

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE AGRONOMIA E MEDICINA VETERINÁRIA
GESTÃO DE AGRONEGÓCIOS**

Lucas Vieira Santos

**O POTENCIAL DOS RESÍDUOS AGROINDUSTRIAIS NA GERAÇÃO DE
ENERGIA RENOVÁVEL**

Brasília, DF
2024

Lucas Vieira Santos

O POTENCIAL DOS RESÍDUOS AGROINDUSTRIAS NA GERAÇÃO DE ENERGIA RENOVÁVEL

Monografia apresentada ao curso de Gestão de Agronegócios, da Universidade de Brasília (UnB), como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Gestão de Agronegócios.

Orientadora Prof^a. Dr^a: Elen Presotto

Brasília, DF
2024

CIP - Catalogação na Publicação

SSA237p Santos, Lucas Vieira.
O POTENCIAL DOS RESÍDUOS AGROINDUSTRIAIS NA
GERAÇÃO DE ENERGIA RENOVÁVEL / Lucas Vieira Santos;
orientador Elen Presotto. -- Brasília, 2024.
56 p.

Monografia (Graduação - Gestão de Agronegócios) --
Universidade de Brasília, 2024.

1. Resíduos Agroindustriais. 2. Energia renovável. 3.
Biomassa. 4. Potencial Energético . I. Presotto, Elen ,
orient. II. Título.

Lucas Vieira Santos

**POTENCIAL DOS RESÍDUOS AGROINDUSTRIAIS NA GERAÇÃO DE
ENERGIA RENOVÁVEL**

Monografia apresentada ao curso de Gestão de Agronegócios, da Universidade de Brasília (UnB), como requisito parcial para a obtenção do título de **Bacharel em Gestão de Agronegócios**.

Aprovada em 5 de setembro de 2024:

**Professora Elen Presotto, doutora (UnB)
(Presidente/Orientador)**

**Professora Mayra Batista Bitencourt
Fagundes (UnB)**

**Professor Jaim Jose da Silva
Junior (UnB)**

Brasília, DF
2024

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho ao meu pai, João, pela sabedoria e força que sempre me inspiraram a seguir em frente, mesmo nos momentos mais desafiadores. À minha mãe, Silvania, por todo amor, apoio incondicional e por ser meu porto seguro, iluminando meus caminhos com sua bondade e paciência. E ao meu irmão, João Pedro, que com sua amizade e companheirismo, me lembrou todos os dias da importância da nossa irmandade. A vocês, que sempre acreditaram em mim, dedico cada conquista e aprendizado deste trabalho.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho é o resultado de uma jornada que não seria possível sem o apoio e a colaboração de muitas pessoas, a quem gostaria de expressar minha mais profunda gratidão.

Primeiramente, agradeço a Deus, por me conceder saúde, força e sabedoria para enfrentar os desafios ao longo desse caminho.

Aos meus pais, João e Silvania, e ao meu irmão João Pedro, minha eterna gratidão. Vocês foram a base de tudo, me oferecendo amor, suporte e encorajamento em cada etapa. A paciência e o carinho de vocês foram fundamentais para que eu pudesse me dedicar a esta graduação.

À minha orientadora Elen, um super agradecimento pela orientação, pelos ensinamentos. Suas orientações foram importantíssimas para a realização deste trabalho, sem ela eu estaria perdido, me ajudou muito.

Por fim, um agradecimento especial à Universidade de Brasília por me proporcionar tantas experiências marcantes e por fazer parte da minha trajetória, sendo praticamente uma segunda casa pra min. Me sinto orgulhoso por ter estudado aqui e contribuir de alguma forma para uma sociedade melhor.

RESUMO

POTENCIAL DOS RESÍDUOS AGROINDUSTRIAIS NA GERAÇÃO DE ENERGIA RENOVÁVEL

AUTOR: Lucas Vieira Santos
ORIENTADORA: Elen Presotto

Este estudo tem como principal objetivo analisar o potencial dos resíduos agroindustriais na geração de energia renovável no Brasil. Considerando o contexto brasileiro, caracterizado pela ampla produção agrícola, o trabalho realizou uma análise geoespacial detalhada das seis maiores culturas agrícolas do país (cana-de-açúcar, soja, milho, mandioca, laranja e arroz) selecionadas com base no critério de toneladas produzidas. A partir de consultas a literatura disponível e utilizando um software de análise de dados georreferenciados, a pesquisa estima tanto o potencial energético quanto as quantidades de resíduos gerados por essas culturas. Os resultados revelam que o Brasil dispõe de uma vasta quantidade de resíduos agroindustriais distribuídos de maneira estratégica em todo o território nacional, oferecendo um grande potencial para a geração de energia limpa e renovável. Além de promover uma gestão ambientalmente mais sustentável dos resíduos, o aproveitamento desses materiais pode contribuir significativamente para a diversificação e expansão da matriz energética brasileira, impulsionando o desenvolvimento das energias renováveis no país.

Palavras-chave: Resíduos agroindustriais, energia renovável, biomassa, potencial energético, Brasil.

ABSTRACT

POTENTIAL OF AGRO-INDUSTRIAL WASTE IN RENEWABLE ENERGY GENERATION

AUTHOR: Lucas Vieira Santos

ADVISOR: Elen Presotto

The main objective of this study is to analyze the potential of agro-industrial waste in the generation of renewable energy in Brazil. Considering the Brazilian context, characterized by extensive agricultural production, the study conducts a detailed geospatial analysis of the country's six largest agricultural crops (sugarcane, soybeans, corn, cassava, oranges, and rice), selected based on the criterion of tons produced. By consulting the available literature and using georeferenced data analysis software, the research estimates both the energy potential and the amounts of waste generated by these crops. The results reveal that Brazil has a vast amount of agro-industrial waste strategically distributed across the national territory, offering great potential for the generation of clean and renewable energy. In addition to promoting more environmentally sustainable waste management, the use of these materials can significantly contribute to the diversification and expansion of Brazil's energy matrix, driving the development of renewable energy in the country.

Keywords: Agro-industrial waste, renewable energy, biomass, energy potential, Brazil.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Representação esquemática das etapas da digestão anaeróbia	20
Figura 2 - Biodigestor Modelo Indiano	23
Figura 3 - Biodigestor Modelo Chinês.....	24
Figura 4 - Biodigestor Modelo Canadense.....	25
Figura 5 - Biodigestor Modelo de Batelada.....	26
Figura 6 - Mapa coroplético da concentração de resíduos industriais da cana-de-açúcar (bagaço)	34
Figura 7 - Mapa coroplético da concentração de resíduos industriais da soja (cascas)	37
Figura 8 - Mapa coroplético da concentração de resíduos industriais do milho (sabugo)	39
Figura 9 - Mapa coroplético da concentração de resíduos industriais da mandioca (cascas).....	42
Figura 10 - Mapa coroplético da concentração de resíduos industriais da laranja (cascas).....	44
Figura 11 - Mapa coroplético da concentração de resíduos industriais do arroz (cascas)	46

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Culturas, coeficientes técnicos de conversão utilizados e PCI.....	32
Tabela 2 - Geração de resíduos industriais e potencial energético do bagaço da cana-de-açúcar (continua).....	35
Tabela 3 - Geração de resíduos industriais e potencial energético da casca da soja (cascas).....	38
Tabela 4 - Geração de resíduos industriais e potencial energético do sabugo de milho (continua)	40
Tabela 5 - Geração de resíduos industriais e potencial energético da mandioca (cascas).....	43
Tabela 6 - Geração de resíduos industriais e potencial energético estadual da laranja (cascas).....	45
Tabela 7 - Geração de resíduos industriais e potencial energético do arroz (continua)	47

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABIB	Associação Brasileira das indústrias de biomassa
CH ₄	Metano
CO ₂	Dióxido de carbono
GNV	Gás natural veicular
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
J/g	Joules por grama
kcal/kg	Quilocalorias por quilograma
MJ/kg	Megajoules por quilograma
PCI	Poder calorífico inferior
PCS	Poder calorífico superior
PIB	Produto Interno Bruto
SIDRA	Sistema IBGE de Recuperação Automática
J	Joule

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	13
1.1 OBJETIVO GERAL	15
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	15
1.3 CONTEXTUALIZAÇÃO E JUSTIFICATIVA.....	16
2 REFERENCIAL TEÓRICO E REVISÃO DE LITERATURA	17
2.1 O CONCEITO DE BIOMASSA	17
2.2 BIOENERGIA.....	18
2.3 PODER CALORÍFICO DA BIOMASSA RESIDUAL.....	19
2.4 PRODUÇÃO DE BIOGÁS	20
2.5 BIODIGESTORES E IMPLEMENTAÇÃO	21
2.6 APLICAÇÕES E USO DE BIOGÁS.....	26
2.7 SUSTENTABILIDADE E MEIO AMBIENTE	28
2.8 BIOECONOMIA	29
3 METODOLOGIA	32
3.1 DADOS	32
3.2 MÉTODOS.....	33
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	34
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	49
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	51

1 INTRODUÇÃO

Não há como negar que o Brasil é destaque na produção agrícola, representando um dos setores econômicos mais estratégicos para a economia brasileira. A significativa participação e o expressivo efeito multiplicador do complexo agroindustrial no Produto Interno Bruto (PIB), juntamente com a considerável influência dos produtos de origem agrícola na pauta de exportações, destacam-se como exemplos que ilustram a relevância da agricultura para o desempenho da economia brasileira (MINISTÉRIO DA AGRICULTURA E PECUÁRIA, 2024).

Com o avanço da modernização na agricultura, observa-se um aumento significativo na produção de alimentos e uma transição para sistemas mais intensivos. Esse crescimento impulsionou o desenvolvimento de um novo setor industrial, conhecido como agroindústria, responsável pelo processamento da produção primária de alimentos (SCHNEIDER et al., 2012). Esse cenário de intensificação agrícola e expansão da agroindústria tem sido acompanhado pelo desafio associado à gestão dos resíduos gerados. O aumento contínuo na produção agrícola, ano após ano, resulta também em grandes quantidades de resíduos agroindustriais.

Tendo em vista o forte aumento do consumo de energia no Brasil nos últimos anos e a previsão de aumento para os próximos anos, a busca por fontes alternativas de geração de eletricidade está se tornando cada vez mais necessário (EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA, 2021). Fatores ambientais, em especial a preocupação com o efeito estufa, têm impulsionado discussões sobre a mitigação da emissão de gases e a necessidade de tecnologias capazes de explorar os recursos naturais em sua plenitude de forma sustentável.

As condições geográficas, clima e extensão territorial do Brasil são favoráveis e, combinadas com uma grande quantidade de terra arável e condições adequadas de solo e clima, proporciona ao país um diferencial competitivo para assumir o protagonismo na produção e consumo de biomassa para diversos fins, entre eles, o energético. No Brasil, em 2018, a energia gerada a partir da biomassa representou mais de 9% de toda a energia do país (IBGE, 2018).

Entre os biocombustíveis, o biogás, uma mistura predominantemente de gases metano e dióxido de carbono, com traços de ácido sulfídrico, água e siloxanos, é gerado naturalmente a partir de digestão ou fermentação anaeróbia de materiais biodegradáveis (LIGUORI; AMORE; FARACO, 2013). Se por um lado, o biogás

contém em sua composição dois dos gases de efeito estufa, um deles, o metano, por outro, possui potencial energético e quando canalizado e purificado, pode atender desde a demanda energética domiciliar em substituição ao gás de cozinha, até prover energia elétrica para parte de um município (CIBIOGÁS, 2020).

Dessa forma, a implantação e difusão de tecnologias associadas ao biogás pode ser uma fonte renovável de energia para pequenos a grandes usuários (sejam eles rurais ou urbanos), contribuir para a redução da emissão do gás metano para a atmosfera e agregar valor aos resíduos agroindustriais.

Anualmente o país gera uma grande quantidade de resíduos agroindustriais distribuídos por todo o território nacional. O Brasil tem um quantitativo de resíduos produzidos pelo setor agroindustrial de 967.005.044 (mil ton/ano), a identificação, o mapeamento, a caracterização e a quantificação desses resíduos podem indicar as regiões com maior potencial de geração de biogás e, conseqüentemente, energia renovável no país (OLIVEIRA, 2022).

Segundo a Empresa de Pesquisa Energética (2017), em 2015, os resíduos provenientes da indústria de alimentos e bebidas foram responsáveis por 25% do biogás produzido no país. Isso destaca a significativa contribuição desse setor para a produção de energia renovável, evidenciando o potencial dos resíduos agroindustriais como uma fonte valiosa de biogás. A utilização desses resíduos não apenas auxilia na gestão de resíduos, mas também promove a geração de energia sustentável. A partir disso, este estudo busca responder a seguinte pergunta problema: qual é o potencial de geração de energia a partir de resíduos agroindustriais selecionados, para os estados brasileiros?

1.1 OBJETIVO GERAL

Diante do contexto brasileiro, aliado as demandas globais por matrizes energéticas sustentáveis, este trabalho tem como objetivo realizar uma análise geoespacial do território brasileiro, afim de apresentar um panorama geral do potencial de geração de energia, através dos resíduos agroindustriais selecionados, para os estados brasileiros.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Identificar as culturas de maior representatividade no Brasil com potencial gerador de resíduos agroindustriais e energia.
- Calcular uma estimativa da quantidade de resíduos agroindustriais gerados, bem como seus potenciais para geração de energia.
- Construir um panorama geral com a distribuição geográfica estadual do potencial de resíduos agroindustriais em forma de mapas coropléticos.

1.3 CONTEXTUALIZAÇÃO E JUSTIFICATIVA

A agroindústria desempenha um papel crucial na economia e na produção de alimentos, gerando, por consequência, uma quantidade significativa de resíduos orgânicos. A busca por soluções sustentáveis para o gerenciamento desses resíduos tornou-se uma necessidade imperativa, especialmente diante dos desafios ambientais e energéticos que o mundo enfrenta atualmente (FILHO; FRANCO, 2015).

Os resíduos agroindustriais representam uma fonte substancial de biomassa que, se adequadamente tratada, possui um potencial considerável para a produção de biogás, uma forma de energia renovável e ambientalmente amigável. Esta pesquisa é justificada pela relevância crescente da utilização de fontes renováveis de energia e pela necessidade de reduzir o impacto ambiental causado pelos resíduos gerados na indústria agroindustrial.

Por meio da análise do potencial de geração de biogás a partir desses resíduos, busca-se contribuir para o conhecimento sobre alternativas sustentáveis de tratamento de resíduos, bem como para a promoção de práticas mais eficientes e amigáveis ao meio ambiente dentro do setor agroindustrial. Além disso, esta pesquisa pode fornecer subsídios importantes para políticas públicas e estratégias voltadas para o desenvolvimento de fontes de energia renovável no Brasil.

