

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
PROGRAMA DE POS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA DE ENERGIA - PPGEE**

Laura Vieira Maia de Sousa

**Avaliação holística do potencial de biomassa residual no Brasil
utilizando a ferramenta SIG**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Energia como parte dos requisitos para obtenção do Título de mestre em Ciências em Engenharia de Energia.

Área de concentração: Sistemas Energéticos

Orientador: Prof. Dr. Electo Eduardo Silva Lora

Coorientador: Prof. Dr. Fábio Cordeiro de Lisboa

04 de julho de 2023

Itajubá – MG

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
PROGRAMA DE POS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA DE ENERGIA - PPGEE**

Laura Vieira Maia de Sousa

**Avaliação holística do potencial de biomassa residual no Brasil
utilizando a ferramenta SIG**

Dissertação aprovada por banca examinadora em 04 de julho de 2023, conferindo à autora o título de **mestre**.

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Electo Eduardo Silva Lora
(Orientador – UNIFEI)

Prof. Dr. Fábio Cordeiro de Lisboa
(Coorientador – UNIFEI)

Prof. Dr. Flávio Dias Mayer
(UFMS)

Prof. Dr. Luiz Augusto Horta Nogueira
(UNIFEI)

Prof. Dra. Regina Mambeli Barros
(UNIFEI)

Itajubá – MG

2023

Dedicatória

Aos meus avós, que acompanham da
erraticidade.

Agradecimentos

Agradeço, primeiramente, aos meus pais e irmão, que desde sempre acompanharam e apoiaram os meus sonhos, nas jornadas diárias de estudo e trabalho. Em especial à minha mãe, que vem nos inspirando e ensinando a ultrapassar com resiliência todas as adversidades da vida, seguindo sempre em frente.

Ao meu esposo, companheiro que se dedica na construção de todos os sonhos e ideias, com paciência, amor, leveza e carinho.

Aos mestres que me orientaram durante toda a jornada, Prof. Electo Eduardo Silva Lora e Prof. Fábio Cordeiro de Lisboa, agradeço por todo o apoio, paciência e lições valiosas que irei levar por toda a vida acadêmica e profissional.

À Prof. Paula Meyer Soares, que me acompanha desde o início das atividades acadêmicas e tem sido, além de mestre, uma amiga de jornada.

Aos meus padrinhos, que têm apoiado toda a trajetória e cujos quais devo imensa gratidão.

Aos meus sogros, que contribuíram com ferramentas essenciais para a conclusão de mais esta etapa, inspirando sempre o estudo e trabalho.

Aos colegas e amigos de caminhada, em especial ao Rodrigo Santana, que por meio da compreensão, seriedade e disciplina, exemplifica diariamente que todos os esforços valem a pena.

Ao Programa de Formação de Recursos Humanos da Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis – ANP PRH 46.1 –, coordenado pelos professores Marcos Dias, Luiz Augusto Horta Nogueira e Eric Alberto Ocampo Battle, contribuindo para o desenvolvimento deste estudo.

Ao Projeto BRICS ‘Conversões termoquímicas de biomassa/resíduos lignocelulósicos em bioenergia e biocombustíveis e sua utilização em motores de combustão interna – TCLB/WBBUICE’, chamada CNPQ/Finep/MCTIC//BRICS-STI N° 03/2019, processo 442318/2017-0.

Esforça-te, porque é você por você mesmo.

Resumo

Na busca por fontes de energia que apresentem menores impactos ambientais, soma-se a necessidade de destinação dos resíduos gerados pelas atividades humanas. Neste contexto, é apresentada uma análise holística do aproveitamento energético dos resíduos sólidos e efluentes das atividades agrícola e florestal, excretas de animais, dos resíduos sólidos urbanos (RSU) e esgotos, da indústria de papel e celulose e carvão vegetal do Brasil. A partir de revisão bibliográfica, é apresentado o panorama brasileiro atual em números que contribuem para uma visão do potencial nacional de aproveitamento da bioenergia a partir de seu potencial teórico e técnico. A ferramenta de geoprocessamento QGIS3.24.2 Tisler® foi utilizada para gerar os mapas de potencialidade a partir de dados censitários de microrregiões e municípios disponíveis na base de dados do IBGE (2022) e do Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas (SIRGAS 2000). Os resultados da análise dos mapas por microrregião de potencial de geração a partir de resíduos agrícolas destacam as culturas de cana-de-açúcar, milho e soja. O maior potencial técnico de geração a partir de resíduos de biomassa encontra-se no segmento agrícola, com 53,3 GW de potencial técnico. Nesse segmento, destacam-se a cultura da cana-de-açúcar (potencial de 32,5 GW), milho e soja (ambos com 7,8 GW de potencial técnico). Além disso, apresentam potenciais técnicos promissores, o lodo de esgotos (12,2 GW) e as excretas de animais (6,8 GW). No agregado, conclui-se que Brasil tem um potencial técnico de 12.184 PJ/ano de geração a partir dos resíduos de biomassa, o que equivale a uma potência instalada de pouco mais de 126 GW a partir desse tipo de fonte. Atualmente, o Brasil tem apenas 16 GW de potência instalada para o aproveitamento energético da biomassa, explorando basicamente os resíduos da cana-de-açúcar e o licor negro.

Palavras-chaves: *Biomassa; Bioenergia; Energia renovável; Transição energética; Geoprocessamento.*

Abstract

In the search for energy sources that have lower environmental impacts, there is also the need to dispose of waste generated by human activities. In this context, a holistic analysis of the energy use of residues from agricultural and forestry activities, animal excreta, urban solid waste and sewage, from the pulp and paper industry and charcoal in Brazil is presented. Based on a bibliographic review, the current Brazilian panorama is presented in figures that contribute to a vision of the national potential for harnessing bioenergy from its theoretical and technical potential. The QGIS3.24.2 Tisler geoprocessing tool was used to generate potentiality maps from census data of microregions and municipalities available in the IBGE database (2022) and the Geocentric Reference System for the Americas (SIRGAS 2000). The results of the analysis of the maps by micro-region of generation potential from agricultural residues highlight the cultures of sugar cane, corn and soy. The greatest technical potential for generation from biomass residues is found in the agricultural segment, with 53.3 GW of technical potential. In this segment, sugarcane (32.5 GW potential), corn and soybeans (both with 7.8 GW of technical potential) stand out. In addition, sewage sludge (12.2 GW) and animal excreta (6.8 GW) have promising technical potential. In aggregate, it is concluded that Brazil has a technical potential of 12,184 PJ/year of generation from biomass residues, which is equivalent to an installed power of just over 126 GW from this type of source. Currently, Brazil has only 16 GW of installed power for the energy use of biomass, basically exploiting sugarcane residues and black liquor.

Keywords: *Biomass; Bioenergy; Renewable energy; Energy transition; Geoprocessing.*

Lista de figuras

Figura 1 Área colhida de lavouras temporárias e permanentes em 2020.....	29
Figura 2 Quantidade produzida de lavouras temporárias e permanentes em 2020.....	29
Figura 3 Processo de geração da vinhaça a partir da produção de etanol.....	30
Figura 4 Efetivo de rebanhos no Brasil, por tipo (cabeças).	33
Figura 5 Natureza cíclica do processo de recuperação do licor negro.....	40
Figura 6 Uso de licor negro produzido no Brasil, em 2021.....	41
Figura 7 Arquitetura dos Sistemas de Informação Geográfica (SIG).....	47
Figura 8 Coordenadas SIRGAS2000.	48
Figura 9 Esquema de elaboração de mapas no QGIS a partir dos potenciais calculado.	51
Figura 10 Fluxo metodológico do estudo.....	51
Figura 11 Fluxograma esquemático da metodologia para obtenção do potencial teórico agrícola e florestal.	52
Figura 12 . Fluxograma esquemático da metodologia para obtenção do potencial teórico agrícola e florestal.	54
Figura 13 Fluxograma esquemático da metodologia para obtenção do potencial teórico de excretas bovinas, suínas e galináceos.	56
Figura 14 Fluxograma esquemático da metodologia para obtenção do potencial teórico do RSU.	57
Figura 15 Fluxograma esquemático da metodologia para obtenção do potencial teórico do RSU a partir de rota bioquímica.	59
Figura 16 Fluxograma esquemático da metodologia para obtenção do potencial teórico do RSU a partir de rota termoquímica.	60
Figura 17 Fluxograma esquemático da metodologia para obtenção do potencial teórico do RSU a partir de rota termoquímica.	61
Figura 18 Fluxograma esquemático da metodologia para obtenção do potencial teórico do esgoto.....	61
Figura 19 Fluxograma esquemático da metodologia para obtenção do potencial teórico do licor negro.....	63
Figura 20 Fluxograma esquemático da metodologia para obtenção do potencial teórico do carvão vegetal.	63

