica/urn:lex:br:mato.grosso:estadual:lei.ordinaria:2022-05-24;11768>. Acesso em: 09 nov. 2023.
- MINAS GERAIS. Assembleia Legislativa. Lei nº 24.396, de 13 de julho de 2023. **Dispõe sobre a política estadual do biogás e do biometano.** Diário Oficial do Estado, 13 de julho de 2023. Disponível em: <https://www.almg.gov.br/legislacao-mineira/LEI/24396/2023/>. Acesso em 09 nov. 2023.
- MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA - MME. **RenovaBio.** Disponível em: [mme.gov.br](http://mme.gov.br). Acesso em: 11 set. 2023.

OLIVEIRA, TALITA. **Evolução da matriz energética brasileira em comparação com outros países**. 2022. 55 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Química, Departamento de Engenharia Química, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2022. Disponível em:

[https://repositorio.ufscar.br/bitstream/handle/ufscar/16155/TG\\_TALITA\\_2022.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://repositorio.ufscar.br/bitstream/handle/ufscar/16155/TG_TALITA_2022.pdf?sequence=1&isAllowed=y). Acesso em 12 set. 2023.

Parsaee, M., & Kiani Deh Kiani, M. (2019). **A review of biogas production from sugarcane vinasse**. Biomass and Bioenergy, 122, 117-125.

<https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2019.01.034>

PETROBRAS. **Óleo Diesel**. Disponível em: <<https://www.petrobras.com.br/quem-somos/oleo-diesel>>. Acesso em: 14 fev. 2024.

PIROUTEK, Alain Borges. **Estimativa de Potencial de Produção de Biogás a partir da Vinhaça no Estado de São Paulo**. Araraquara, SP: Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Instituto de Química - Câmpus de Araraquara, 2022.

POMPERMAYER, R. S.; PAULA, JR. D.R. **Estimativa do potencial brasileiro de produção de biogás através da biodigestão da vinhaça e comparação com outros energéticos**. Encontro de Energia no Meio Rural, 3, 2000.

POYER, F. R; SILVEIRA, C. S. D; COSTA, C. L; OLIVEIRA, L. D. **Crédito de Carbono: panorama das publicações no Brasil para os últimos dez anos (2009 a 2019)**. Anais...[do] VIII Simpósio da Ciência do Agronegócio. Porto Alegre-RS 2020.

SIMPLE ENERGY. **I-REC: o que é, para que serve e como comprar**. Disponível em: <<https://simpleenergy.com.br/o-que-e-irec/#:~:text=O%20I%2DREC%2C%20ou%20Certificado,%C3%A9%20produzida%20por%20fontes%20renov%C3%A1veis>>. Acesso em 12 de setembro de 2023.

SINDICATO DA INDÚSTRIA DO AÇÚCAR E DO ÁLCOOL NO ESTADO DE ALAGOAS. **Safra 2022/2023 Boletim 24**. Disponível em: <<https://www.sindacucar-al.com.br/boletim-da-safra/>>. Acesso em: 10 set 2023.

SINGH, K. S.; VIRARAGHAVAN, T. Start-up and Operation of UASB Reactors at 20° C for Municipal Wastewater Treatment. Journal of Fermentation and Bioengineering, v.85, n.6, p.609-614, 1998.

SOUZA, JOSÉ DE; SCHAEFFER, Lirio. **Estudo para fabricação de cilindros especiais para biometano**. Revista Liberato, Novo Hamburgo, v. 11, n. 15, p. 1-88, jan./jun. 2010.

SOUZA, M.E., Fuzaro, G., Polegato, A.R. **Thermophilic anaerobic digestion of vinasse in pilot plant uasb reactor**. War. Sci. Tech v. 25, n. 7, p. 213–222, 1992.

SOUZA, Raoní Oliveira de et al. **Estimativa do Potencial de Produção de Biogás a partir da Digestão Anaeróbia de Vinhaça no Estado de São Paulo - Safra**

**2018/2019.** 3º Congresso Sul Americano de Resíduos Sólidos e Sustentabilidade, 2020.

**RAÍZEN. Raízen inaugura planta de biogás e consolida portfólio de energias renováveis.** Disponível em: <<https://www.raizen.com.br/sala-de-imprensa/raizen-inaugura-planta-de-biogas-e-consolida-portfolio-de-energias-renovaveis>>. Acesso em: 09 nov. 2023.

**RAMOS, LUCAS RODRIGUES et al. Scale-up and energy estimations of single- and two-stage vinasse anaerobic digestion systems for hydrogen and methane production.** Journal Of Cleaner Production, [S.L.], v. 349, p. 131459, maio 2022. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.131459>. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0959652622010812?via%3Dihub>>. Acesso em: 08 set. 2023.

**VEIGA, ANA PAULA BEBER; MERCEDES, SONIA SEGER. Biometano de Gás de Aterros no Brasil: Potencial e Perspectivas.** In: 10º Congresso sobre Geração Distribuída e Energia no Meio Rural, 11 a 13 de novembro de 2015, Universidade de São Paulo – USP, São Paulo.

## APÊNDICE

Apêndice A. Classificação dos municípios de acordo com o potencial para a produção de biometano

<b>Grupo</b>	<b>Municípios</b>
Alto potencial para a produção de biometano.	Coruripe
Médio potencial para a produção de biometano.	Campo Alegre, Igreja Nova, Marechal Deodoro, Matriz de Camaragibe, Rio Largo, São José da Laje, São Luís do Quitunde, São Miguel dos Campos e Teotônio Vilela.
Nenhum potencial para a produção de biometano.	Água Branca, Anadia, Arapiraca, Atalaia, Barra de Santo Antônio, Barra de São Miguel, Batalha, Belém, Belo Monte, Boca da Mata, Branquinha, Cacimbinhas, Cajueiro, Campestre, Campo Grande, Canapi, Capela, Carneiros, Chã Preta, Coité do Nóia, Colônia Leopoldina, Coqueiro Seco, Craíbas, Delmiro Gouveia, Dois Riachos, Estrela de Alagoas, Feira Grande, Feliz Deserto, Flexeiras, Girau do Ponciano, Ibateguara, Igaci, Inhapi, Jacaré dos Homens, Jacuípe, Japaratinga, Jaramataia, Jequiá da Praia, Joaquim Gomes, Jundiá, Junqueiro, Lagoa da Canoa, Limoeiro de Anadia, Maceió, Major Isidoro, Mar Vermelho, Maragogi, Maravilha, Maribondo, Mata Grande, Messias, Minador do Negrão, Monteirópolis, Murici, Novo Lino, Olho d'Água das Flores, Olho d'Água do Casado, Olho d'Água Grande, Olivença, Ouro Branco, Palestina, Palmeira dos Índios, Pão de Açúcar, Pariconha, Paripueira, Passo de Camaragibe, Paulo Jacinto, Penedo, Piaçabuçu, Pilar, Pindoba, Piranhas, Poço das Trincheiras, Porto Calvo, Porto de Pedras, Porto Real do Colégio, Quebrangulo, Roteiro, Santa Luzia do Norte, Santana do Ipanema, Santana do Mundaú, São Brás, São José da Tapera, São Miguel dos Milagres, São Sebastião, Satuba, Senador Rui Palmeira, Tanque d'Arca, Taquarana, Traipu, União dos Palmares e Viçosa.

Fonte: Autor, 2024.