Portanto, este estudo também visa promover uma abordagem sustentável na gestão de resíduos agroindustriais, ao mesmo tempo em que explora novas oportunidades para a produção de energia limpa e renovável, alinhada com as demandas atuais por práticas mais sustentáveis e eficientes no setor agroindustrial.

2 REFERENCIAL TEÓRICO E REVISÃO DE LITERATURA

2.1 O CONCEITO DE BIOMASSA

Antes de iniciar a discussão, primeiro, é necessário estabelecer alguns conceitos sobre a biomassa e os resíduos agroindustriais. A biomassa refere-se à matéria orgânica de origem vegetal ou animal que pode ser utilizada como fonte de energia. Essa matéria pode estar disponível na natureza, como florestas, plantas, resíduos agrícolas/agroindustriais e até mesmo algas, representando a biomassa natural. Também é formada por resíduos gerados a partir de atividades humanas, como resíduos agrícolas, de alimentos, de madeira e urbanos, constituindo a biomassa residual (MUNIZ, 2002). Portanto, a diferença entre biomassa e resíduos agroindustriais está na origem e abrangência desses materiais.

A biomassa é um termo mais amplo, englobando toda e qualquer matéria orgânica de origem vegetal ou animal que pode ser utilizada como fonte de energia, incluindo materiais naturais, como madeira, plantas e resíduos urbanos. Já os resíduos agroindustriais são uma subcategoria da biomassa, sendo originados especificamente das atividades agroindustriais, ou seja, dos processos de produção, beneficiamento e transformação de produtos agrícolas e pecuários (GAETE; TEODORO; MARTINAZZO, 2020). Os resíduos agroindustriais são uma parcela específica da biomassa, relacionada diretamente às atividades industriais ligadas à agricultura, representando uma importante fonte de material orgânico para aplicações como a produção de biogás.

A produção de biogás está intrinsecamente ligada ao aproveitamento de resíduos orgânicos provenientes de diversas fontes, incluindo resíduos agrícolas/agroindustriais, resíduos de alimentos e efluentes pecuários. Essa matéria orgânica, muitas vezes, vista como um problema ambiental, torna-se um recurso valioso no processo de geração de biogás (SOUSA; RIZZATTO, 2022).

No âmbito da produção, técnicas como a digestão anaeróbica têm se destacado como métodos eficazes para transformar resíduos orgânicos em biogás. Esse processo não apenas proporciona uma fonte de energia renovável, mas também resulta em subprodutos úteis, como biofertilizantes, contribuindo para práticas agrícolas mais sustentáveis (HASAN et al., 2019). A aplicação do biogás abrange

diversas áreas, desde a geração de eletricidade e calor até o abastecimento de veículos. A versatilidade do biogás destaca seu potencial como componente crucial na transição para uma matriz energética mais limpa e sustentável.

2.2 BIOENERGIA

A bioenergia, conforme descrita por Demirbaş (2009), é uma forma de energia renovável derivada da biomassa, que inclui materiais orgânicos de origem vegetal e animal. Este conceito engloba todas as formas de biomassa e biocombustíveis utilizados para a produção de energia em escala comercial, seja para a indústria, geração de eletricidade ou como combustíveis para transporte. A bioenergia é particularmente significativa nos países em desenvolvimento, onde a biomassa é uma das fontes mais comuns de energia, devido à sua abundância e disponibilidade local (DEMIRBAS, 2009).

A produção de bioenergia envolve a conversão de biomassa em formas utilizáveis de energia, como calor, eletricidade ou combustíveis líquidos, através de processos como combustão direta, fermentação, gaseificação e pirólise. As tecnologias de gaseificação de biomassa oferecem a oportunidade de converter materiais de biomassa renováveis em gases combustíveis limpos ou gases de síntese. Esses produtos gasosos podem ser queimados para gerar calor ou eletricidade. Além de ser uma alternativa às fontes de energia fóssil, a bioenergia desempenha um papel crucial na redução das emissões de gases de efeito estufa, contribuindo para a mitigação das mudanças climáticas (DEMIRBAS, 2009).

A abrangência do conceito de bioenergia inclui não apenas a produção de energia, mas também o impacto ambiental e econômico de seu uso. A utilização de fontes de biomassa promove o desenvolvimento sustentável, especialmente em áreas rurais, onde pode gerar empregos e estimular a economia local. Além disso, a transição para a bioenergia está alinhada com os esforços globais para aumentar o uso de fontes de energia renovável, reduzindo a dependência de combustíveis fósseis e promovendo uma economia de baixo carbono (DEMIRBAS, 2009).

Em outras palavras, a bioenergia representa uma estratégia essencial para enfrentar os desafios energéticos e ambientais do século XXI, oferecendo uma fonte

de energia renovável, sustentável e acessível, com potencial para transformar a matriz energética global (DEMIRBAS, 2009).

2.3 PODER CALORÍFICO DA BIOMASSA RESIDUAL

O poder calorífico, também conhecido como valor calorífico, é uma medida da quantidade de energia liberada na forma de calor quando uma substância é completamente queimada. Ele é uma característica fundamental para combustíveis, uma vez que determina quanta energia pode ser obtida a partir de uma quantidade específica de combustível. O poder calorífico pode ser subdividido de duas formas: poder calorífico superior (PCS) e poder calorífico inferior (PCI), podendo ser expresso em diferentes unidades, como joules (J/g), quilocalorias por quilograma (kcal/kg) e megajoules por quilograma (MJ/kg) (PEREIRA, 2018).

O PCS é a quantidade total de calor liberada durante a combustão completa de uma quantidade específica de combustível, incluindo a energia contida no vapor d'água produzido durante a combustão. Em outras palavras, no PCS, a água formada durante a combustão é considerada na fase líquida. Isso implica que o calor de condensação do vapor d'água está incluído no cálculo (COSTA et al., 2009).

O PCI, por outro lado, é a quantidade de calor liberada durante a combustão completa de uma quantidade específica de combustível, excluindo a energia contida no vapor d'água produzido. Aqui, considera-se que o vapor d'água permanece na fase gasosa, e, portanto, o calor de condensação do vapor d'água não é incluído no cálculo (COSTA et al., 2009).

Os diferentes e variados tipos de resíduos de biomassa podem apresentar características diferentes, por exemplo, sua densidade energética, variabilidade, composição e poder calorífico, podendo influenciar na manipulação e combustão do resíduo em questão (YOSHIKAWA et al., 2009).

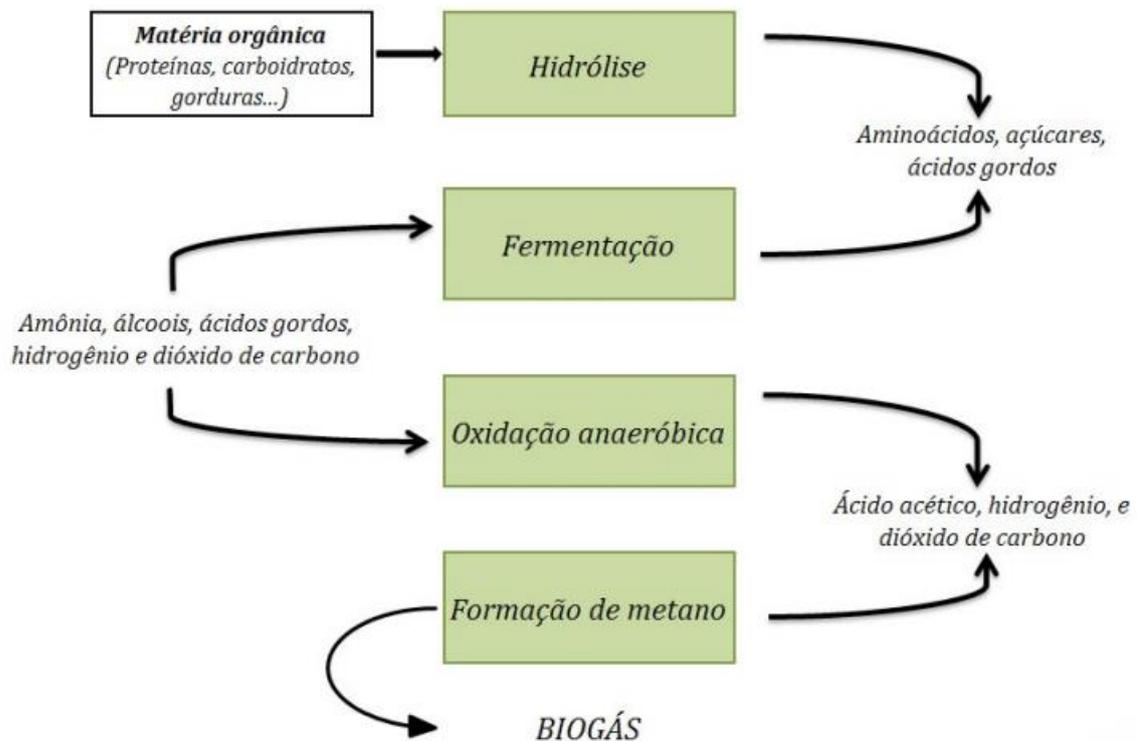
A composição química pode variar significativamente entre diferentes tipos de resíduos agrícolas/agroindustriais, fato este que pode influenciar diretamente no poder calorífico inferior (PCI) e superior (PCS). Por exemplo, resíduos com maior teor de lignina tendem a ter maior poder calorífico (GABRIELA, 2019).

2.4 PRODUÇÃO DE BIOGÁS

A produção de biogás é um processo complexo, seu principal método de produção é o que envolve a fermentação anaeróbica de resíduos orgânicos. Inicia-se com a preparação da matéria-prima, composta por resíduos agrícolas/agroindustriais, alimentos, e esterco animal, sendo essencial a escolha criteriosa dos substratos. Os resíduos passam por uma etapa de recepção e, quando necessário, são separados para garantir uma mistura homogênea. O coração do processo é a digestão anaeróbica, a quebra da matéria orgânica em um ambiente anóxico, realizada em biodigestores fechados, nos quais os micro-organismos anaeróbicos convertem compostos orgânicos complexos em gases, principalmente metano e dióxido de carbono (MILANEZ et al., 2018).

Na figura abaixo está a representação esquemática do processo de digestão anaeróbica, ou seja, o processo de formação do biogás (Figura 1).

Figura 1 - Representação esquemática das etapas da digestão anaeróbica



Fonte: Manual Básico de biogás (2014).

Segundo o Manual Básico de biogás (2014), na fase de hidrólise, as moléculas complexas presentes nos resíduos orgânicos são quebradas em moléculas menores por enzimas. Essas enzimas são produzidas por uma variedade de microrganismos presentes no substrato. A hidrólise converte materiais complexos, como amido e celulose, em açúcares simples, preparando-os para as etapas subsequentes.

Após a hidrólise, os açúcares e outros compostos orgânicos simples resultantes entram na fase de fermentação. Aqui, diferentes grupos de bactérias anaeróbicas convertem esses compostos em ácidos orgânicos, álcoois e outros subprodutos. Esse processo libera energia e prepara os substratos para as etapas finais (KARLSSON et al., 2014).

Os ácidos orgânicos formados durante a fermentação passam por um processo de oxidação anaeróbica. Bactérias oxidativas convertem esses ácidos em compostos intermediários, como ácidos graxos e hidrogênio. Essa etapa é essencial para fornecer os substratos adequados para a próxima fase (KARLSSON et al., 2014).

Na etapa final, bactérias metanogênicas convertem os intermediários, especialmente o hidrogênio e o dióxido de carbono, em metano (CH_4) e dióxido de carbono (CO_2). Esse processo é conhecido como metanogênese. O metano é o componente principal do biogás, representando a fonte de energia renovável resultante do processo anaeróbico (KARLSSON et al., 2014).

2.5 BIODIGESTORES E IMPLEMENTAÇÃO

O biodigestor constitui-se de uma estrutura física, denominada câmara, onde ocorre o processo de decomposição da matéria orgânica. Essa câmara pode adotar uma forma cilíndrica, vertical e situar-se acima do solo. Acompanhando essa estrutura, há um componente chamado gasômetro, uma campânula que acumula o biogás gerado durante a digestão da biomassa (MENDONÇA PINTO; CABELLO, 2011).

A definição dos biodigestores anaeróbios destaca-os como câmaras fechadas, onde substratos orgânicos são inseridos para degradação na ausência de oxigênio molecular. O resultado desse processo é a produção de biogás, composto

principalmente por metano, e um efluente enriquecido em nutrientes (SALES FILHO, 2014).

Os conceitos convergem na ideia de que o biodigestor é uma estrutura fechada onde ocorre a decomposição anaeróbica da matéria orgânica, dando origem ao biogás e a um efluente com alto teor de nutrientes. O componente essencial, o gasômetro, é mencionado como responsável por acumular o biogás gerado durante a digestão da biomassa (DE AZEVEDO FRIGO et al., 2015). Contudo, é interessante pontuar que existem diferentes tipos de biodigestores, para diferentes necessidades e objetivos, neste trabalho foram abordados os modelos mais difundidos, são eles; o modelo indiano, chinês, canadense e de batelada.

A implementação de biodigestores pode variar consideravelmente em termos de custos, dependendo do tipo de tecnologia, dos materiais de construção, da escala do projeto e dos resíduos utilizados. Mas para ter uma base, segundo consultas realizadas a literatura disponível, o biodigestor indiano tem custo inicial baixo, variando de R\$ 5.065,70 (20 m³) a R\$ 14.178,60 (120 m³), utilizando materiais locais de alvenaria. O modelo chinês, feito de concreto, tem custo um pouco menor, variando de R\$ 4.052,50 (20 m³) a R\$ 12.426,00 (120 m³), porém sua durabilidade compensa a longo prazo. Já o modelo canadense, com tecnologias mais avançadas, apresentou o menor custo inicial, variando de R\$ 2.104,00 (20 m³) a R\$ 7.266,00 (120 m³), oferecendo maior eficiência tecnológica (CALZA et al., 2015). O biodigestor de batelada, por sua vez, tem um custo intermediário e se caracteriza por sua simplicidade operacional, porém requer mais mão de obra para alimentação e esvaziamento, o que pode aumentar os custos de operação (THANGARAJ et al., 2022).

Além do tipo de biodigestor, os custos variam de acordo com os resíduos utilizados. Resíduos agrícolas e dejetos animais são mais abundantes e, em geral, de baixo custo, o que favorece a viabilidade econômica dos biodigestores. No entanto, resíduos mais complexos, como efluentes industriais, podem demandar um tratamento prévio, elevando os custos de operação e implementação do sistema (MCKENDRY, 2019).