Figura 21 Fluxograma esquemático da metodologia para obtenção do potencial teórico a partir do uso direto do carvão vegetal.	64
Figura 22 Fluxograma esquemático da metodologia para obtenção do potencial teórico na recuperação dos gases de carbonização do carvão vegetal.....	65
Figura 23 Mapas de potencialidade teórica das biomassas residuais no Brasil, em PJ.ano ⁻¹	77
Figura 24 Potencial teórico da biomassa residual das florestas de eucalipto e pinus, em PJ.ano ⁻¹	78
Figura 25 Potencial teórico da vinhaça da produção de etanol de cana-de-açúcar, em PJ.ano ⁻¹	79
Figura 26 Potencial energético primário das excretas de bovinos, frangos e suínos, em PJ/ano.	80
Figura 27 Potencial energético primário de recuperação de RSU da digestão anaeróbia e incineração, em PJ.ano-1.	81
Figura 28 Mapas de potencial energético primário de esgoto urbano no Brasil.	83
Figura 29 Potencial energético primário do licor negro das indústrias de celulose e papel no Brasil, em PJ.ano ⁻¹	85
Figura 30 Mapas de potencial energético de carvão vegetal e gases de forno no Brasil.	86
Figura 31 Potencial teórico-técnico e capacidade instalada de resíduos de biomassa, em GW.	88
Figura 32 Análise de Pareto do Potencial Técnico Bioenergético de resíduos de biomassa, em GW.	89
Figura 33 Pareto com as contribuições de potencial teórico bioenergético nos estados, em PJ. ano-1.	89
Figura 34 Mapa de contribuição percentual estadual da potencialidade bioenergética no Brasil.....	90
Figura 35 Mapas com i) graduação do potencial teórico nos estados, em PJ. ano-1 e ii) composição por fonte.....	91
Figura 36 Potencial técnico bioenergético nos Estados, em MW.	91
Figura 37 Potencialidades teóricas e técnicas das biomassas estudadas, potência instalada atual de bioenergia e potência instalada nacional total, em GW.	92

Lista de tabelas

Tabela 1 Classificação da biomassa residual.	26
Tabela 2 Empreendimentos WTE que utilizam gás de aterro no Brasil.	37
Tabela 3 Indústrias de celulose no Brasil e suas respectivas capacidades instaladas, em mil t/ano.	41
Tabela 4 Tipos e critérios de conversão energética de biomassa.	45
Tabela 5 Nível de prontidão e Maturidade de diferentes tecnologias de conversão.	45
Tabela 6 Faixa de capacidade e eficiências típicas de diferentes tecnologias.	46
Tabela 7 Biomassas residuais avaliadas no estudo e respectivos parâmetros de análise.	53
Tabela 8 Parâmetros adotados para o cálculo de potencial teórico da vinhaça.	55
Tabela 9 Parâmetros adotados para o cálculo de potencial teórico de excretas.	57
Tabela 10 Composição gravimétrica média dos RSU no Brasil.	58
Tabela 11 Equações e restrições aplicadas à metodologia do estudo.	67
Tabela 12 Rotas tecnológicas de conversão energética assumidas para cada biomassa residual.	71
Tabela 13 Faixa de capacidade e eficiências típicas de diferentes tecnologias.	72
Tabela 14 Total de energia primária disponível por resíduo agrícola no Brasil.	77
Tabela 15 Total de energia primária disponível por resíduo agrícola no Brasil.	78
Tabela 16 Energia primária total disponível a partir de dejetos de bovinos, suínos e aves em 2020 no Brasil, em PJ.ano ⁻¹	80
Tabela 17 Energia primária de esgoto em to-dos os cenários, em PJ/Nm ³ .ano.	82
Tabela 18 Indústrias de papel e celulose no Brasil e suas respectivas capacidades, em mil t/ano, e potencial energético primário gerado, em PJ. Ano ⁻¹	84
Tabela 19 Potencial energético primário da carvoaria, em PJ.ano ⁻¹	86
Tabela 20 Potencial teórico e técnico das biomassas no Brasil, em 2020.	87

Lista de abreviaturas

Abegás	Associação Brasileira das Distribuidoras de Gás Canalizado
ABIB	Associação Brasileira das Indústrias de Biomassa
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABRELPE	Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais
ABTCP	Associação Brasileira Técnica de Celulose e Papel
AGV	Ácidos Graxos Voláteis
BIGCC	Gaseificador de Biomassa em ciclo combinado
CNA	Confederação da Agricultura e Pecuária do Brasil
CRC	Ciclo Rankine Convencional
DA	Digestão Anaeróbia
EFGT	Turbina a gás de queima externa
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
FAO	<i>Food and Agriculture Organization</i>
G/ICE	Gaseificador/motor de combustão interna
GCs	Gases Condensáveis
GEEs	Gases Efeito Estufa
GNCs	Gases Não Condensáveis
IBA	Instituto Brasileiro de Árvores
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IRENA	<i>International Renewable Energy Agency</i>
LCOE	<i>Levelized cost of electricity</i>
LFG	<i>Landfill gas</i>
NDC	Contribuição Nacionalmente Determinada
ORC	Ciclo Rankine Orgânico
PAM	Produção Agrícola Municipal
PDE	Plano Decenal de Expansão de Energia
PIB	Produto Interno Bruto
PNRS	Política Nacional de Resíduos Sólidos
PPM	Pesquisa da Pecuária Municipal

RECAI	<i>Energy country attractiveness index</i>
REDs	Recursos Energéticos Distribuídos
RSU	Resíduos Sólidos Urbanos
SIDRA	Sistema IBGE de Recuperação Automática
SIG	Sistema de Informação Geográfica
SIN	Sistema Interligado Nacional
SNIS	Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento
TFEC	<i>Total final energy consumption</i>
USD	<i>United states dollar</i>
UTE	Central Geradora Termelétrica
VPL	Valor Presente Líquido
WTE	<i>Waste-to-energy</i>

Lista de símbolos

%CH ₄	Percentual de metano no biogás gerado
%REC	Fator de recuperação de excretas
%VS _i	Percentual de sólidos voláteis nas excretas
A _f	Fator de disponibilidade anual
BPVS _i	Quantidade de biogás gerada a partir dos sólidos voláteis presentes
BTV	Geração média de biogás para cada m ³ de vinhaça
CO	Monóxido de carbono
CO ₂	Dióxido de carbono
E _{coleta de biogás}	Eficiência de coleta de biogás considerada
E _i	Diferentes frações de resíduos em peso
E _{mix}	Proporção de cana destinada à produção de etanol
E _{th}	Produtividade média do etanol, igual a 0,0833 m ³ .t ⁻¹ de cana
Fator de Utilidade	Representa a quantidade de energia contida nos gases que poderia ser efetivamente recuperada, como 10%
H ₂	Hidrogênio
H ₂ S	Sulfeto de hidrogênio
I _{BG}	Quantidade de biogás produzida considerada como 100 Nm ³ .t ⁻¹ de RSU
LN	Quantidade de licor negro gerada, em toneladas por ano
N ₂	Nitrogênio
Na ₂ S	Sulfeto de sódio
NaOH	Hidróxido de sódio
NH ₃	Amônia
O ₂	Oxigênio
P	Produção anual do cultivo, em t.
PCI _{carvão vegetal}	Poder calorífico inferior do carvão vegetal, em MJ. kg ⁻¹
PCI _{CH₄}	Poder calorífico do metano
PCI _i	PCI do resíduo
PCI _{licor negro}	Poder calorífico inferior do licor negro, 12,13 MJ. kg ⁻¹
PCI _{total}	PCI da mistura RSU
PTA _i	Potencial teórico da biomassa, em GJ