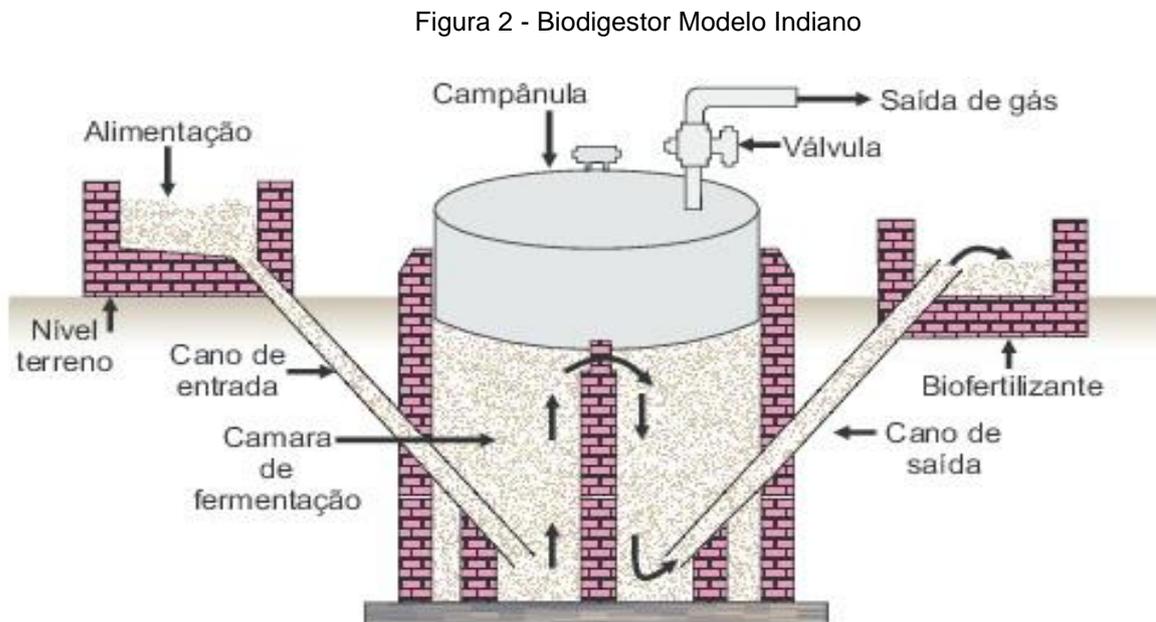
Essas variações mostram que a escolha do tipo de biodigestor e dos resíduos utilizados deve considerar tanto o contexto local quanto o balanço entre custo inicial, manutenção e durabilidade do sistema.

2.5.1 BIODIGESTOR MODELO INDIANO

O Biodigestor Indiano, conhecido como "Biodigestor Deenbandhu", é um modelo projetado para atender às necessidades de pequenas propriedades rurais. Caracterizado por um design simples, utiliza materiais locais como tijolos e argamassa na sua construção, visando a acessibilidade de construção para comunidades rurais. Sua estrutura cilíndrica, geralmente localizada acima do solo, facilita a carga de resíduos orgânicos e simplifica a manutenção (TARRENTO, 2006).

Operando em fluxo contínuo, o Biodigestor Indiano é eficaz na digestão de esterco animal e resíduos agrícolas/agroindustriais, transformando esses materiais em biogás e fertilizantes valiosos. Essa versatilidade torna-o indicado para pequenas propriedades rurais, onde a disponibilidade desses resíduos é significativa. Além disso, o modelo é uma opção viável para comunidades de baixa renda, proporcionando uma solução acessível para aproveitar resíduos na produção de biogás (ARAÚJO JORGE; OMENA, 2012).

A Figura 2, traz uma representação ilustrativa do Biodigestor Modelo Indiano, bem como seu processo de funcionamento.



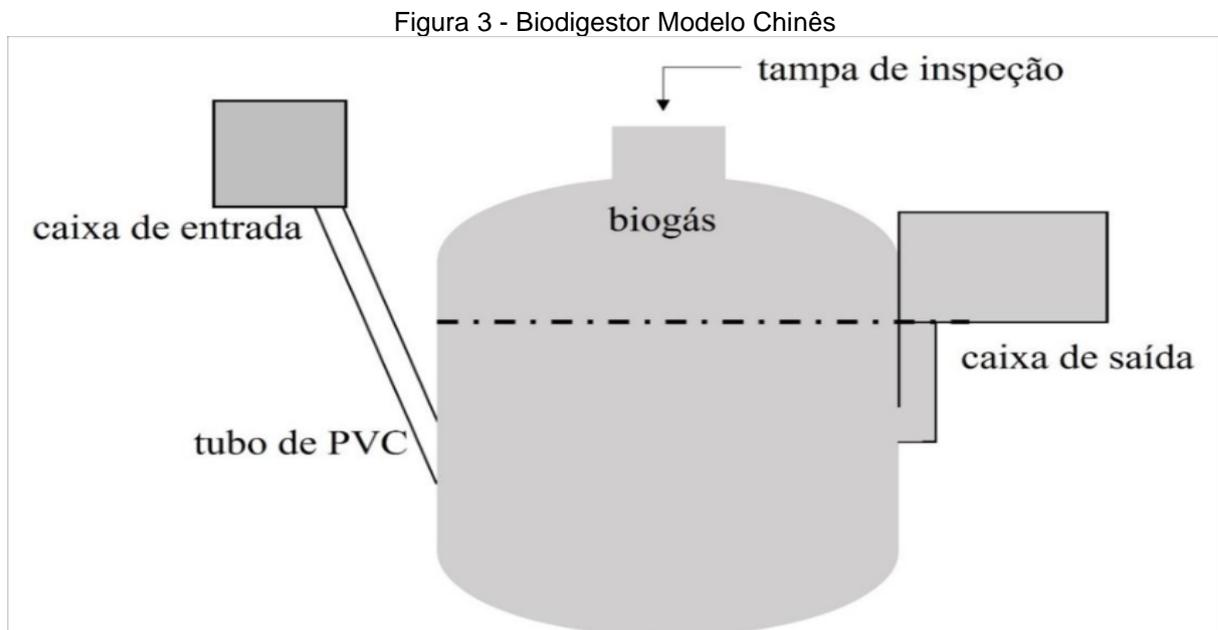
Fonte: Lucas Junior (1987).

2.5.2 BIODIGESTOR MODELO CHINÊS

O Biodigestor Chinês foi especificamente desenvolvido para atender às demandas de pequenas propriedades rurais. Este modelo é uma estrutura única, predominantemente construída com alvenaria e enterrada no solo. Sua construção tem um custo relativamente baixo, principalmente devido ao fato de que até mesmo o gasômetro é fabricado com materiais de alvenaria (ANDRADE et al., 2012).

A configuração desse biodigestor consiste em uma câmara cilíndrica de alvenaria, com um teto abobadado destinado ao armazenamento do biogás. É crucial que o teto seja impermeável e vedado com eficácia para prevenir rachaduras em sua cúpula, o que poderia resultar na perda de gás. Além disso, inclui uma caixa de entrada para a biomassa e uma caixa de saída parcialmente enterrada no solo (ARAÚJO JORGE; OMENA, 2012).

Logo abaixo, na Figura 3, encontra-se uma representação ilustrativa do biodigestor de Modelo Chinês.



Fonte: (DEGANUTTI et al., 2002).

2.5.3 BIODIGESTOR MODELO CANADENSE

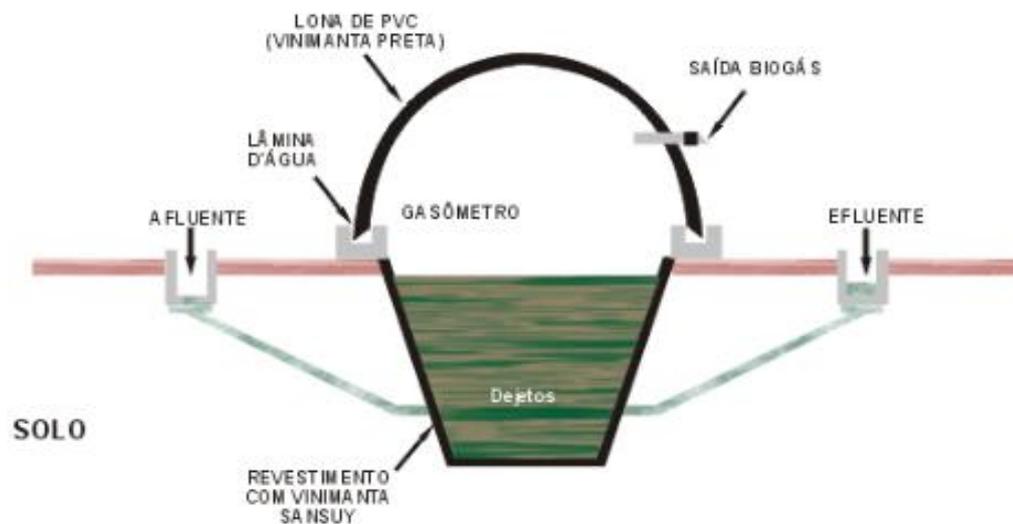
O Biodigestor Canadense se diferencia por sua disposição horizontal, caracterizada por uma caixa de carga construída em alvenaria, com uma largura superior à profundidade. Essa característica aumenta a exposição à luz solar,

resultando em uma produção significativa de biogás e evitando possíveis obstruções (CASTANHO & HARRUDA, 2008). Este modelo de biodigestor é amplamente utilizado no Brasil devido à sua flexibilidade, sendo vantajoso tanto para pequenas quanto para grandes propriedades, além de ser aplicável em projetos agroindustriais (OLIVER, 2008).

O sistema é composto por uma câmara de fermentação subterrânea revestida por lona plástica, formando uma estrutura para a contenção do biogás em uma espécie de campânula de armazenamento. Adicionalmente, uma manta superior é projetada para reter o biogás gerado. A liberação do efluente ocorre através de uma caixa de saída. O sistema possui um registro destinado à saída do biogás, podendo ser conectado a um queimador (PEREIRA et al., 2009).

A figura 4, que se encontra logo abaixo, detalha processo de funcionamento do Biodigestor Modelo Canadense.

Figura 4 - Biodigestor Modelo Canadense



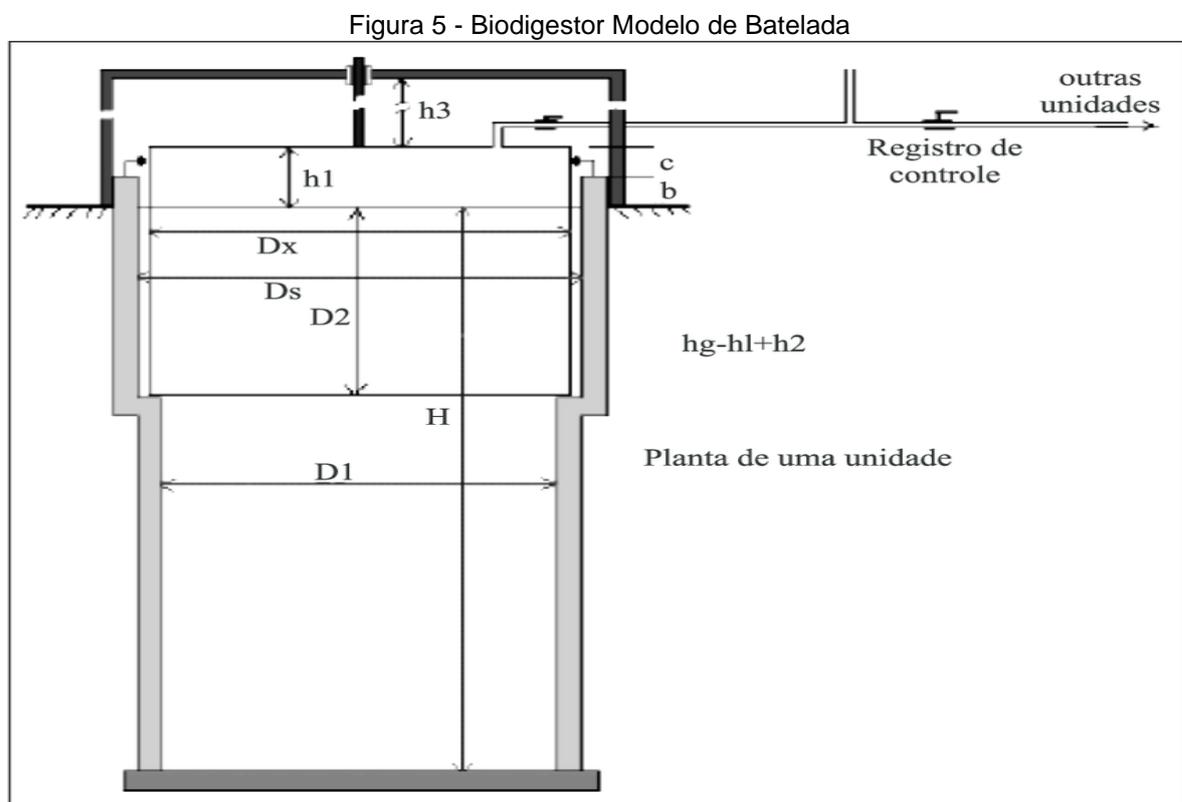
Fonte:(DEGANUTTI et al., 2002).

2.5.4 BIODIGESTOR MODELO BATELADA

O biodigestor de batelada opera em ciclos, nos quais os resíduos orgânicos são adicionados de uma só vez. Esse sistema é projetado para facilitar o controle do processo de decomposição, permitindo uma gestão mais precisa da carga de

substratos. Após a adição dos resíduos, o biodigestor é selado, e o processo anaeróbico se inicia, convertendo a biomassa em biogás. Para implementar a instalação, é possível utilizar tanto um único reator anaeróbico quanto vários tanques conectados em sequência. Então, por exemplo, em granjas avícolas de corte, onde a produção de resíduos pode ocorrer em lotes ou em períodos específicos, o biodigestor em batelada oferece vantagens notáveis (ARAÚJO JORGE; OMENA, 2012).

A Figura 5, localizada abaixo, mostra representação ilustrativa do biodigestor modelo de batelada.



2.6 APLICAÇÕES E USO DE BIOGÁS

As aplicações destacam a versatilidade do biogás como uma fonte de energia renovável e sua contribuição significativa para práticas mais sustentáveis em diferentes setores, desde a geração de eletricidade até o enriquecimento do solo agrícola. As principais aplicações comerciais no uso do biogás são: produção de energia elétrica; energia térmica; a fabricação de biometano (para a substituição do

gás natural, sobretudo o veicular); e, por fim, a utilização dos resíduos como fertilizantes (MILANEZ et al., 2018).

A produção de energia elétrica a partir do biogás começa com a coleta de resíduos orgânicos, como os provenientes da indústria. Esses resíduos são colocados em biodigestores, onde são decompostos por microrganismos na ausência de oxigênio, produzindo biogás. O biogás é composto principalmente de metano, que é o componente responsável pela geração de energia. Em um processo controlado, o metano é queimado em motogeradores, que são dispositivos projetados para converter a energia térmica liberada pela combustão em energia mecânica. Essa energia mecânica é então convertida em eletricidade através de um gerador elétrico acoplado ao motogerador. O biogás é uma fonte versátil para a geração de eletricidade, sendo especialmente útil em locais remotos ou em pequenas instalações, onde pode fornecer uma fonte de energia sustentável e reduzir a dependência de combustíveis fósseis (MILANEZ et al., 2018).