PTB _i	Potencial energético primário do licor negro das indústrias de celulose e papel no Brasil, em MJ.ano ⁻¹
PTCG _i	Potencial teórico dos gases de carbonização, em PJ. ano ⁻¹
PTCi	Potencial teórico do carvão vegetal, em MJ.ano ⁻¹
PTE _i	Potencial teórico de geração a partir das excretas da cultura animal <i>i</i> , em MJ.ano ⁻¹
PTM _i	Energia primária disponível em biogás
PT _{RSU_i}	Energia primária em RSU.
\dot{M}_{RSU}	Massa total das frações de RSU
PTS _i	Energia primária disponível a partir do biogás de esgoto, em MJ.ano ⁻¹
PTV _i	Potencial teórico de geração da vinhaça, em MJ.ano ⁻¹
Q _{carvão vegetal}	Quantidade de carvão disponível, em kg.ano ⁻¹
$\rho_{\text{água}}$	Densidade de 1 t. m ⁻³
Q _{celulose}	Produção anual de celulose, também em t.ano ⁻¹
Q _i	Quantidade de animais criados da cultura <i>i</i>
R _{mo}	RSO
RPR _i	Proporção resíduo-produto
TC	Quantidade de cana processada, toneladas.ano ⁻¹
TEC _i	Quantidade de excretas em toneladas produzidas por animal
TS	Quantidade de sólidos secos, em t.ano ⁻¹
V _{biogás}	Volume de biogás produzido (nos cenários de esgoto gerado, coletado ou tratado) em Nm ³ . dia ⁻¹
V _{esgoto}	Volume de esgoto (gerado, coletado ou tratado) em 1,000 m ³ . ano ⁻¹
VTE	Geração média de vinhaça para cada m ³ de etanol produzido

Sumário

Dedicatória

Agradecimentos

Resumo

Abstract

Lista de figuras

Lista de tabelas

Lista de abreviaturas

Lista de símbolos

Sumário

1 Introdução	15
1.1 Justificativa.....	17
1.2 Objetivo da Pesquisa	19
1.3 Conteúdo da Tese / Dissertação	19
1.3.1 Capítulo II	20
1.3.2 Capítulo III.....	20
1.3.3 Capítulo IV.....	20
1.3.4 Capítulo V	20
2 Revisão Bibliográfica.....	21
2.1 A transição energética no contexto mundial e nacional	21
2.2 A bioenergia no Brasil e no mundo.....	22
2.2.1 A classificação da biomassa residual	26
2.3 Tecnologias de conversão da biomassa.....	43
2.4 O Sistema de Informação Geográfica (SIG) e a distribuição espacial da biomassa	46
3 Metodologia	50

3.1	Potencial teórico da biomassa residual.....	52
3.1.1	Biomassa agrícola e florestal	52
3.1.2	Excretas de bovinos, suínos e galináceos.....	55
3.1.3	RSU e esgotos	57
3.1.4	Licor negro da Indústria de Papel e Celulose.....	62
3.1.5	Potencial energético da indústria de carvão vegetal	63
3.2	Potencial técnico da biomassa residual	70
4	Resultados e discussão	74
4.1	Potencial energético primário agrícola e florestal	74
4.1.1	Vinhaça	78
4.2	Potencial energético primário de excretas animais	79
4.3	Potencial energético dos RSU e esgotos	81
4.4	Potencial energético da indústria de papel e celulose	83
4.5	Potencial energético primário da recuperação energética do carvão vegetal e gases dos fornos.....	85
4.6	O potencial técnico da biomassa residual.....	87
5	Conclusões	93

CAPÍTULO - I

1 Introdução

Os impactos globais estão intrinsecamente ligados ao crescimento populacional e ao aumento da demanda energética (MANA et al., 2021). Fato é que a energia é o principal requisito para o desenvolvimento humano e a substituição de fontes não renováveis por alternativas com baixa emissão de carbono representaria uma mudança completa nos sistemas produtivos, de consumo e transporte de energia (BOUCKAERT et al., 2021).

As fontes de origem fóssil ainda se mantêm detentoras de maior parte do consumo energético mundial. Segundo Murdock et al. (2021), 80,2% da energia consumida mundialmente é de origem fóssil e apenas 11,2% provenientes de fontes renováveis. Ainda que este último tenha tido um acréscimo de 5% ao ano desde 2009 e que se tenha atingido, em 2020, a marca de 29% de capacidade instalada mundial em recursos renováveis, a maior parte ainda corresponde aos combustíveis fósseis. Neste sentido, a biomassa residual torna-se a principal ferramenta para alavancar o desenvolvimento sustentável em países emergentes (VUKAŠINOVIĆ; GORDIĆ, 2016).

Além das contribuições socioeconômicas locais, a biomassa é considerada uma alternativa sustentável para geração de energia elétrica. Ademais, há vantagens relacionadas às emissões de gases efeito estufa (GEE's), segurança energética e ao próprio desenvolvimento econômico. Nesse sentido, a extensão territorial brasileira permite que o seu potencial para produção de bioenergia seja considerado. Fato é que a diversidade e quantidade de oleaginosas, resíduos sólidos urbanos (RSU) e animais e permitem que este potencial seja elevado (DE SOUZA et al., 2021). A Associação Brasileira das Indústrias de Biomassa ABIB Brasil (2022) aponta uma estimativa de 967.005.044 mil ton/ano de resíduos provenientes do setor agroindustrial. O estudo indica que 1090 mil bep /dia já estão concentrados em unidades industriais e que esse montante pode chegar a 1,5 milhões de bep/dia até 2030.

Os RSU e esgotos, por sua vez, são importantes fontes bioenergéticas. No mundo, segundo a publicação do Banco Mundial, intitulado “What a Waste 2.0” (KAZA et al., 2018), são gerados anualmente cerca de 2,01 bilhões de toneladas de RSU, com projeção

de aumento para 3,40 bilhões até 2050. Nesse bojo, o Brasil figura como um dos países que mais gera RSU com seus mais de 200 milhões de habitantes produzindo em 2018, segundo a Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (ABRELPE, 2018), cerca de 79 milhões de toneladas de resíduos sólidos (ANTENOR; SZIGETHY, 2020). Em 2021, segundo esta Associação, este valor saltou para 82,5 milhões de toneladas/ano. Desse montante, apenas 59,5% teriam sido destinados a aterros sanitários, e 40,5%, cerca de 29,5 milhões de toneladas, despejados em aterros controlados e lixões sem qualquer tratamento adequado. No que se refere ao esgotamento sanitário no país, apenas 55% da população, cerca de 114,6 milhões de habitantes, detém acesso à rede de esgoto. E de acordo com o Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS, 2021), apenas 50,8% do total de efluentes gerados são tratados, sendo o restante a principal fonte poluidora dos corpos hídricos, e que poderiam ser recuperados para produção de biogás.

Quanto à indústria de papel e celulose, o Brasil se destaca no cenário mundial. Em 2018, produziu 21 milhões de toneladas de celulose, exportando 70% desse total (IBA, 2021). Quanto aos resíduos produzidos nas diversas etapas da produção de celulose, o licor negro tem papel fundamental na geração de energia elétrica para o próprio processo. Nesse sentido, a geração média anual de energia para consumo próprio foi de 4% entre os anos de 2010 a 2017 (ROSSATO, 2019). Entre os anos de 2015 a 2019, cerca de 8,7 milhões de TEP de bioeletricidade foram produzidas a partir do licor negro no Brasil (EPE, 2022a).