Já a utilização do biogás para produção de energia térmica ocorre pela queima direta do gás para gerar calor, pode ser utilizado em caldeiras e aquecedores. Isso é comum em pequenas e médias propriedades rurais, onde o calor gerado pode ser utilizado em processos como aquecimento de ambientes, secagem de grãos, produção de vapor em processos industriais ou até mesmo em sistemas de aquecimento de água para uso doméstico. Este modo de aplicação do biogás tem origem predominantemente agropecuária, possui um caráter fortemente artesanal (MILANEZ et al., 2018).

A produção de biometano ocorre através da purificação do biogás, que envolve a remoção do dióxido de carbono (CO_2) e de outros contaminantes, vapor de água e compostos orgânicos voláteis. Esse processo, conhecido como upgrading, utiliza tecnologias como membranas, absorção química, adsorção por pressão ou lavagem com água, resultando em um combustível com composição e propriedades semelhantes às do gás natural. O biometano obtido pode ser usado como uma alternativa renovável e sustentável ao gás natural veicular (GNV), oferecendo uma solução viável para o abastecimento de veículos movidos a gás. Além de proporcionar uma fonte de energia mais limpa, sua aplicação no setor de transporte contribui significativamente para a redução das emissões de gases de efeito estufa. (MILANEZ et al., 2018).

Por fim, a utilização dos resíduos gerados durante a produção de biogás, chamado de digestato, como fertilizantes é uma prática amplamente adotada e sustentável. O digestato é uma substância rica em nutrientes essenciais, como nitrogênio, fósforo e potássio, fundamentais para o desenvolvimento das plantas. Quando aplicado em áreas agrícolas, esse subproduto da biodigestão não apenas melhora a fertilidade do solo, mas também contribui para a redução da dependência de fertilizantes químicos convencionais. Dessa forma, promove práticas agrícolas mais sustentáveis (MILANEZ et al., 2018).

2.7 SUSTENTABILIDADE E MEIO AMBIENTE

A produção de biogás a partir de resíduos agroindustriais oferece uma série de benefícios ambientais significativos, contribuindo para a promoção da sustentabilidade e a redução do impacto ambiental associado às atividades agroindustriais. Esses benefícios abrangem várias áreas-chave, destacando o papel crucial do biogás como fonte de energia renovável e solução para a gestão responsável de resíduos (MILANEZ et al., 2018).

A decomposição anaeróbica dos resíduos agroindustriais em aterros sanitários pode resultar na liberação de metano, um potente gás de efeito estufa. A produção de biogás captura esse metano, convertendo-o em uma fonte de energia, e reduz as emissões líquidas de gases de efeito estufa, contribuindo para a mitigação das mudanças climáticas (MILANEZ et al., 2018). Muitos resíduos agroindustriais são ricos em matéria orgânica. A utilização desses resíduos para a produção de biogás não apenas evita a sua disposição inadequada, mas também transforma esses materiais em uma fonte valiosa de energia, promovendo a economia circular. Isso representa uma forma eficaz de gestão de resíduos (VAZ JÚNIOR, 2020).

A produção de biogás diversifica a matriz energética, reduzindo a dependência de fontes não renováveis, como os combustíveis fósseis. Essa diversificação contribui para a segurança energética e ajuda a atender às crescentes demandas por energia de maneira mais sustentável (CARDOSO, SOUZA & SILVA, 2019).

O biogás pode ser utilizado como combustível para a geração de eletricidade, aquecimento e até mesmo como biometano para substituir o gás natural veicular. Essa

substituição reduz a dependência de combustíveis fósseis, promovendo uma transição para fontes mais limpas e renováveis (MILANEZ et al., 2018).

A utilização dos resíduos agroindustriais na produção de biogás resulta na produção de um digestato, um subproduto rico em nutrientes. Esse digestato pode ser utilizado como fertilizante, contribuindo para melhorar a qualidade do solo e promover práticas agrícolas sustentáveis (MILANEZ et al., 2018).

A produção de biogás a partir de resíduos agroindustriais, portanto, não apenas fornece uma fonte de energia renovável, mas também desempenha um papel fundamental na promoção da sustentabilidade ambiental, integrando práticas mais responsáveis nas operações agroindustriais. Essa abordagem contribui para a construção de um modelo mais equilibrado e sustentável para a produção de energia e gestão de resíduos (MILANEZ et al., 2018).

2.8 BIOECONOMIA

A bioeconomia é um conceito que se refere a uma economia que utiliza recursos biológicos renováveis de forma sustentável para produzir alimentos, energia, produtos e serviços. O objetivo central da bioeconomia é promover o desenvolvimento econômico e social enquanto se reduz a dependência de recursos não renováveis e se minimiza o impacto ambiental. Ela busca integrar práticas sustentáveis e inovadoras, utilizando recursos naturais de forma eficiente para promover o desenvolvimento econômico, social e ambiental compatível com as possibilidades (MEJIAS, 2019).

A bioeconomia tem uma forte ligação com a utilização de biomassa para a geração de energia, um aspecto central para a transição para uma economia mais sustentável e menos dependente de combustíveis fósseis. A biomassa, no âmbito dos resíduos agrícolas/agroindustriais, pode ser convertida em diversas formas de energia, como já explicado. Essas práticas não apenas aproveitam os resíduos, mas também permitem a produção descentralizada de energia (BANERJEE, 2023).

Apesar de apresentar as definições acima, a bioeconomia não possui, na literatura, um conceito bem definido, por isso existem diferentes interpretações acerca do tema. Um bom exemplo disto, é o conceito de bioeconomia Tipo III que representa uma evolução significativa na abordagem sustentável, promovida pela Comissão Europeia, ao focar em uma economia de carbono renovável baseada na biorrefinaria.

Diferente de outros modelos, a bioeconomia Tipo III busca integrar todos os tipos de recursos biológicos no processo de transformação de biomassa, reconhecendo que o mesmo produto pode ser fabricado a partir de diversas matérias-primas e tecnologias. Essa flexibilidade cria uma tripla competição entre as matérias-primas utilizadas, os processos de produção e os produtos finais, gerando incertezas e exigindo estratégias inovadoras das empresas. Enquanto algumas optam por soluções de substituição de baixo valor, outras exploram abordagens inovadoras que agregam novas funções, como biodegradabilidade e maior durabilidade. Além disso, a necessidade de recombinar diferentes conhecimentos destaca a bioeconomia Tipo III, que tem sua definição fundamental embasada na economia da biomassa, como uma economia de aprendizagem, onde a criação de novos saberes e a experimentação em plantas piloto e de demonstração são fundamentais para seu desenvolvimento (VIVIEN et al., 2019).

Além do conceito III, que traz uma abordagem mais voltada para biomassa, temática principal do trabalho, também existem os conceitos de bioeconomia tipo I e II, que compõe as explicações acerca da bioeconomia.

A bioeconomia tipo I tem raízes no conceito de "bioeconomics" desenvolvido por Nicholas Georgescu-Roegen nos anos 1970 e 1980. Ela é vista como uma economia ecológica que reconhece os limites materiais e energéticos do crescimento econômico. Ela enfatiza a necessidade de respeitar os limites da biosfera e adota uma abordagem de "forte sustentabilidade". Nesse modelo, a economia deve funcionar em harmonia com a biologia e a ecologia, priorizando o uso prudente de recursos e evitando o crescimento ilimitado, focando em programas de decrescimento para uma transição sustentável (VIVIEN et al., 2019).

Já a bioeconomia tipo II apresenta uma abordagem que está centrada na biotecnologia como o principal motor da bioeconomia. Surgiu durante as décadas de 1990 e 2000 e se baseia na revolução biotecnológica, que inclui a manipulação genética e outras inovações tecnológicas. A bioeconomia tipo II vê a biotecnologia como um instrumento para resolver problemas de sustentabilidade e aumentar a produtividade. Ela está fortemente associada à "economia baseada no conhecimento", promovida por organizações como a OCDE, e é impulsionada por uma visão de "crescimento verde" por meio de avanços científicos e tecnológicos (VIVIEN et al., 2019).

Esses dois tipos apresentam visões contrastantes sobre como a economia deve interagir com o ambiente natural, com a bioeconomia tipo II focada em limites ecológicos e a bioeconomia tipo III focada em inovação tecnológica e crescimento.

3 METODOLOGIA

3.1 DADOS

Para esta análise, foram escolhidas seis culturas, que possuem maior representatividade no território brasileiro. O critério de seleção baseou-se no quesito de maior quantidade produzida em toneladas. Os dados foram obtidos a partir do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), através do Sistema IBGE de Recuperação Automática (SIDRA), estes que são os dados mais completos e atuais disponíveis, a safra de 2022 foi utilizada para realizar a análise.

A Tabela 1 resume as informações das culturas selecionadas, os devidos resíduos agroindustriais de cada uma das culturas que foram selecionados para a análise, assim como os demais dados das presentes culturas. Cabe salientar que existem, outros tipos de resíduos agroindustriais que podem ser gerados no processamento das culturas, dependendo do processo produtivo, como também há resíduos que ficam no campo, como a palha do milho, por exemplo. Na literatura, há diversos trabalhos que calculam o potencial de geração de energia, com diferentes formas de considerar os resíduos gerados da produção agrícola e agroindustriais como em Ferreira (2020) e em Schneider et al. (2012).

Tabela 1 - Culturas, coeficientes técnicos de conversão utilizados e PCI

Cultura	Quantidade produzida em toneladas (safra 2022)	Resíduo Industrial	Coeficiente técnico (ton resíduo/ton Produto)	PCI dos resíduos (kcal/kg)
Cana-de-açúcar	724.428.135 ¹	Bagaço	0,27 ³	3.855 ²
Soja (grão)	120.701.031 ¹	Cascas	0,08 ⁴	3.300 ⁶
Milho (grão)	109.420.717 ¹	Sabugo	0,60 ³	4.201 ²
Mandioca	17.648.564 ¹	Cascas	0,15 ⁷	3.248 ⁵
Laranja	16.929.631 ¹	Cascas	0,50 ³	3.807 ⁵
Arroz	10.776.268 ¹	Cascas	0,22 ³	3.200 ²

Fonte: elaborada pelo autor a partir de ¹IBGE(2024); ²FERREIRA(2020); ³NONES(2014); ⁴MORAIS(2020); ⁵BARROS(2012); ⁶CAMPOS(2016); ⁷COSTA et al.(2023).

Para estimar o montante de resíduos, foram utilizados coeficientes técnicos para cada resíduo, encontrados na literatura. Esse coeficiente representa a porcentagem da biomassa total correspondente aos resíduos gerados durante o processamento dos produtos agrícolas. A aplicação desse coeficiente técnico à

parcela da produção das culturas processadas na agroindústria, obtida por meio de consultas à literatura, o que permitiu estimar o montante de resíduos gerados. Já o PCI (poder calorífico inferior) foi encontrado em buscas feitas na literatura disponível.

3.2 MÉTODOS

Para determinar o potencial teórico energético dos resíduos agroindustriais foi utilizada a Equação 1, que foi retirada de Ferreira (2020).

$$Pot = (P * R) * PCI * 1000 \quad (1)$$

onde:

Pot = Potencial energético gerado a partir de resíduos agroindustriais (Joule);

P = Produção total da cultura com resíduo;

R = Coeficiente técnico (tonelada de resíduos/tonelada de produção);

PCI = Poder calorífico Inferior (KJ/Kg);

1000 = Fator de conversão (toneladas para quilogramas).

Na etapa de geoprocessamento, utilizou-se o software QGIS¹, um Sistema de Informação Geográfica, para criar mapas municipais representando as estimativas de resíduos gerados por cada cultura. Esses mapas seguem uma regra de crescimento gradual de cores, onde tonalidades mais intensas indicam maior produção (em toneladas), enquanto cores mais suaves representam menor produção. O QGIS desempenhou papel crucial, permitindo a visualização, edição e análise de dados georreferenciados.

O procedimento para gerar esses mapas seguiu uma ordem cronológica. Inicialmente, os dados específicos de cada cultura foram baixados do SIDRA - IBGE. Posteriormente, a planilha contendo esses dados foi preparada, aplicando o coeficiente técnico sobre as quantidades produzidas por cada estado. A planilha já com todos os dados preparados foi incorporada ao QGIS, possibilitando a representação geoespacial das estimativas de resíduos agroindustriais.

¹QGIS é um software livre e gratuito com código-fonte aberto, multiplataforma de sistema de informação geográfica que permite a visualização, edição e análise de dados georreferenciados. Software homologado pela Universidade de Brasília.

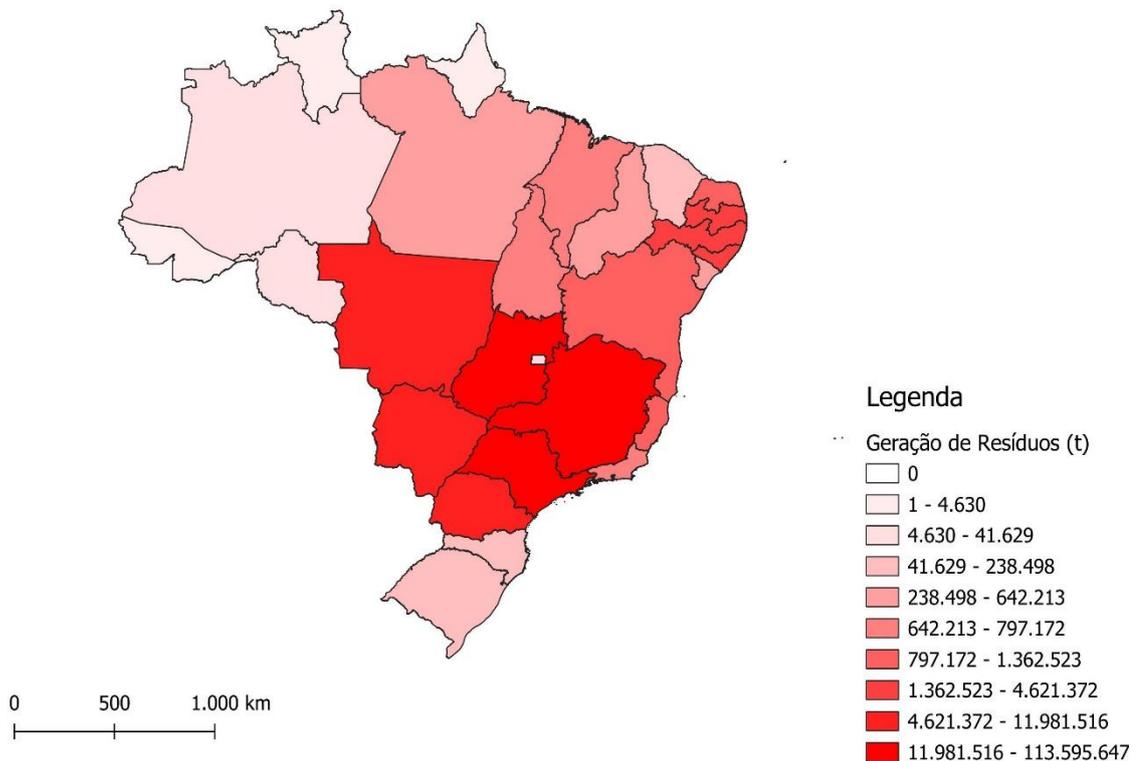
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A seção que segue apresenta os principais resultados da geração de energia elétrica a partir de resíduos agroindustriais, estimados através da Equação 1, utilizando os dados da Tabela 1, por culturas produzidas nos estados brasileiros.