Outra fonte potencial de bioenergia no Brasil é a indústria de produção de carvão vegetal, principalmente para a indústria metalúrgica. Leme et al. (2021) apontam que o setor, responsável pela produção de ferro e aço, exige cerca de 21 GJ por tonelada de aço produzida. No mundo, sendo o carvão mineral a principal fonte energética do processo, o setor se responsabiliza por 7,2% das emissões de CO₂ globais – 1,91 ton CO₂/ton de aço (RITCHIE; ROSER, 2023; WORLD STEEL ASSOCIATION, 2022). No Brasil, a indústria siderúrgica conta com o uso do carvão vegetal, que se consagra como o maior produtor mundial desse insumo energético (LEME et al., 2021; FAOSTAT, 2022). Somente em 2020, dentre os 149 países, contabilizou 12% da produção mundial de carvão vegetal, o equivalente a 6,4 milhões de toneladas.

Dessa forma, sabendo que o consumo de energia elétrica poderá triplicar entre os anos de 2020 a 2050, e dada a abundância de recursos bioenergéticos no país, é necessário que este potencial seja quantificado em sua totalidade. Para tanto, o potencial da biomassa

pode ser avaliado a partir de três frentes: teórico, técnico e técnico-econômico. O potencial teórico considera a quantidade de biomassa máxima teórica disponível para geração de energia (HASSAN; WILLIAMS; JAISWAL, 2019). A partir do potencial teórico da biomassa, é possível obter a porção disponível para geração de energia considerando tecnologias de conversão e suas respectivas eficiências, i.e. potencial, técnico (DE SOUZA et al., 2021). O potencial técnico-econômico representa, além do potencial técnico, aspectos econômicos e financeiros, como preço de energia e custo-benefício (NADEL; SHIPLEY; ELLIOTT, 2004).

Para determinar os potenciais elencados, são seguidas três abordagens metodológicas. A abordagem focada em recursos visa determinar o potencial teórico e técnico a partir de dados estatísticos referentes aos usos do solo, resíduo por raio de produção e produtividade. É possível, também nesta metodologia, determinar o potencial teórico utilizando ferramentas de geoprocessamento. Outra abordagem é a orientada pela demanda, que visa a comparar a produção de energia entre tecnologias renováveis e não-renováveis, além de aspectos econômicos. Por último, a abordagem integrada, que envolve os dois métodos anteriores (BATIDZIRAI; SMEETS; FAAIJ, 2012).

Portanto, o presente trabalho busca propor uma metodologia para avaliação holística do potencial bioenergético a partir de resíduos, considerando as especificidades do Brasil quantificando a energia primária das biomassas agrícolas e florestais, de excretas de animais bovinos, suínos e galináceos, dos RSU, da indústria de papel e celulose e carvão vegetal. Também, a partir do potencial teórico, objetivou-se determinar os potenciais técnicos, caracterizados pela fração do potencial teórico convertida em potência elétrica, dadas as eficiências de conversão das respectivas tecnologias adotadas. Ademais, foram desenvolvidos mapas de potencialidade energética utilizando a ferramenta de geoprocessamento QGIS.

1.1 Justificativa

A transição energética compreende um conjunto de medidas orientadas pela descarbonização das matrizes energéticas mundiais. Isto significa dizer que todo o setor energético deverá se dedicar a transformar o cenário atual baseado, majoritariamente, em fontes energéticas de origem fóssil para aquelas renováveis, ou ‘carbono zero’ (IRENA, 2023). As determinações mundiais apontam que este movimento deverá ser feito até a

segunda metade deste século a fim de que a temperatura global varie apenas 1.5°C e as mudanças climáticas sejam ser mitigadas.

Neste sentido, foi proposto por IRENA (2023) um caminho para alcançar as metas do Acordo de Paris, isto é, mitigar as emissões em 36.9 GtCO₂ anualmente até 2050. São propostas seis rotas tecnológicas, em que a inserção de renováveis, eletrificação e a eficiência energética compreendem mais de 50% dos principais impulsionadores desta mudança. Portanto, considerando a abundância de Recursos Energéticos Distribuídos (REDs) a serem explorados no Brasil, bem como as oportunidades dada a sua extensão territorial, fica claro que o país pode se tornar um ator ainda mais importante neste processo.

Ainda que sua matriz de energia elétrica seja baseada em mais de 80% em energias renováveis e a matriz energética também tenha destaque frente ao cenário mundial, ainda existem recursos a serem explorados. O Plano Decenal de Expansão de Energia (PDE) 2031 indica uma estimativa de instalação de 2,1 GW de usinas termelétricas renováveis, onde 1,4 MW já estão contratados: 21 UTEs novas e 7 sendo ampliadas. Destas, 18 UTEs a bagaço de cana (666 W), 2 UTEs a licor negro (363 MW), 4 UTEs a cavaco/resíduos (297 MW) e 4 UTEs a biogás de RSU (33 MW). O Plano aponta ainda expansão de 300 MW de usinas de incineração de RSU ao subsistema Sudeste/Centro-Oeste. Ainda, no que se refere ao biometano obtido por meio da limpeza do biogás, oriundo da decomposição anaeróbia (DA) de matéria orgânica, o Programa Nacional de Biogás e Biometano da ABIOGAS indica que até 2027 a sua produção poderá chegar a $2,3 \times 10^6$ Nm³/dia, sendo o potencial de $1,0 \times 10^8$ Nm³/dia (SINIGAGLIA et al., 2022).

A este fato, une-se o Sistema de Informação Geográfica (SIG) que se apresenta como ferramenta importante na prospecção de potencialidades energéticas locais. Panichelli & Gnansounou (2008) apontaram que a viabilidade dos projetos de biomassa para geração de energia é fortemente influenciada pela sua localização geográfica. A produção e o transporte da biomassa representam uma parte considerável dos custos envolvidos na produção de bioenergia e o aspecto crucial é assegurar que o suprimento adequado de biomassa poderá atender à demanda energética de determinada usina de forma econômica (ZHAN et al., 2005). Os trabalhos publicados por Portugal-Pereira et al. (2015), Cervi et al. (2019), Dovichi Filho (2022), Costa et al. (2022) investigaram o potencial bioenergético de biomassas residuais de diferentes fontes em diferentes estados. No entanto, há que se estender a análise num contexto mais amplo destas potencialidades

nacionais, desde as fontes agrícola e florestal, passando pelas excretas animais, os RSUs e esgoto, pela indústria de papel e celulose e carvão vegetal.

É incontestável a necessidade de prospecção de potencialidades energéticas a partir da biomassa residual no Brasil. Portanto, o trabalho propõe-se apresentar metodologia para avaliação holística do potencial bioenergético a partir de resíduos. Esta, por sua vez, busca mapear e indicar estes valores, com fins de contribuir para estratégias em políticas públicas e alavancar o país como principal player mundial na transição energética.

1.2 Objetivo da Pesquisa

Quantificar o potencial teórico e técnico de resíduos agrícolas e florestais, excretas de animais bovinos, suínos e galináceos, dos RSUs e esgotos, das indústrias de papel e celulose e carvão vegetal no Brasil e desenvolver mapas de potencialidade utilizando a ferramenta de geoprocessamento SIG a partir dos valores teóricos calculados.

- Desenvolver revisão bibliográfica a fim de que seja avaliado o estado da arte da temática bioenergética no país.
- Levantar dados referentes a todos os cultivos e respectivos resíduos agrícolas e florestais, excretas de animais bovinos, suínos e galináceos, de RSUs, esgotos e das indústrias de papel e celulose e carvão vegetal do Brasil.
- Determinar o potencial energético teórico das biomassas selecionadas.
- Elaborar mapas de potencialidade a partir do potencial teórico utilizando a ferramenta de geoprocessamento QGIS 3.24.2 Tisler®.
- Definir tecnologias de conversão energética e respectivo rendimento e determinar o potencial energético técnico das biomassas.
- Definir potencial técnico das biomassas residuais a partir das eficiências das tecnologias selecionadas.