Cana-de-açúcar

A análise da geração potencial de resíduos de cana-de-açúcar e seu potencial energético revela importantes *insights* sobre a distribuição espacial e as oportunidades para aproveitamento energético no Brasil. A Figura 6, localizada abaixo, mostra a distribuição geográfica, em âmbito estadual, da geração dos resíduos industriais da cana-de-açúcar.

Figura 6 - Mapa coroplético da concentração de resíduos industriais da cana-de-açúcar (bagaço)



Fonte: Elaborado pelo autor a partir de dados do trabalho.

Analisando os dados de potencial de geração de resíduos, observamos uma significativa variação entre os estados. O mapa da concentração de geração de resíduos de cana-de-açúcar indica uma clara concentração nas regiões centro-oeste

e sudeste. O estado de São Paulo destaca-se como o maior gerador de resíduos de cana-de-açúcar, com 113.595.647 toneladas. Este valor é expressivo, refletindo a alta produção de cana-de-açúcar no estado, que tradicionalmente é o maior produtor dessa cultura no Brasil. Outros estados com alta geração de resíduos incluem Minas Gerais (19.794.342 toneladas), Goiás (19.851.769 toneladas), Mato Grosso do Sul (11.004.913 toneladas) e Paraná (9.302.654 toneladas).

As regiões do Norte e Nordeste apresentam uma concentração de resíduos moderada à alta, com destaque para os estados costeiros de Alagoas, Pernambuco, Paraíba e Rio Grande do Norte que apresentam quantidades significativas de resíduos, enquanto estados como Acre, Roraima e Amapá geram menores quantidades de resíduos, refletindo a menor produção de cana-de-açúcar nessas regiões.

Potencial Energético por Estado

A análise do potencial energético dos resíduos de cana-de-açúcar, medido em joules, revela uma distribuição que acompanha a geração de resíduos. São Paulo, novamente, lidera com um potencial energético de 4.38×10^{14} joules, seguido por estados como Minas Gerais (7.63×10^{13} joules), Goiás (7.65×10^{13} joules) e Mato Grosso do Sul (4.24×10^{13} joules). Estes estados apresentam boas oportunidades para o desenvolvimento de projetos de bioenergia devido à grande quantidade de resíduos disponíveis.

Estados com menor potencial energético incluem Acre (1.24×10^{10} joules), Roraima (3.26×10^9 joules) e Amapá (7.28×10^9 joules), refletindo a menor geração de resíduos nessas regiões. A Tabela 2, presente abaixo, detalha os dados referentes aos resíduos industriais de cana-de-açúcar de cada estado.

Tabela 2 - Geração de resíduos industriais e potencial energético do bagaço da cana-de-açúcar (continua)

UNIDADE DA FEDERAÇÃO	RESÍDUOS GERADOS (t)	POTENCIAL ENERGÉTICO (J)
RONDÔNIA	4.807	1.85×10^{10}
ACRE	3.211	1.24×10^{10}
AMAZONAS	10.054	3.88×10^{10}
RORAIMA	846	3.26×10^9
PARÁ	326.613	1.26×10^{12}
AMAPÁ	1.889	7.28×10^9
TOCANTINS	684.375	2.64×10^{12}
MARANHÃO	763.479	2.94×10^{12}
PIAUI	287.196	1.11×10^{12}
CEARÁ	141.102	5.44×10^{11}

Tabela 2 - Geração de resíduos industriais e potencial energético do bagaço da cana-de-açúcar (conclusão)

UNIDADE DA FEDERAÇÃO	RESÍDUOS GERADOS (t)	POTENCIAL ENERGÉTICO (J)
RIO GRANDE DO NORTE	902.593	3.48×10^{12}
PARAÍBA	1.555.920	5.99×10^{12}
PERNAMBUCO	4.481.768	1.73×10^{13}
ALAGOAS	4.603.708	1.77×10^{13}
SERGIPE	589.510	2.27×10^{12}
BAHIA	1.265.824	4.88×10^{12}
MINAS GERAIS	19.794.342	7.63×10^{13}
ESPÍRITO SANTO	839.289	3.24×10^{12}
RIO DE JANEIRO	731.412	2.82×10^{12}
SÃO PAULO	113.595.647	4.38×10^{14}
PARANÁ	9.302.654	3.59×10^{13}
SANTA CATARINA	50.650	1.95×10^{11}
RIO GRANDE DO SUL	111.500	4.30×10^{11}
MATO GROSSO DO SUL	11.004.913	4.24×10^{13}
MATO GROSSO	4.683.198	1.81×10^{13}
GOIÁS	19.851.769	7.65×10^{13}
DISTRITO FEDERAL	7.314	2.82×10^{10}

Fonte: Elaborado pelo autor.

A análise dos dados de cana-de-açúcar mostra uma distribuição desigual na geração de resíduos e no potencial energético entre os estados brasileiros. Os estados com maior produção de cana-de-açúcar também apresentam maior potencial para a geração de energia a partir dos resíduos, destacando-se como áreas prioritárias para investimentos em bioenergia. A gestão eficaz desses resíduos é essencial para aproveitar o potencial energético disponível e promover a sustentabilidade do setor agrícola no Brasil.

Soja

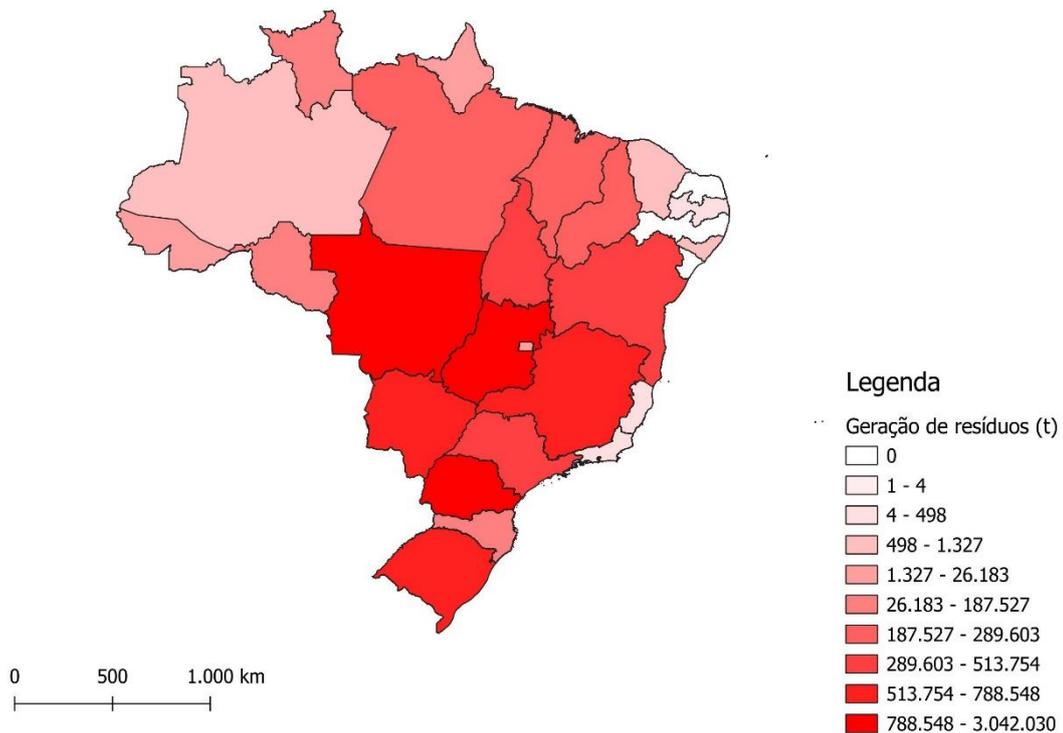
A análise dos dados de produção, geração de resíduos e potencial energético da soja revela a distribuição e as oportunidades para o aproveitamento energético dos resíduos dessa cultura no Brasil. A distribuição dos resíduos de soja é bastante variada entre os estados brasileiros, refletindo as diferenças na produção agrícola.

Os estados com o maior potencial de geração de resíduos de soja são Mato Grosso, Paraná, Goiás, Rio Grande do Sul e Mato Grosso do Sul. Esses estados são tradicionalmente grandes produtores de soja, e os resíduos gerados nessas regiões são significativos.

Mato Grosso: 3.042.030 toneladas de resíduos, com a maior produção de soja no país; Paraná: 1.099.970 toneladas de resíduos, destacando-se como um dos maiores produtores; Goiás: 1.217.291 toneladas de resíduos, outra região com grande

produção agrícola; Rio Grande do Sul: 749.621 toneladas de resíduos, um dos principais estados produtores de grãos; Mato Grosso do Sul: 683.088 toneladas de resíduos, acompanhando os outros grandes estados produtores. A Figura 7, logo abaixo, mostra o mapa da distribuição das estimativas de geração dos resíduos industriais da casca da soja.

Figura 7 - Mapa coroplético da concentração de resíduos industriais da soja (cascas)



Fonte: elaborado pelo autor a partir de dados do trabalho.

Outros estados com produções significativas incluem São Paulo, Bahia e Minas Gerais. Em contraste, estados como Acre, Amazonas e Roraima têm produção e geração de resíduos relativamente menores. Alguns estados, como Rio Grande do Norte, Pernambuco e Sergipe, não apresentaram dados de produção ou geração de resíduos, indicando uma ausência ou produção muito baixa de soja nessas regiões.

Potencial Energético por Estado

O potencial energético dos resíduos de soja, expresso em joules, segue a distribuição dos resíduos. Mato Grosso, o maior produtor de soja, apresenta o maior potencial energético com aproximadamente 1.00×10^{13} joules. Paraná, Goiás, Rio

Grande do Sul e Mato Grosso do Sul também possuem grande potencial energético, refletindo a alta produção de resíduos.

Outros estados com considerável potencial energético incluem Bahia (1.60×10^{12} joules), São Paulo (1.18×10^{12} joules) e Minas Gerais (2.02×10^{12} joules). Estados com menor produção e resíduos, como Acre, Amazonas e Roraima, têm menor potencial energético. A Tabela 3, presente abaixo, exhibe os dados sobre os resíduos industriais da casca da soja, suas estimativas de quantidade geradas e potencial energético.

Tabela 3 - Geração de resíduos industriais e potencial energético da casca da soja (cascas)

UNIDADE DA FEDERAÇÃO	RESÍDUOS GERADOS (t)	POTENCIAL ENERGÉTICO (J)
RONDÔNIA	140.019	4.62×10^{11}
ACRE	1.813	5.98×10^9
AMAZONAS	1.099	3.63×10^9
RORAIMA	27.731	9.15×10^{10}
PARÁ	205.996	6.80×10^{11}
AMAPÁ	1.442	4.76×10^9
TOCANTINS	302.830	9.99×10^{11}
MARANHÃO	282.990	9.34×10^{11}
PIAUÍ	246.198	8.12×10^{11}
CEARÁ	619	2.04×10^9
RIO GRANDE DO NORTE	0	0
PARAÍBA	4	1.48×10^7
PERNAMBUCO	0	0
ALAGOAS	899	2.97×10^9
SERGIPE	0	0
BAHIA	485.921	1.60×10^{12}
MINAS GERAIS	611.171	2.02×10^{12}
ESPÍRITO SANTO	16	5.28×10^7
RIO DE JANEIRO	76	2.52×10^8
SÃO PAULO	358.245	1.18×10^{12}
PARANÁ	1.099.970	3.63×10^{12}
SANTA CATARINA	172.752	5.70×10^{11}
RIO GRANDE DO SUL	749.621	2.47×10^{12}
MATO GROSSO DO SUL	683.088	2.25×10^{12}
MATO GROSSO	3.042.030	1.00×10^{13}
GOIÁS	1.217.291	4.02×10^{12}
DISTRITO FEDERAL	24.249	8.00×10^{10}

Fonte: elaborado pelo autor.

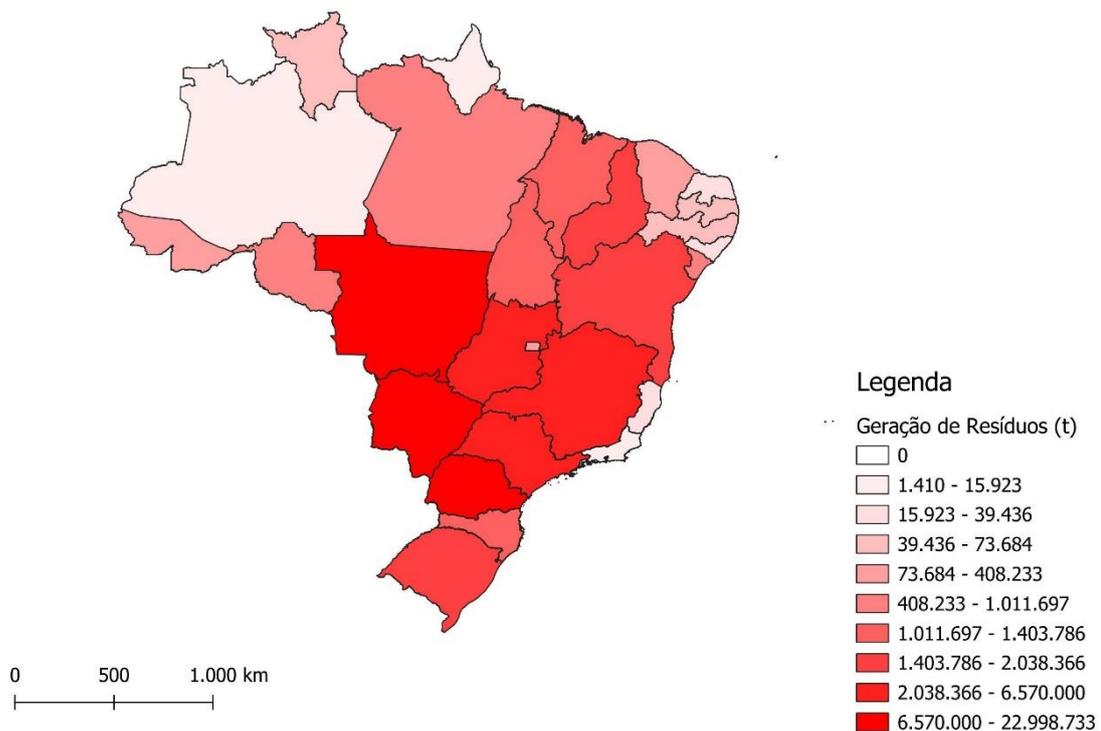
A soja é uma cultura de grande importância econômica no Brasil, e a análise dos resíduos gerados revela um potencial significativo para o aproveitamento energético. Estados como Mato Grosso, Paraná, Goiás e Rio Grande do Sul se destacam como áreas prioritárias para investimentos em bioenergia, devido ao grande volume de resíduos disponíveis. A gestão eficaz desses resíduos não só contribuirá

para a sustentabilidade ambiental, mas também poderá gerar novas oportunidades econômicas para o país.