1.3 Conteúdo da Tese / Dissertação

Além do capítulo 1, apresentado anteriormente, e que contém a introdução, justificativa do estudo e objetivos geral e específicos, os seguintes capítulos são parte desta dissertação de mestrado.

1.3.1 Capítulo II

Neste capítulo é apresentada a revisão bibliográfica, onde é possível acompanhar o estado da arte da temática do presente estudo. Dessa forma, é discorrido sobre o cenário de transição energética nos contextos mundial e nacional, bem como o cenário de bioenergia no Brasil e no mundo. O setor agrícola e florestal é apresentado, assim como os cenários da pecuária, RSU, esgotos, indústria de papel e celulose e de carvão. As tecnologias de conversão energética da biomassa e o Sistema de Informação Geográfica (SIG) são apresentados.

1.3.2 Capítulo III

O capítulo III apresenta a metodologia empregada para o cálculo de potenciais teórico e técnico das biomassas residuais selecionadas. São apresentados, ainda, as restrições consideradas para realização dos cálculos. Importante salientar que os valores foram calculados para microrregiões e municípios, de acordo com a disponibilidade de dados fornecidos pelas plataformas institucionais.

1.3.3 Capítulo IV

Este apresenta os resultados e discussão do estudo. Isto é, são apresentados os resultados com os potenciais energéticos calculados e respectivos mapas de potencialidade de cada fonte de biomassa residual. Também, são apresentados gráficos onde é possível identificar os maiores potenciais bioenergéticos do país.

1.3.4 Capítulo V

Neste último está a conclusão do estudo e recomendações para estudos futuros.

CAPÍTULO - II

2 Revisão Bibliográfica

2.1 A transição energética no contexto mundial e nacional

A transição energética refere-se a uma mudança de fontes de energia tradicionais, como combustíveis fósseis, para fontes de energia renováveis, como energia eólica, solar, hidrelétrica e biomassa. Neste sentido, é impulsionada por uma combinação complexa de fatores econômicos, ambientais e políticos, incluindo a necessidade de abordar a mudança climática e melhorar a segurança energética (ERRERA et al., 2023). Nos últimos anos, o movimento de transição energética ganhou maior atenção globalmente e no Brasil, à medida em que os países buscam reduzir a sua dependência em combustíveis de origem fóssil para fontes mais limpas.

Corrêa (2021) explora a transição energética a partir de vários ângulos, incluindo os direcionadores políticos e econômicos, os aspectos tecnológicos e de inovação e as implicações sociais e culturais. Ainda, destaca a importância da liderança política na transição energética e argumenta que o sucesso da transição dependerá da capacidade dos governos de criar as condições que apoiem o investimento em energia renovável.

As medidas para controle dos impactos gerados a partir das mudanças climáticas são, em sua maioria, resultantes de acordo internacionais, como promovido pela Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre a Mudança do Clima (NOVAES, 1992). Em seguida, o Protocolo de Kyoto, em 1997, e o Acordo de Paris, em 2015, determinaram novas metas para diminuição de emissões e da temperatura global (WITTMAN; POWELL; CORBERA, 2015). Em 2022, a COP27 apontou que as chances da temperatura global se manter abaixo dos 1,5°C são duvidosas, com projeções de investimentos da ordem de US\$ 500 bilhões até 2030 (USMAN, 2022).

No contexto brasileiro, a transição energética também ganhou atenção significativa nos últimos anos. O país busca reduzir sua dependência de combustíveis fósseis e ampliar o uso de energia renovável, possuindo a maior participação em energias renováveis em consumo de energia total final (TFEC) do mundo (MURDOCK, 2021). Este fato é consequência de uma matriz energética e elétrica predominantemente

renovável, com valores de 48,4% e 84,8%, respectivamente, havendo retração na oferta de fontes não renováveis (EPE, 2021^a). Ainda assim, segundo a Contribuição Nacionalmente Determinada (NDC) (BRASIL, 2023), possui metas para reduzir emissões de GEEs em 50% abaixo dos níveis de 2005.

Nos últimos anos, diversos estudos exploraram o potencial das energias renováveis no Brasil e as ambições do país para a transição energética. Lopes & Silva (2021) analisam o setor energético brasileiro e o potencial das energias renováveis para desempenhar um papel importante na matriz energética do país. Os autores destacam os benefícios da transição energética para o Brasil, incluindo maior segurança energética, redução das emissões de gases de efeito estufa e melhor acesso à energia para populações carentes. Gouvêa (2019) fornece uma visão geral do setor renovável no Brasil e o progresso do país em relação às suas metas. O estudo destaca os principais desafios e oportunidades enfrentados pelo setor de energia renovável no país, o que inclui a necessidade de desenvolver estruturas regulatórias, expandir a infraestrutura e melhorar o ambiente de investimento. Ademais, fornece recomendações para formuladores de políticas sobre como apoiar o crescimento do setor de energia renovável e alcançar as ambiciosas metas do Brasil para a transição energética.

Ao final de 2021, mais de 256 gigawatts (GW) foram adicionados para fontes de energia renováveis em todo o mundo (MURDOCK, 2021). E segundo o *Renewable Energy Country Attractiveness Index* (RECAI) (EY, 2021), o Brasil ocupa o 14º lugar dentre os 40 maiores mercados do mundo em atratividade em energias renováveis. Fato é que, em 2023, da entrada de 1280,2 MW em operação, 871,9 MW foram advindos de fonte eólica e 361,1 MW de usinas fotovoltaicas – um total de 83,42% das usinas oriundas de fontes renováveis (ANEEL, 2023).

Portanto, o Brasil possui metas ambiciosas para a expansão de energia renovável e está bem-posicionado para desempenhar um papel importante na transição energética global. Embora existam desafios, especialmente regulatórios, o país detém base sólida para o crescimento deste setor, além de uma riqueza de recursos renováveis a serem explorados.

2.2 A bioenergia no Brasil e no mundo

A bioenergia emerge como uma importante fonte de energia renovável global, com significativo potencial para contribuir para a transição para um sistema energético de

baixo carbono. Segundo Errera et al. (2023), a projeção até 2050 é de que a oferta global deste recurso aumente em até seis vezes, correspondendo hoje a 55,6 EJ – 10% da energia primária da matriz energética mundial.

Segundo Bauer et al. (2017), a tendência, levando em consideração os caminhos cujas economias estão traçando, é que haja um aumento de áreas agrícolas para usos de bioenergia. Este fato é atrelado ao desafio de se garantir a segurança energética global à luz da sua sustentabilidade (DE SOUZA et al., 2021). Alternativas como a recuperação de áreas de pastagens degradadas a partir de culturas voltadas para bioenergia são formas de atribuir usos adequados a estas áreas, ampliando ainda mais a oferta desta fonte (NOGUEIRA; CAPAZ; LORA, 2021).

No contexto mundial, a oferta de bioenergia vai de encontro a questões como a segurança alimentar. Ainda que seja uma alternativa com balanço líquido de carbono negativo, a área necessária para este aumento da oferta a partir de culturas energéticas é questionável (ERRERA et al., 2023). As projeções apresentadas por Dias et al. (2021) apontam para a possibilidade do atendimento da demanda energética e alimentar utilizando áreas de terra disponíveis para a bioenergia.

O Brasil, o maior produtor mundial de cana-de-açúcar, tem uma longa história de produção de bioenergia e é um *player* significativo na indústria. O Plano Decenal de Expansão de Energia 2032 aponta que o aproveitamento energético a partir da biomassa residual da cana-de-açúcar é destinada ao autoconsumo e despacho ao SIN (EPE, 2023). Ainda, de acordo com o Plano, em setembro de 2022 o setor atingiu capacidade de geração de 12,2 GW, 30% superior à de 2016. Quanto ao potencial de biogás e biometano, este pode atingir a marca de 35 e 19,2 bilhões de Nm³, respectivamente, até 2035. Ainda que sejam aplicadas restrições na análise de sensibilidade do estudo, como considerar apenas insumos de vinhaça e torta de filtro – 1,8 bilhão de biometano -, a produção de bioeletricidade seria suficiente para suprir 20% da demanda de diesel A dos setores agrícola e pecuário, fazendo com que estes se tornem autossuficientes. Outras matérias-primas potenciais para a produção de bioenergia no Brasil incluem milho, soja e sorgo (ERRERA et al., 2023).

Uma das vantagens da produção de bioenergia no Brasil é a disponibilidade de terras para a agricultura. Um estudo conduzido pelo IBGE e coordenado pela EMBRAPA Solos, divulgou a Macrocaracterização dos Recursos Naturais do Brasil apresentando mapas de potencialidade agrícola natural das terras (IBGE, 2022a). A partir da aplicação

de shapefiles com respectivas restrições pedológicas e de uso de terras – áreas de proteção, preservação e conservação ambiental, entre outros aspectos -, o estudo apontou para uma distribuição percentual de todo o solo brasileiro para terras com muito boa e boa potencialidade ao desenvolvimento agrícola, cerca de 193.733 km² (2%) e 2.521.400 km² (29,6%), respectivamente. Em 2020, segundo (IBGE, 2022b), 770.000 km² de lavouras temporárias foram colhidos e a safra de cereais, leguminosas e oleaginosas do Brasil em 2022 foi de 263,2 milhões de toneladas. Isso sugere que existe um potencial significativo para expandir a produção de bioenergia no Brasil sem invadir as terras agrícolas existentes.

Uma abordagem para maximizar o potencial de produção de bioenergia e minimizar seu impacto na produção de alimentos é focar na utilização de terras marginais que não são adequadas para cultivos de alimentos. A Embrapa estima que o Brasil tenha aproximadamente 62 milhões de hectares de terras degradadas que poderiam ser utilizadas para a produção de bioenergia, sem competir com a produção de alimentos (ALBUQUERQUE et al., 2022a). Isso inclui áreas de pastagens degradadas, que poderiam ser restauradas e utilizadas para cultivos energéticos como a cana-de-açúcar, bem como áreas de florestas degradadas, que poderiam ser utilizadas para a produção de biocombustíveis a partir de biomassa lenhosa.

O potencial de bioenergia do Brasil a partir da biomassa residual foi estudado por diversos autores. Salomon & Lora (2009) estimaram o potencial de geração de biogás a partir de diversos resíduos orgânicos no Brasil – RSU e líquidos, resíduos da indústria sucroalcooleira e esterco de gado. Os resultados apontaram que o país detém potencial de geração de eletricidade a partir do biogás por meio de DA destes resíduos num valor de 1,05 a 1,13GW. A geração de eletricidade anual calculada no estudo para microturbinas de 30 kW e eficiência de 27% e motor gerador com eficiência de 29%, respectivamente, foram de 819,21 MW/879,96 MW para vinhaça, 199,59MW/214,37 para aterros, 12,74 MW/13,68 MW para estações de tratamento de esgoto, 19,68 MW/21,13 MW para esterco bovino, 3,56 MW/3,83 MW para esterco suíno.

Portugal-Pereira et al. (2015) avaliaram o potencial técnico-econômico de resíduos agrícolas e agroindustriais - cana-de-açúcar, soja, milho e arroz - para geração de energia elétrica por combustão direta a partir de uma abordagem integrada. O estudo contou com geoprocessamento GIS e ferramentas de sistemas de informação estatística. Os resultados

apontaram um potencial de geração sustentável de 141 TWh/ano nas regiões Sul, Sudeste e Centro-Oeste.

Ferreira et al. (2018) apresentaram uma revisão do potencial energético da biomassa agroflorestal, industrial, pecuária e de resíduos sólidos urbanos para produção de biogás e geração de eletricidade. Os resultados para o potencial energético do Brasil a partir dos resíduos da cana-de-açúcar, milho, soja e mandioca foram de 1.684,53 GWh/ano, 407,38 GWh/ano, 370,87 GWh/ano e 152,57 GWh/ano, respectivamente. Cervi et al. [2019] avaliaram o potencial de bioeletricidade da palha de cana-de-açúcar disponível no estado de São Paulo para a safra de 2012. Utilizando uma abordagem espacialmente explícita, estimam-se valores entre 18,7 e 45,8 TWh - valor correspondente a 22-37% da demanda de energia elétrica do estado.

Silva et al. (2021) analisaram econômica e energeticamente a produção de energia a partir da casca de arroz no Brasil. Os dados coletados foram de todas as regiões do país com o objetivo de avaliar a área mínima para geração de energia através da casca. A área mínima de plantio necessária para garantir a viabilidade econômica avaliada é de 700 a 26.700 ha, e o LCOE variou de 53,71 a 164,94 USD/MWh, com média de 112,2 USD/MWh. O autor também apresenta que, em um cenário otimista, o potencial dessa biomassa poderia ser de 2,5 TWh/ano - 5% da bioenergia produzida no Brasil. De Souza et al. (2021) quantificaram os potenciais teórico, técnico e técnico-econômico dos resíduos agrícolas e florestais no Brasil até 2050.

Costa et al. (2022) avaliaram o potencial de geração de eletricidade a partir de palha de arroz, cana-de-açúcar e casca de café. Considerando a combustão direta como tecnologia de conversão, resulta um potencial total gerado de 15 GW (105,1 TWh/ano) a partir desses três resíduos, sendo cerca de 90% provenientes da cana-de-açúcar. A região Sudeste apresentou o maior potencial para o cultivo de cana-de-açúcar e café, enquanto o maior potencial para o cultivo de arroz está localizado principalmente nas regiões Sul e Centro-Oeste do país.

Segundo o PDE 2031 (EPE, 2022b), está previsto que 2,1 gigawatts (GW) serão instalados em usinas termelétricas a partir de fontes renováveis. Desse total, 1,4 GW já foram contratados (21 usinas novas e 7 ampliadas). São 18 usinas que utilizam bagaço de cana (666 MW), 2 usinas que utilizam licor negro (363 MW), 4 usinas que utilizam cavacos/resíduos (297 MW) e 4 usinas que utilizam biogás de resíduos sólidos urbanos (33 MW). As usinas renováveis contratadas estão localizadas principalmente na região

Sudeste, principalmente ligadas ao cultivo de cana-de-açúcar, mas também estão presentes nas regiões Nordeste, Centro-Oeste e Sul. Em relação às expansões previstas, estão propostas 400 MW de usinas de bagaço de cana e 300 MW de usinas de incineração de resíduos sólidos urbanos, totalizando 700 MW no subsistema Sudeste/Centro-Oeste.

Portanto, o Brasil tem um potencial significativo para a produção de bioenergia, com abundância de recursos naturais e terras disponíveis para agricultura. Importante salientar que a integração da bioenergia na NDC do Brasil é uma forma de promover a produção sustentável de bioenergia e auxiliar o país a atingir suas metas climáticas.

2.2.1 A classificação da biomassa residual

Os recursos da biomassa incluem materiais orgânicos de colheitas, resíduos florestais, plantas aquáticas, resíduos agrícolas, estrume e rejeitos (BATIDZIRAI; SMEETS; FAAIJ, 2012). De acordo com Hoogwijk et al. (2003), a base de recursos de biomassa pode ser dividida em quatro níveis inter-relacionados: recursos primários, resíduos primários, resíduos secundários e recursos de resíduos terciários. A classificação correspondente da FAO (2004) é: recursos diretos (culturas energéticas e subprodutos), indiretos (subprodutos) e de reciclagem (materiais de uso fina) (Tabela 1).

Tabela 1 Classificação da biomassa residual.