Milho

A análise dos dados de produção, estimativa de geração de resíduos e potencial energético do milho no Brasil revela uma significativa variação entre os estados, destacando as principais regiões produtoras e as oportunidades para o aproveitamento energético dos resíduos. A Figura 8, localizada abaixo, mostra a distribuição geográfica, em âmbito estadual, da geração dos resíduos industriais do milho.

Figura 8 - Mapa coroplético da concentração de resíduos industriais do milho (sabugo)



Fonte: elaborado pelo autor a partir de dados do trabalho.

A distribuição dos resíduos de milho é bastante variada entre os estados brasileiros, com algumas regiões se destacando significativamente devido à alta produção agrícola. O estado de Mato Grosso é o maior gerador de resíduos de milho, com 22.998.733 toneladas, seguido por Paraná, que gera 9.336.616 toneladas, Mato Grosso do Sul com 7.722.523 toneladas e Goiás com 6.425.935 toneladas. Minas

Gerai também apresenta uma significativa quantidade de resíduos, com 4.708.568 toneladas.

Outros estados, como Bahia, Santa Catarina, Rio Grande do Sul e São Paulo, contribuem com quantidades consideráveis de resíduos. Em contraste, estados como Amazonas, Amapá e Rio Grande do Norte apresentam uma produção e geração de resíduos relativamente menores, refletindo as diferenças regionais na produção de milho, que são influenciadas por fatores climáticos, geográficos e econômicos.

Potencial Energético por Estado

O potencial energético dos resíduos de milho, expresso em joules, está diretamente correlacionado com a quantidade de resíduos gerados. Mato Grosso, sendo o maior produtor de milho, apresenta o maior potencial energético com 9.66×10^{13} joules. Paraná, Mato Grosso do Sul, Goiás e Minas Gerais também possuem grandes potenciais energéticos, refletindo sua alta produção de resíduos.

Outros estados com significativo potencial energético incluem São Paulo (1.21×10^{13} joules), Bahia (6.20×10^{12} joules) e Rio Grande do Sul (7.56×10^{12} joules). Estados com menor produção, como Amazonas, Amapá e Rio de Janeiro, têm menor potencial energético. A Tabela 4, presente abaixo, mostra a relação dos dados dos resíduos industriais de milho de todos os estados.

Tabela 4 - Geração de resíduos industriais e potencial energético do sabugo de milho (continua)

UNIDADE DA FEDERAÇÃO	RESÍDUOS GERADOS (t)	POTENCIAL ENERGÉTICO (J)
RONDÔNIA	891.327	3.74×10^{12}
ACRE	81.165	3.41×10^{11}
AMAZONAS	3.355	1.41×10^{10}
RORAIMA	58.722	2.47×10^{11}
PARÁ	744.320	3.13×10^{12}
AMAPÁ	1.410	5.92×10^9
TOCANTINS	1.162.159	4.88×10^{12}
MARANHÃO	1.367.350	5.74×10^{12}
PIAUI	1.554.889	6.53×10^{12}
CEARÁ	323.103	1.36×10^{12}
RIO GRANDE DO NORTE	17.105	7.19×10^{10}
PARAÍBA	41.697	1.75×10^{11}
PERNAMBUCO	42.637	1.79×10^{11}
ALAGOAS	28.833	1.21×10^{11}
SERGIPE	476.337	2.00×10^{12}
BAHIA	1.476.658	6.20×10^{12}
MINAS GERAIS	4.708.568	1.98×10^{13}
ESPÍRITO SANTO	31.522	1.32×10^{11}
RIO DE JANEIRO	6.465	2.72×10^{10}
SÃO PAULO	2.871.084	1.21×10^{13}
PARANÁ	9.336.616	3.92×10^{13}

Tabela 4 - Geração de resíduos industriais e potencial energético do sabugo de milho (conclusão)

UNIDADE DA FEDERAÇÃO	RESÍDUOS GERADOS (t)	POTENCIAL ENERGÉTICO (J)
SANTA CATARINA	1.283.262	5.39×10^{12}
RIO GRANDE DO SUL	1.800.446	7.56×10^{12}
MATO GROSSO DO SUL	7.722.523	3.24×10^{13}
MATO GROSSO	22.998.733	9.66×10^{13}
GOIÁS	6.425.935	4.02×10^{12}
DISTRITO FEDERAL	196.200	8.00×10^{10}

Fonte: elaborado pelo autor.

O milho é uma cultura de grande importância no Brasil, e a análise dos resíduos gerados mostra um potencial significativo para o desenvolvimento de projetos de bioenergia. Estados como Mato Grosso, Paraná e Goiás se destacam como áreas prioritárias para esses investimentos, devido ao alto volume de resíduos e potencial energético. Além disso, é possível notar que muitos produtores de soja também cultivam milho, aproveitando a prática de rotação de culturas. Essa prática não apenas melhora a fertilidade do solo e reduz a incidência de pragas e doenças, mas também maximiza a utilização dos recursos agrícolas ao longo do ano. O paralelo entre os resultados da soja e do milho revela que estados com alta produção de soja, como Mato Grosso, Paraná e Goiás, também são grandes produtores de milho. Isso reforça a importância dessas regiões na produção de biomassa para bioenergia e destaca a oportunidade de otimizar o uso dos resíduos agroindustriais de ambas as culturas para gerar energia sustentável. O manejo integrado de resíduos de soja e milho pode potencializar os ganhos econômicos e ambientais, consolidando essas regiões como líderes em práticas agrícolas sustentáveis e inovadoras.

Mandioca

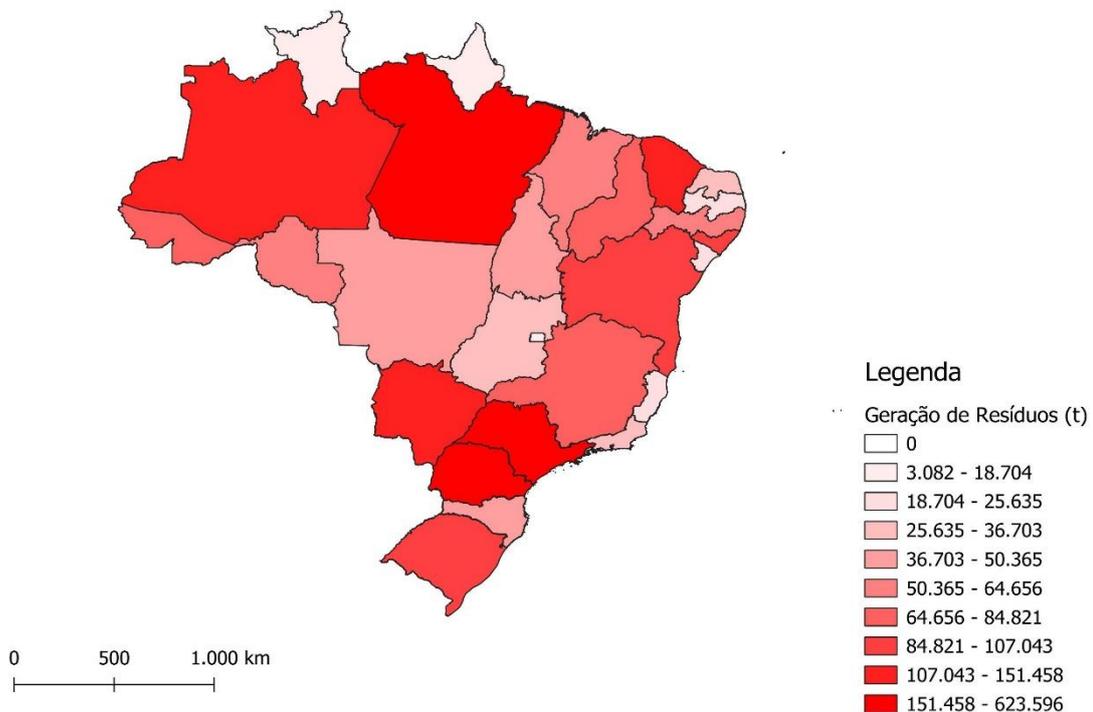
A distribuição espacial dos resíduos de mandioca no Brasil é amplamente diversificada, com algumas regiões destacando-se na geração de resíduos devido à sua capacidade de produção agrícola. O Pará lidera em termos de geração de resíduos, com 623.596 toneladas, seguido pelo Paraná, com 436.030 toneladas, e São Paulo, com 214.190 toneladas. Esses estados são conhecidos por suas extensas áreas de cultivo e infraestruturas avançadas, o que facilita a produção em grande escala.

Outros estados com geração significativa de resíduos incluem Minas Gerais (84.489 toneladas), Bahia (105.057 toneladas), e Mato Grosso do Sul (143.616

toneladas). Esses estados também possuem uma infraestrutura agrícola robusta e um clima favorável, o que permite uma produção eficiente e uma alta geração de resíduos.

Em contraste, o Distrito Federal e o estado do Amapá geram quantidades menores de resíduos, com 3.082 e 17.879 toneladas, respectivamente. Isso reflete uma menor área de cultivo e uma produção mais limitada, o que impacta diretamente na quantidade de resíduos gerados. A Figura 9 mostra o mapa da distribuição da geração dos resíduos industriais da mandioca.

Figura 9 - Mapa coroplético da concentração de resíduos industriais da mandioca (cascas)



Fonte: Elaborado pelo autor a partir de dados do trabalho.

Potencial Energético por Estado

O potencial energético dos resíduos de mandioca varia amplamente entre os estados brasileiros, refletindo a quantidade de produção e a eficiência no aproveitamento desses resíduos. O estado do Pará se destaca significativamente, com um potencial energético de 2.03×10^{12} joules, gerando 623.596 toneladas de resíduos. Outros estados com alto potencial energético incluem o Paraná, com 1.42×10^{12} joules e 436.030 toneladas de resíduos, e São Paulo, com 6.96×10^{11} joules e 214.190 toneladas de resíduos. Isso indica que são regiões tradicionais de cultivo do cultivo de mandioca.

No entanto, estados como o Amazonas e Bahia também apresentam potencial relevante, com 3.74×10^{11} e 3.41×10^{11} joules, respectivamente, o que se traduz em uma geração considerável de resíduos, 115.145 toneladas no Amazonas e 105.057 toneladas na Bahia. A Tabela 5, localizada abaixo, exhibe a relação completa dos dados sobre os resíduos industriais de casca da mandioca.

Tabela 5 - Geração de resíduos industriais e potencial energético da mandioca (cascas)

UNIDADE DA FEDERAÇÃO	RESÍDUOS GERADOS (t)	POTENCIAL ENERGÉTICO (J)
RONDÔNIA	60.742	1.97×10^{11}
ACRE	75.579	2.45×10^{11}
AMAZONAS	115.145	3.74×10^{11}
RORAIMA	10.510	3.41×10^{10}
PARÁ	623.596	2.03×10^{12}
AMAPÁ	17.879	5.81×10^{10}
TOCANTINS	38.548	1.25×10^{11}
MARANHÃO	63.310	2.06×10^{11}
PIAUI	66.338	2.15×10^{11}
CEARÁ	113.995	3.70×10^{11}
RIO GRANDE DO NORTE	33.012	1.07×10^{11}
PARAÍBA	20.885	6.78×10^{10}
PERNAMBUCO	53.619	1.74×10^{11}
ALAGOAS	85.484	2.78×10^{11}
SERGIPE	23.547	7.65×10^{10}
BAHIA	105.057	3.41×10^{11}
MINAS GERAIS	84.489	2.74×10^{11}
ESPÍRITO SANTO	18.807	6.11×10^{10}
RIO DE JANEIRO	26.231	8.52×10^{10}
SÃO PAULO	214.190	6.96×10^{11}
PARANÁ	436.030	1.42×10^{12}
SANTA CATARINA	46.297	1.50×10^{11}
RIO GRANDE DO SUL	99.158	3.22×10^{11}
MATO GROSSO DO SUL	143.616	4.66×10^{11}
MATO GROSSO	40.552	1.32×10^{11}
GOIÁS	27.575	8.96×10^{10}
DISTRITO FEDERAL	3.082	1.00×10^{10}

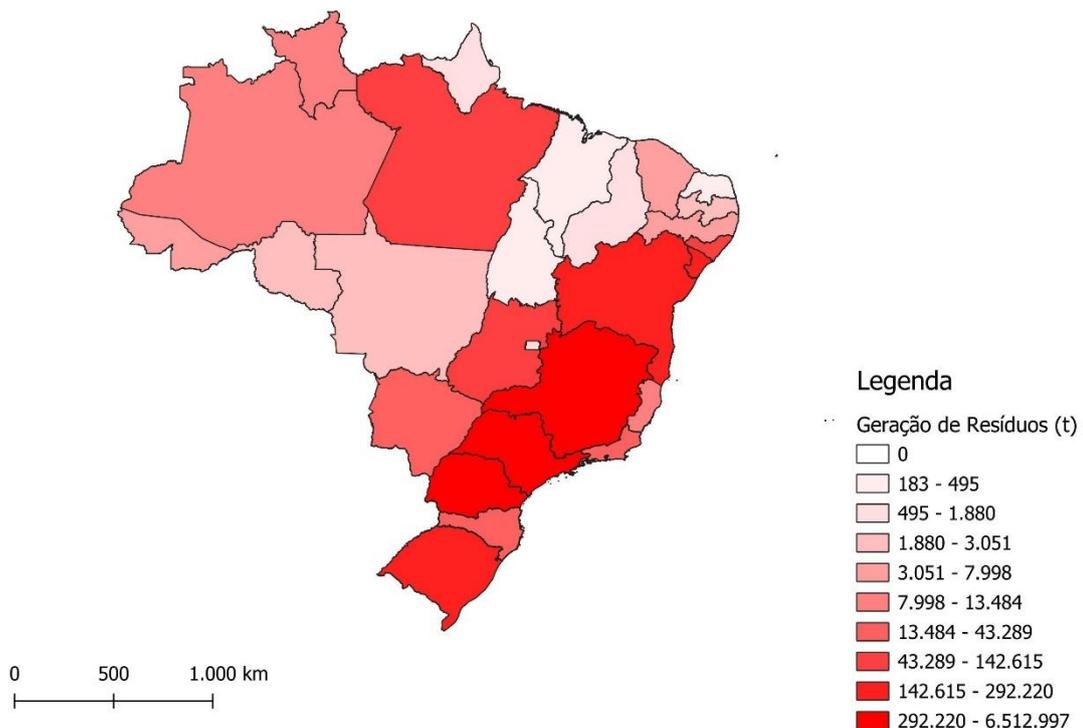
Fonte: elaborada pelo autor.