Recurso	Categoria	Fonte	Descrição
Agrícola (biomassa lenhosa, plantas, frutas, sementes)	Primária/direta	Cultivos energéticos	Recursos advindos de culturas energéticas em áreas agrícolas excedentes ou de recuperação de áreas degradadas.
		Coprodutos	Resíduos provenientes diretamente da prática da atividade agrícola, como resíduos de colheita (palha, casca, caules).
	Secundária/indireta	-	Resíduos do beneficiamento/processamento destes produtos agrícolas.
	Terciária/Recuperada	Materiais de uso final	Resíduos sólidos urbanos (resíduos orgânicos domésticos, industriais, lodos).

Florestais (biomassa lenhosa)	Primária/direta	Plantações ou florestas naturais	Biomassa proveniente de florestas, plantações, pomares. Excesso de biomassa retirado de florestas.
		Coprodutos	Resíduos de corte provenientes de colheitas e subprodutos de manejo florestal.
	Secundária/indireta	-	Resíduos do beneficiamento da madeira da indústria (serragem, casca, licor negro).
	Terciária/recuperada	-	Resíduos de madeira provenientes de ambientes urbanos (madeira de demolição, resíduo de embalagem, móveis).

Fonte: Adaptado de Hoogwijk et al. (2003).

2.2.1.1 Agrícola e florestal

O Brasil é líder global na produção de resíduos de biomassa florestal e agrícola. Os resíduos florestais incluem cavacos de madeira, serragem e cascas. Amorim et al. (2021) indicam que o setor florestal pode gerar resíduos desde a sua colheita até o produto final e que 63% destes resíduos podem ser destinados à geração de energia elétrica. Oro (2015) apontou uma geração de 30 milhões de toneladas de resíduos de madeira, sendo 91% deste montante oriundo da indústria florestal. Como visto, a maioria desses resíduos é gerada durante a extração e processamento da madeira, e sua utilização para a produção de energia pode ajudar a reduzir as emissões de gases de efeito estufa da indústria florestal.

Além dos resíduos florestais, o Brasil também produz quantidades significativas de resíduos de biomassa agrícola. Esses resíduos incluem resíduos de culturas, como bagaço de cana, casca de arroz e palha de milho. A projeção da ABIB é que em 2030 o potencial de energia primária dos resíduos agrícolas seja de 8,9 milhões bep/dia, considerando recuperação a partir das rotas tecnológicas ideais. A Tabela 2 apresenta, em toneladas, o montante de resíduos gerados a partir das culturas prospectadas pela ABIB na safra 2021-2022.

Tabela 2 Resíduos gerados a partir das culturas agroindustriais no Brasil, em t.

Cultura	Biomassa	Safra 2021/2022 [t]
Algodão herbáceo	Caroço	6.600.000

Amendoim	Casca e palha	692.300
Arroz	Palha e casca	20.600.000
Cacau	Casca	224.168
Café	Casca e pergaminho	3.400.000
Cevada/malte	Bagaço e palha	453.300
Coco verde	Casca	3.508.850
Feijão	Palha	3.200.000
Milho	Palha	111.900.000
Soja	Palha	116.200.000
Trigo	Palha	7.700.000
Cana-de-açúcar	Bagaço e palha	1.192.200.000
Açaí	Caroço	1.698.657
Castanha do pará	Casca	32.000
Coco babaçu	Casca	47.706
Dendê	Casca	395.000
Fruticultura laranja	Bagaço	15.300.000
Fruticultura uva	Bagaço	1.500.000
Capim elefante	-	202.500
Sorgo	-	2.661.900
Mandioca	-	24.500.000

Fonte: Adaptado de ABIB BRASIL (2022).

O bagaço da cana-de-açúcar, como visto na tabela anterior, é uma fonte particularmente significativa de biomassa agrícola no Brasil. O país é o maior produtor mundial de cana-de-açúcar e, segundo a Companhia Nacional de Abastecimento CONAB (2022), a safra de 2022/23 poderá chegar a 572,9 milhões de toneladas produzidas. Este podendo ser utilizado como matéria-prima para a produção de bioeletricidade ou como fonte de matéria-prima lignocelulósica para a produção de biocombustíveis.

Segundo a CNA (2021), ainda no ano de 2020, a soma de serviços e bens gerados pelo agronegócio foi de R\$ 1,98 trilhão, equivalente a 27% do PIB brasileiro. A fração agrícola correspondia a 70%. No que diz respeito à produção agrícola do país, o impacto global é ainda maior. Costa et al. (2022) apontam a importância da produção de commodities agrícolas do Brasil no mundo. Dados do IBGE (2022b) para lavouras temporárias mostraram que no ano de 2020, a área colhida foi de 77.730.130 hectares, com um total de 1.048.682.632 toneladas produzidas. As culturas com maior participação na área colhida foram soja, milho e cana-de-açúcar (Figura 1). Porém, em relação à quantidade produzida, a cana-de-açúcar detém 74% (Figura 2).

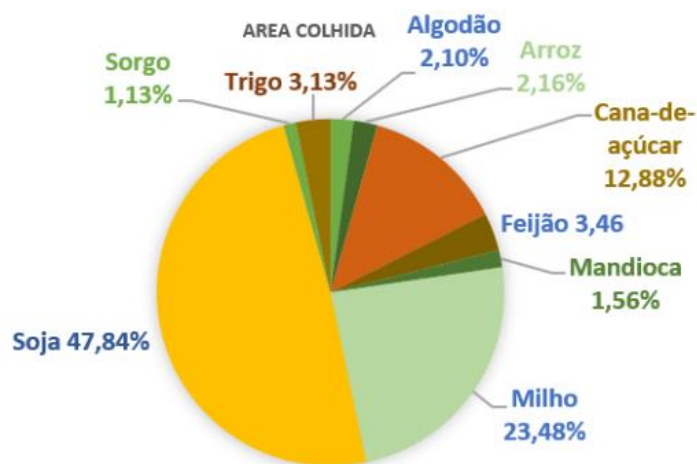


Figura 1 Área colhida de lavouras temporárias e permanentes em 2020.
Fonte: IBGE (2022b).

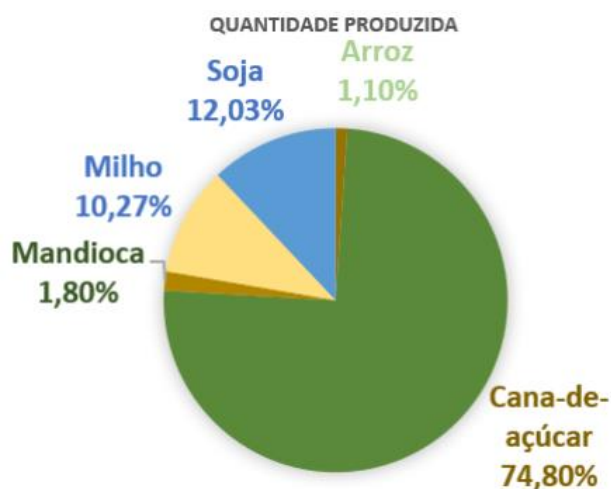


Figura 2 Quantidade produzida de lavouras temporárias e permanentes em 2020.
Fonte: IBGE (2022b).

A utilização de resíduos de biomassa florestal e agrícola para a produção de energia no Brasil tem o potencial de contribuir significativamente para a matriz energética do país, ao mesmo tempo em que reduz as emissões de gases de efeito estufa. No entanto, o uso sustentável desses resíduos é essencial para garantir que seu uso não contribua com o desmatamento ou outros impactos ambientais. Além disso, políticas e regulamentações são necessárias para promover o desenvolvimento da infraestrutura e tecnologias necessárias para sua utilização.

2.2.1.2 Vinhaça

A vinhaça é um subproduto da produção de etanol que é gerado em grandes quantidades e normalmente é descartado em estações de tratamento de esgoto ou lagoas

a céu aberto. Essa vinhaça, por sua vez, detém alto potencial poluidor, sendo considerada resíduo sólido pela ABNT NBR 10.004 (ABNT, 2004). Nadaleti et al. (2020) ainda exemplifica que a vinhaça produzida numa usina de processamento de 120m³ de etanol poluiria o equivalente ao esgoto gerado por 270 mil habitantes. No entanto, estudos recentes têm demonstrado o potencial da vinhaça como fonte de energia, especificamente na produção de biogás e energia elétrica (PARSAEE et al., 2019; USP, 2023).