A análise dos resíduos de mandioca no Brasil revela uma distribuição geográfica variada, com estados do Norte, Nordeste, Sudeste e o Centro-Oeste apresentando capacidades significativas de produção e potencial energético. Essa diversidade regional indica uma oportunidade para o desenvolvimento de políticas específicas que incentivem o aproveitamento dos resíduos para geração de energia, promovendo uma agricultura mais sustentável e eficiente.

Laranja

A produção de laranja no Brasil é bastante concentrada em certos estados, o que se reflete na distribuição dos resíduos gerados. São Paulo destaca-se como o maior gerador de resíduos de laranja, com 6.512.997 toneladas, devido ao seu papel como principal produtor dessa fruta no país. Outros estados com geração significativa de resíduos incluem Minas Gerais (545.701 toneladas), Bahia (287.613 toneladas), Paraná (329.073 toneladas) e Sergipe (209.407 toneladas). A Figura 10, presente abaixo, detalha a distribuição geográfica, em âmbito estadual, da geração dos resíduos industriais de cascas da laranja.

Figura 10 - Mapa coroplético da concentração de resíduos industriais da laranja (cascas)



Fonte: elaborado pelo autor a partir de dados do trabalho.

Na região Nordeste, os estados de Alagoas, Sergipe e Bahia são importantes produtores, enquanto que no Sul, Paraná e Rio Grande do Sul também apresentam significativa produção. Estados como Espírito Santo, Goiás e Mato Grosso do Sul, apesar de terem uma produção menor, ainda contribuem para o total de resíduos gerados. As regiões Norte e Centro-Oeste, como Rondônia, Acre e Mato Grosso, têm uma produção e geração de resíduos relativamente menor, refletindo menor concentração de laranjais.

Potencial Energético por Estado

O potencial energético dos resíduos de laranja varia entre os estados, sendo diretamente proporcional à quantidade de resíduos gerados. São Paulo, devido à sua grande produção, possui o maior potencial energético, com 2.48×10^{13} joules. Minas Gerais e Bahia seguem com 2.08×10^{12} e 1.09×10^{12} joules, respectivamente, bons indicadores de potencial para aproveitamento desses resíduos para a geração de energia. A Tabela 6 exibe os dados acerca dos resíduos industriais de casca da laranja.

Tabela 6 - Geração de resíduos industriais e potencial energético estadual da laranja (cascas)

UNIDADE DA FEDERAÇÃO	RESÍDUOS GERADOS (t)	POTENCIAL ENERGÉTICO (J)
RONDÔNIA	1.900	7.24×10^9
ACRE	3.349	1.28×10^{10}
AMAZONAS	11.013	4.19×10^{10}
RORAIMA	11.137	4.24×10^{10}
PARÁ	132.325	5.04×10^{11}
AMAPÁ	1.810	6.89×10^9
TOCANTINS	416	1.59×10^9
MARANHÃO	183	6.97×10^8
PIAUÍ	787	3.00×10^9
CEARÁ	4.230	1.61×10^{10}
RIO GRANDE DO NORTE	412	1.57×10^9
PARAÍBA	2.677	1.02×10^{10}
PERNAMBUCO	3.238	1.23×10^{10}
ALAGOAS	66.184	2.52×10^{11}
SERGIPE	209.407	7.97×10^{11}
BAHIA	287.613	1.09×10^{12}
MINAS GERAIS	545.701	2.08×10^{12}
ESPÍRITO SANTO	12.091	4.60×10^{10}
RIO DE JANEIRO	31.841	1.21×10^{11}
SÃO PAULO	6.512.997	2.48×10^{13}
PARANÁ	329.073	1.25×10^{12}
SANTA CATARINA	15.226	5.80×10^{10}
RIO GRANDE DO SUL	178.629	6.80×10^{11}
MATO GROSSO DO SUL	18.202	6.93×10^{10}
MATO GROSSO	2.247	8.55×10^9
GOIÁS	81.615	3.11×10^{11}
DISTRITO FEDERAL	505	1.92×10^9

Fonte: elaborado pelo autor.

Outros estados como Paraná, Rio Grande do Sul e Sergipe também apresentam considerável potencial energético, refletindo uma oportunidade para o desenvolvimento de projetos de energia renovável a partir de resíduos agroindustriais. Mesmo estados com menor produção, como Espírito Santo, Mato Grosso e Goiás,

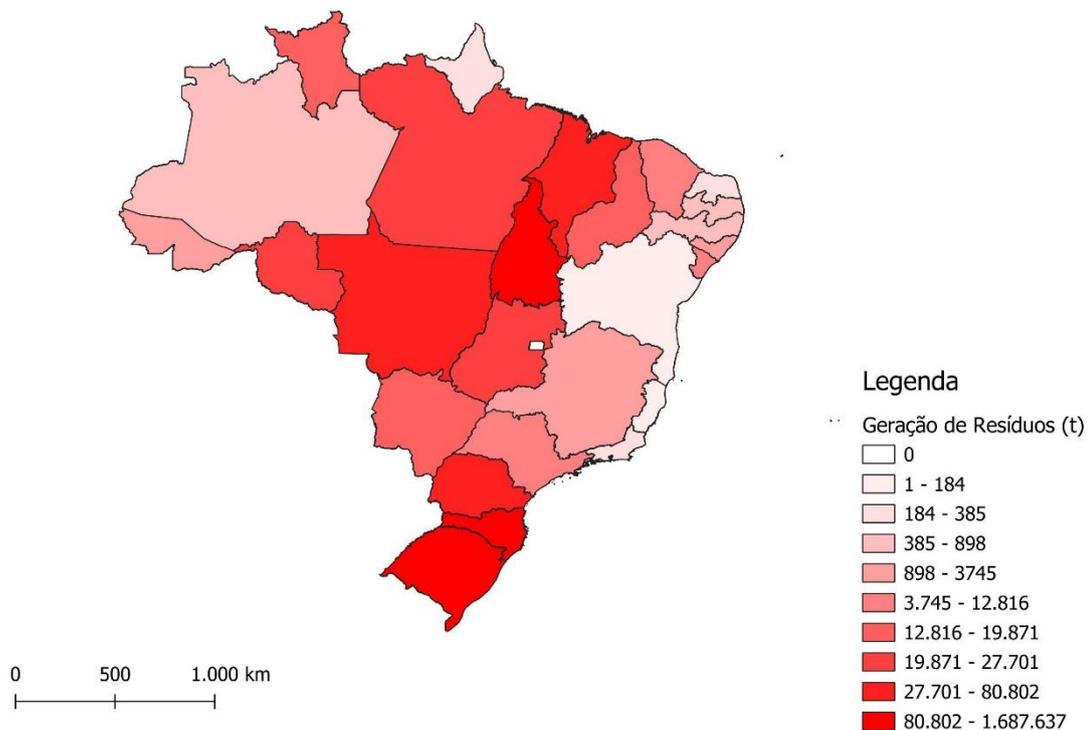
mostram-se importantes no contexto de uma estratégia de aproveitamento total dos resíduos, contribuindo para a sustentabilidade e eficiência energética.

A análise desses dados reforça a importância da utilização eficiente dos resíduos agroindustriais, não só como uma forma de reduzir o impacto ambiental, mas também como uma fonte alternativa de energia, especialmente relevante em regiões com alta concentração de produção de laranja.

Arroz

A análise da distribuição espacial dos resíduos de arroz revela que a produção é concentrada em algumas regiões chave do Brasil, refletindo em uma distribuição significativa de resíduos (Figura 11). O Sul do Brasil, particularmente o estado do Rio Grande do Sul, destaca-se como a principal região produtora, gerando uma quantidade impressionante de 1.687.637 toneladas de resíduos. Santa Catarina também contribui significativamente, com 262.785 toneladas de resíduos. Nessas regiões, o tipo de plantio predominante é o arroz de várzea, irrigado por inundação controlada, que é mais comum devido às condições favoráveis de solo e clima.

Figura 11 - Mapa coroplético da concentração de resíduos industriais do arroz (cascas)



Fonte: elaborado pelo autor a partir de dados do trabalho.

No Centro-Oeste, o estado de Mato Grosso do Sul gera 13.233 toneladas de resíduos, enquanto Mato Grosso contribui com 76.502 toneladas. Goiás, por sua vez, apresenta uma produção de resíduos de 23.709 toneladas. Nesta região, predomina o arroz de terras altas, incluindo o arroz de sequeiro, que é cultivado sem irrigação, aproveitando as chuvas sazonais do Cerrado. No Norte, o estado de Tocantins é o maior gerador de resíduos com 115.200 toneladas, seguido por Rondônia com 26.709 toneladas e Pará com 25.691 toneladas. A produção nesta região também inclui o arroz de terras altas. No Nordeste, os estados do Maranhão e Piauí são os maiores geradores de resíduos, com 39.863 toneladas e 17.952 toneladas, respectivamente. Bahia, Sergipe e Alagoas também contribuem, embora em menor escala. No Sudeste, Minas Gerais gera 2.218 toneladas de resíduos, enquanto São Paulo apresenta uma produção de 12.482 toneladas.

Potencial energético por estado

O potencial energético dos resíduos de arroz é igualmente distribuído, refletindo a produção de resíduos. O Sul do Brasil, particularmente o Rio Grande do Sul, apresenta um potencial energético de 5.40×10^{12} joules, o mais alto entre todos os estados. Santa Catarina segue com um potencial de 8.41×10^{11} joules. No Centro-Oeste, Mato Grosso do Sul possui um potencial energético de 4.23×10^{10} joules, e Mato Grosso contribui com 2.45×10^{11} joules. Goiás apresenta um potencial energético de 7.59×10^{10} joules. No Norte, Tocantins destaca-se com um potencial energético de 3.69×10^{11} joules, seguido por Rondônia com 8.55×10^{10} joules e Pará com 8.22×10^{10} joules. No Nordeste, Maranhão e Piauí apresentam potenciais energéticos de 1.28×10^{11} joules e 5.74×10^{10} joules, respectivamente. Bahia, Sergipe e Alagoas também contribuem de forma significativa. No Sudeste, Minas Gerais possui um potencial energético de 7.10×10^9 joules, enquanto São Paulo apresenta um potencial de 3.99×10^{10} joules. A Tabela 7, localizada abaixo, exhibe a relação completa dos dados sobre os resíduos industriais de casca do arroz.

Tabela 7 - Geração de resíduos industriais e potencial energético do arroz (continua)

UNIDADE DA FEDERAÇÃO	RESÍDUOS GERADOS (t)	POTENCIAL ENERGÉTICO (J)
RONDÔNIA	26.709	8.55×10^{10}
ACRE	1.013	3.24×10^9
AMAZONAS	651	2.09×10^9
RORAIMA	17.004	5.44×10^{10}
PARÁ	25.691	8.22×10^{10}

Tabela 7 - Geração de resíduos industriais e potencial energético do arroz (conclusão)

UNIDADE DA FEDERAÇÃO	RESÍDUOS GERADOS (t)	POTENCIAL ENERGÉTICO (J)
AMAPÁ	195	6.27×10^8
TOCANTINS	115.200	3.69×10^{11}
MARANHÃO	39.863	1.28×10^{11}
PIAUI	17.952	5.74×10^{10}
CEARÁ	3.765	1.20×10^{10}
RIO GRANDE DO NORTE	341	1.09×10^9
PARAÍBA	668	2.14×10^9
PERNAMBUCO	398	1.28×10^9
ALAGOAS	3.720	1.19×10^{10}
SERGIPE	7.437	2.38×10^{10}
BAHIA	147	4.71×10^8
MINAS GERAIS	2.218	7.10×10^9
ESPÍRITO SANTO	82	2.63×10^8
RIO DE JANEIRO	189	6.08×10^8
SÃO PAULO	12.482	3.99×10^{10}
PARANÁ	31.173	1.00×10^{11}
SANTA CATARINA	262.785	8.41×10^{11}
RIO GRANDE DO SUL	1.687.637	5.40×10^{12}
MATO GROSSO DO SUL	13.233	4.23×10^{10}
MATO GROSSO	76.502	2.45×10^{11}
GOIÁS	23.709	7.59×10^{10}
DISTRITO FEDERAL	0	0

Fonte: elaborado pelo autor.

Análise da distribuição espacial dos resíduos e do potencial energético do arroz no Brasil revela a importância estratégica de determinadas regiões para a produção e aproveitamento desses resíduos. O Sul, com destaque para o Rio Grande do Sul, emerge como a região mais significativa tanto em termos de resíduos gerados quanto de potencial energético, predominando o plantio de arroz de várzea irrigado. Em contraste, regiões como o Cerrado no Centro-Oeste, que utilizam principalmente o plantio de arroz de terras altas, apresentam uma produção de resíduos considerável, mas menor em comparação com o Sul. A concentração dessas atividades em regiões específicas sugere oportunidades para o desenvolvimento de tecnologias e políticas voltadas para o aproveitamento sustentável dos resíduos agroindustriais.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

As considerações finais deste trabalho destacam que os objetivos propostos foram alcançados, sendo possível mapear, analisar e elaborar estimativas da produção de resíduos agroindustriais no Brasil, bem como estimar seu potencial energético.

As análises mostram como a localização geográfica e o tipo de cultivo influenciam a geração de resíduos agroindustriais e o potencial energético no Brasil. O Centro-Oeste, Sudeste e Sul são as regiões mais relevantes em termos de produção de resíduos e potencial energético, cada uma com suas culturas predominantes. A cana-de-açúcar, soja, milho e laranja se destacam pela grande quantidade de biomassa gerada e pelo alto potencial para conversão em bioenergia, enquanto culturas como a mandioca e arroz, embora com menor expressão em termos de volume, também apresentam oportunidades significativas para o aproveitamento energético.

As regiões Centro-Oeste, Sudeste e Sul se destacam não apenas pela extensão de áreas cultivadas, mas também pelo elevado volume de resíduos agroindustriais gerados. Essa concentração não é apenas um reflexo da escala de produção, mas também das características específicas de cada cultura, como o arroz no Sul ou a cana-de-açúcar no Sudeste. O potencial energético desses resíduos é significativo, sugerindo uma grande oportunidade para a expansão de projetos de bioenergia nessas regiões, o que pode contribuir substancialmente para a matriz energética nacional.

Os dados indicam que os estados líderes na produção agrícola também são aqueles com maior potencial para a geração de bioenergia, o que reforça a importância estratégica dessas regiões para o desenvolvimento de projetos sustentáveis. A gestão eficaz desses resíduos pode não apenas contribuir para a sustentabilidade ambiental, mas também gerar novas oportunidades econômicas, especialmente em áreas prioritárias para investimentos em bioenergia.

Embora o potencial seja vasto, ainda existem desafios a serem superados, como a viabilidade econômica das tecnologias de conversão e a conscientização das indústrias sobre as vantagens do aproveitamento energético, sugerindo assim pesquisas futuras acerca dos custos de implantação dos variados modelos de biodigestores e demais tecnologias de conversão. No entanto, as oportunidades são

igualmente grandes, especialmente em um cenário global onde a demanda por fontes de energia limpa e renovável está em crescimento. O aproveitamento dos resíduos agroindustriais pode fortalecer o setor energético brasileiro, tornando-o mais resiliente e menos dependente de fontes fósseis.

A pesquisa contribui para a compreensão do uso sustentável dos resíduos agroindustriais, apontando para a importância do aproveitamento desse recurso. No entanto, limitações foram identificadas, como a dificuldade na coleta de dados atualizados e abrangentes e na completa dispersão dos dados acerca do tema, o que sugere a necessidade de estudos futuros que aprofundem a investigação em contextos regionais específicos, como municípios ou pequenas regiões produtoras, além da abrangência das demais culturas, bem como os diversos resíduos de cada produto agrícola pode gerar em seu processamento. Por fim, este trabalho reforça a relevância do tema e sugere que o avanço em tecnologias de bioenergia pode consolidar o Brasil como um líder global no uso de fontes renováveis, contribuindo para a segurança energética e para a mitigação das mudanças climáticas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANDRADE, H., O.; PINHEIRO, G., D.; PEREIRA, A., I., S.; FERREIRA, J., C., S., F.; BORGES, M., V., F. **Aspectos Teóricos na Produção de Biogás e Biofertilizante pelo Mecanismo de Biodigestão e Geração de Energia Elétrica Limpa Através de um Gerador Específico**. VII CONNEPI- Congresso Norte Nordeste de Pesquisa e Inovação. Palmas, Tocantins, Brasil, 2012.

ARAÚJO JORGE, L. H.; OMENA, E. **Dossiê Técnico Biodigestor**. Disponível em: <<http://sbrt.ibict.br/dossie-tecnico/downloadsDT/NjEwNw==>>. Acesso em: 26 nov. 2023.

BANERJEE, N. Biomass to Energy — an Analysis of Current Technologies, Prospects, and Challenges. **BioEnergy Research**, v. 16, n. 2, p. 683–716, 17 jun. 2023.

BARROS, Luana de Oliveira. **Densidade energética de briquetes produzidos a partir de resíduos agrícolas**. 2012. Disponível em: <<https://bdm.unb.br/handle/10483/4448>>. Acesso em: 15 de jul. 2024.

BCE, (BIBLIOTECA CENTRAL DA UNB). **ABNT para trabalhos acadêmicos** Universidade de Brasília, Programa de Competência em Informação. Brasília: [s.n.].

BEN DA COSTA, A. et al. **DETERMINAÇÃO DO PODER CALORÍFICO NO CONTROLE DE QUALIDADE DE COMBUSTÍVEIS PARA SISTEMAS DE GERAÇÃO DE ENERGIA E AQUECIMENTO INDUSTRIAL**. 2009. Disponível em: <https://abepro.org.br/biblioteca/enegep2009_TN_STP_091_615_14073.pdf>. Acesso em: 18 jun. 2024.

CALZA, Lana F. et al. Avaliação dos custos de implantação de biodigestores e da energia produzida pelo biogás. **Engenharia Agrícola**, v. 35, n. 6, p. 990-997, 2015.

CAMPOS, G.S. **Avaliação do aproveitamento energético da casca de arroz: um estudo de caso no município de Santo Antônio da Patrulha**. 2016. 55 f. (Trabalho de Conclusão de Curso) - Engenharia Agroindustrial Agroquímica, Universidade Federal do Rio Grande, Santo Antônio da Patrulha.

Cardoso, L. M., Souza, P. L. de. & Silva, T. N. (2019). **Panorama operacional e os desafios da primeira usina termoeletrica movida a biogás de aterro sanitário do estado do Rio Grande do Sul**. Anais do 2º Congresso Sul-Americano de Resíduos Sólidos e Sustentabilidade, Foz do Iguaçu.

CASTANHO, D., S.; ARRUDA, H., J. **Biodigestores**. VI Semana de Tecnologia em Alimentos. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Ponta Grossa, Paraná, Brasil, 2008.

CIBIOGÁS. **Biogás e energia elétrica: como produzir eletricidade com resíduos orgânicos?** Disponível em: <<https://cibiogas.org/blog/biogas-e-energia-eletrica-como-produzir-eletricidade-com-residuos-organicos/#:~:text=As%20propriedades%20rurais%20da%20cidade,abastece%20pr%C3%A9dios%20p%C3%ABlicos%20do%20munic%C3%ADpio.>>. Acesso em: 9 dez. 2023.

COSTA, A. M. S. et al. RESÍDUOS DE MANDIOCA PARA OTIMIZAÇÃO DO PROCESSO DE PRODUÇÃO DE BIOGÁS A PARTIR DA VINHAÇA. Em: Ciência e tecnologia de alimentos: Pesquisas e avanços. **[s.l.] Agron Food Academy**, 2023. Disponível em: < <https://agronfoodacademy.com/residuos-de-mandioca-para-otimizacao-do-processo-de-producao-de-biogas-a-partir-da-vinhaca/>>. Acesso em: 10 de ago. 2024.

DE AZEVEDO FRIGO, K. D.; FEIDEN, A.; BARCHINSK GALANT, N.; FERREIRA SANTOS, R.; MARI, A. G.; PIRES FRIGO, E. **BIODIGESTORES: SEUS MODELOS E APLICAÇÕES**. Acta Iguazu, [S. l.], v. 4, n. 1, p. 57–65, 2000. DOI: 10.48075/actaiguazu.v4i1.12528. Disponível em: <https://e-revista.unioeste.br/index.php/actaiguazu/article/view/12528>. Acesso em: 27 nov. 2023.

DEGANUTTI, R.; PALHACI, M. C. J. P.; ROSSI, M.; TAVARES, R; SANTOS, C. **Biodigestores rurais: modelos indiano, chinês e batelada**. 2002 Disponível em <http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/Repositorio/Biodigestores_000g76qdzev02wx5ok0wtedt3spdi71p.pdf>. Acesso em: 20 set. 2023

DEMIRBAS, A. Biofuels securing the planet's future energy needs. **Energy Conversion and Management**, v. 50, n. 9, p. 2239–2249, 1 set. 2009.

EPE - EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Geração de Energia**. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-ben>>. Acesso em: 24 jan. 2023.

EPE – EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Impactos da participação do biogás e do biometano na matriz energética.** In: IV FÓRUM DO BIOGÁS, São Paulo, 17-18 de outubro de 2017. São Paulo, out. 2017.

FERREIRA, MÁRCIA ELIANA. **Avaliação do Potencial de Produção de Biogás e Energia a partir de Resíduos Agrícolas no Paraná.** Disponível em: <https://nupet.daelt.ct.utfpr.edu.br/tcc/engenharia/doc-equipe/2018_1_29/2018_1_29_final.pdf>. Acesso em: 19 de jun. 2024.

FILHO, W.; FRANCO, C. **Avaliação do Potencial dos Resíduos Produzidos Através do Processamento Agroindustrial no Brasil.** Disponível em: <<https://rvq-sub.sbq.org.br/index.php/rvq/article/view/880/627>>. Acesso em: 30 out. 2023.

GABRIELA, C. S. P. **Estudo do conteúdo calorífico de ligninas extraídas de diferentes fontes de biomassa vegetal.** Uberlândia: Universidade Federal de Uberlândia, 22 fev. 2019.

GAETE, A. V.; TEODORO, C. E. DE S.; MARTINAZZO, A. P. Utilização de resíduos agroindustriais para produção de celulase: uma revisão. **Research, Society and Development**, v. 9, n. 8, 17 jul. 2020.

HASAN, C. et al. PRODUÇÃO DE BIOGÁS A PARTIR DE RESÍDUOS AGROINDUSTRIAIS: ANÁLISE DOS TEORES DE SÓLIDOS TOTAIS, VOLÁTEIS E FIXOS EM AMOSTRAS PRÉ E PÓS DIGESTÃO ANAERÓBIA. **Revista Brasileira de Energias Renováveis**, v. 8, n. 1, 27 mar. 2019.

IBGE. **Produtos da biomassa representaram 9% da energia elétrica do país em 2018.** Disponível em: <<https://censoagro2017.ibge.gov.br/agencia-noticias/2012-agencia-de-noticias/noticias/32507-produtos-da-biomassa-representaram-9-da-energia-eletrica-do-pais-em-2018>>. Acesso em: 24 jan. 2023.

IBGE. **Sistema IBGE de Recuperação Automática - SIDRA.** Disponível em:<<https://sidra.ibge.gov.br/home/pnadct/brasil>>. Acesso em: 20 de jun. 2024.

KARLSSON, T. et al. **Manual Básico de Biogás**. Disponível em: <https://www.univates.br/editora-univates/media/publicacoes/71/pdf_71.pdf>. Acesso em: 20 nov. 2023.

LIGUORI, R.; AMORE, A.; FARACO, V. Waste valorization by biotechnological conversion into added value products. **Applied Microbiology and Biotechnology**, v. 97, n. 14, p. 6129–6147, 2013.

LUCAS, J. **Estudo comparativo de biodigestores modelos indianos e chineses**. Tese de Doutorado, Universidade Estadual Paulista, 1987.

MCKENDRY, Peter. Overview of Anaerobic Digestion and Power and Gas to Grid Plant CAPEX and OPEX Costs. **Int J Bioprocess Biotech**, v. 2, p. 109, 2019.

MEJIAS, R. G. Bioeconomia e suas aplicações. **ÂNDÉ : Ciências e Humanidades**, v. 2, n. 3, p. 105–121, 4 jul. 2019.

MENDONÇA PINTO, P. H.; CABELLO, C. TRATAMENTO DE MANIPUEIRA DE FECULARIA EM BIODIDIGESTOR ANAERÓBIO PARA DISPOSIÇÃO EM CORPO RECEPTOR, REDE PÚBLICA OU USO EM FERTIRRIGAÇÃO. **ENERGIA NA AGRICULTURA**, v. 26, n. 3, p. 127, 22 nov. 2011.

MILANEZ, A. Y. et al. **Biogás de resíduos agroindustriais: panorama e perspectivas**. Disponível em: <<http://web.bndes.gov.br/bib/jspui/handle/1408/15384>>. Acesso em: 12 nov. 2023.

MINISTÉRIO DA AGRICULTURA E PECUÁRIA. **Crescimento da economia brasileira é impulsionado pela alta de 15% da agropecuária em 2023**. Disponível em: <<https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/noticias/crescimento-da-economia-brasileira-e-impulsionado-pela-alta-de-15-da-agropecuaria-em-2023>>. Acesso em: 12 maio. 2024.

MORAIS, Gabriel Carrijo de. **Casca de soja na alimentação de vacas leiteiras: revisão bibliográfica**. 2020. Disponível em: <<https://repositorio.unesp.br/items/5a58b4cd-d85a-4560-a300-ffeef3ec3dbb>>. Acesso em: 10 de jul. 2024.

MUNIZ, R. N. **Educação e biomassa**. Disponível em: <http://www.proceedings.scielo.br/scielo.php?pid=MSC0000000022002000100053&script=sci_arttext&tlng=pt>. Acesso em: 5 nov. 2023.

NONES, Daniela Letícia et al. **Cadeia produtiva de pellets e briquetes de biomassa residual para geração de energia em Santa Catarina**. 2014. Disponível em: <https://www.udesc.br/arquivos/cav/id_cpmenu/1481/Disserta__o_Daniela_Leticia_Nones_15687490518399_1481.pdf>. Acesso em: 17 de jun. 2024.

OLIVEIRA, C. **Potencial de Biomassa Agricultura e Agroindustrial no Brasil**. Disponível em: <<https://pt.linkedin.com/pulse/potencial-de-biomassa-agricultura-e-agroindustrial-celso-oliveira>>. Acesso em: 12 maio. 2024.

OLIVER, André de Paula Moniz et al. **Manual de treinamento em biodigestão**. Instituto de Estudos Del Hambre. Bahia, v. 23, p. 93, 2008.

PEREIRA, E. R.; DEMARCHI, J. J. A. A.; BUDIÑO, F. E. L. **Biodigestores- Tecnologia para o manejo de efluentes da pecuária**. 2009. Disponível em: <<http://www.iz.sp.gov.br/pdfs/1255981651.pdf>>. Acesso em: 21 set. 2023.

PEREIRA, L. DE L. S. A APRENDIZAGEM COLABORATIVA NA EDUCAÇÃO QUÍMICA: EM FOCO O CONCEITO DE PODER CALORÍFICO. **Revista Ciências & Ideias ISSN: 2176-1477**, p. 126–141, 25 out. 2018.

SALES FILHO, I. DE O. **Avaliação da toxicidade e remoção de matéria orgânica de efluente de biodigestor de resíduos sólidos orgânicos tratados em Wetlands**. Disponível em: <<https://repositorio.ufpe.br/handle/123456789/10545>>. Acesso em: 23 nov. 2023.

SCHNEIDER, V. et al. **Diagnóstico dos Resíduos Orgânicos do Setor Agrossilvopastoril e Agroindústrias Associadas**. Disponível em: <https://repositorio.ipea.gov.br/bitstream/11058/7687/1/RP_Diagn%C3%B3stico_2012.pdf>. Acesso em: 9 dez. 2023.

TARRENTO, G. E., MARTINES, J. C. **Análise da implantação de biodigestores em pequenas propriedades rurais, dentro do contexto da produção limpa**. In: SIMPEP, 13. 2006. Bauru, SP, Brasil.

THANGARAJ, R. et al. Production, Cost Analysis, and Marketing of Biogas. **Industrial Microbiology Based Entrepreneurship**, p. 225, 2022.

UFSM, (UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA). **Manual de Dissertações e Teses da UFSM: Estrutura e Apresentação Documental para Trabalhos Acadêmicos**. Santa Maria: Editora UFSM, 2021.

VAZ JÚNIOR, S. **Aproveitamento de resíduos agroindustriais Uma abordagem sustentável**. Disponível em: <<http://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/1126255>>. Acesso em: 7 dez. 2023.

VIVIEN, F. D. et al. The Hijacking of the Bioeconomy. **Ecological Economics**, v. 159, p. 189–197, 1 maio 2019.

YOSHIKAWA, K. et al. Comprehensive phenotypic analysis for identification of genes affecting growth under ethanol stress in *Saccharomyces cerevisiae*. **FEMS Yeast Research**, v. 9, n. 1, p. 32–44, fev. 2009.