A Figura 3 apresenta o processo de obtenção de etanol a partir da cana-de-açúcar, onde a vinhaça pode ser coletada. Cerca de 75% das destilarias nacionais utilizam o processo Melle-Boinot, cujas células de levedura podem ser recicladas. De maneira simplificada, após a extração do caldo, é realizado um processo de sulfitação enriquecendo os produtos com compostos de enxofre e espécies de sulfatos. Logo após o processo fermentativo, o suco proveniente desta etapa segue para uma corrente de produção de etanol – decapagem, destilação e peneiras moleculares –, gerando a vinhaça (Reis; Hu, 2017).

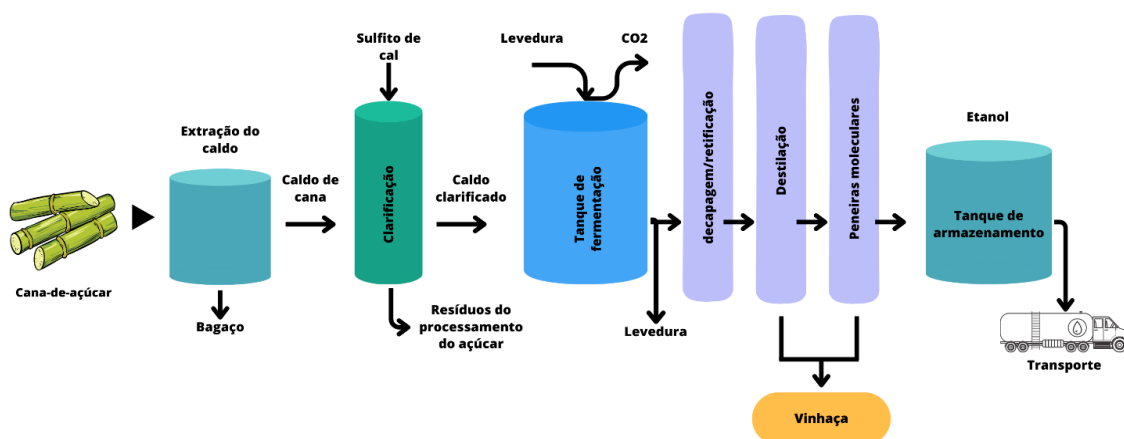


Figura 3 Processo de geração da vinhaça a partir da produção de etanol.
Fonte: Adaptado de Parsaee et al. (2021).

Parsaee et al. (2019) aponta que são produzidos cerca de 22.4 gígalitros de vinhaça em todo o mundo com potencial de produção de 407,68 gígalitros de biogás. No Brasil, este potencial estimado a partir de dados de 2019 é de 39,8 bilhões de m³ ao ano a partir do setor sucroalcooleiro e considerando a palha, bagaço, vinhaça e torta de filtro (NOGUEIRA; CAPAZ; LORA, 2021). E, de acordo com a EPE (2020), até 2030 este valor poderá ser de até 6,9 bilhões de m³ de biogás produzidos a partir da vinhaça de torta de filtro. De acordo com a revisão da literatura realizada pelo autor, o potencial

bioenergético da vinhaça pode ser atribuído ao seu alto teor orgânico, principalmente na forma de ácidos graxos voláteis (AGVs) e açúcares, que podem ser facilmente metabolizados por microrganismos em processos de digestão anaeróbia para produção de biogás.

Castro (2019) apresenta uma metodologia para estimativa do potencial de geração de energia elétrica a partir da vinhaça, com resultados semelhantes. Considerando um mix de 50% de uso da cana-de-açúcar para a produção de etanol, uma produtividade média de 1 m³ de etanol a cada 12 toneladas de cana esmagadas e uma geração de 11,5 m³ de vinhaça por m³ de etanol produzido, tem-se que uma tonelada de cana processada gera 0,48 m³ de vinhaça (CASTRO, 2019). Segundo esta metodologia, a biodigestão de 1 m³ de vinhaça produz em média 12,6 Nm³ de biogás com um teor de 60% de metano.

Com base nesses dados, partindo-se da produção de 757,1 milhões de toneladas de cana-de-açúcar obtida na safra de 2020 e considerando 50% destinada à produção de etanol, tem-se uma geração de 31,5 milhões de metros cúbicos de etanol e 362,8 milhões de metros cúbicos de vinhaça. A biodigestão desta vinhaça permitiria a produção de 4.571 milhões de Nm³ de biogás, com 60% de metano e potencial teórico de geração de 3,1 GW.

Vários estudos têm mostrado que a digestão anaeróbica da vinhaça pode produzir altas taxas de produção de biogás e teor de metano, tornando-se uma matéria-prima promissora para a produção de biogás. Por exemplo, um estudo de Pereira et al. (2020) identificou que a vinhaça é um subproduto com alto potencial bioenergético. A partir do cálculo do potencial energético por meio da DA, o resultado apontou para um potencial de 0,659 TWh ao ano somente no estado de São Paulo. Ainda,

Silva Neto & Gallo (2021) comparam, em termos energéticos, de custo e emissão de GEEs, o potencial do biogás gerado a partir da vinhaça a partir de DA com usinas a óleo diesel. Os resultados do estudo apontam que i) plantas de geração de energia a partir de fontes fósseis custam mais do que o plantas a biogás ii) o biometano da vinhaça pode substituir do uso de gás natural no estado de São Paulo a partir de programas de incentivo – proposto pelos autores –, ao mesmo tempo em que promove a redução de GEEs iii) custo de US\$ 1 milhão. ano⁻¹ recuperados a partir do uso de biogás e biometano da vinhaça e 6,7 milhões de toneladas de CO_{2e} ao ano evitados no país.

Nadaleti et al. (2020) indicam que o potencial nacional de geração de metano a partir dos cultivos voltados para produção de etanol foi de 35 milhões de $\text{m}^3.\text{d}^{-1}$ considerando as 377 plantas de etanol registradas. Quanto às usinas autônomas e anexas¹, esse potencial é de 1,88 milhão de $\text{m}^3.\text{d}^{-1}$ e 3,34 milhões de $\text{m}^3.\text{d}^{-1}$, respectivamente. As usinas anexas apresentaram maior potencial de geração de energia elétrica – $2,15 \times 10^8$ $\text{kWh}.\text{d}^{-1}$. A análise econômica apontou VPL positivo, ou seja, possibilidade real de ganhos e de retorno financeiro.

Nesse sentido, a revisão da literatura sugere que a vinhaça tem um potencial bioenergético significativo que pode ser aproveitado por processos de digestão anaeróbia. Os estudos apontam para uma viabilidade econômica nos projetos onde a vinhaça é recuperada energeticamente. Ademais, a sua destinação para geração de energia elétrica entra em consonância com as diretrizes de transição energética e redução das emissões de GEEs, visto o seu alto potencial poluidor.

2.2.1.3 Pecuária: excretas animais

O Brasil é o maior exportador mundial de carne bovina, de aves e suína. O levantamento realizado pela Pesquisa da Pecuária Municipal (PPM, 2022), divulgado pelo IBGE, apresentou um rebanho bovino de 224,6 milhões de cabeças, 42,5 milhões de suínos e 255,6 milhões de galinhas² (Figura 4). Fato é que de seus 850 milhões de hectares, mais de 350 milhões são ocupados para o uso dessas atividades e representam 5.073.324 estabelecimentos (IBGE, 2023).

¹ Usinas com destilarias anexas produzem açúcar e etanol e com destilarias autônomas produzem somente etanol (Novacana, 2023).

² Importante salientar que a variável galináceo compreende o efetivo total da espécie, i.e. galos, frangos, frangas e pintos.

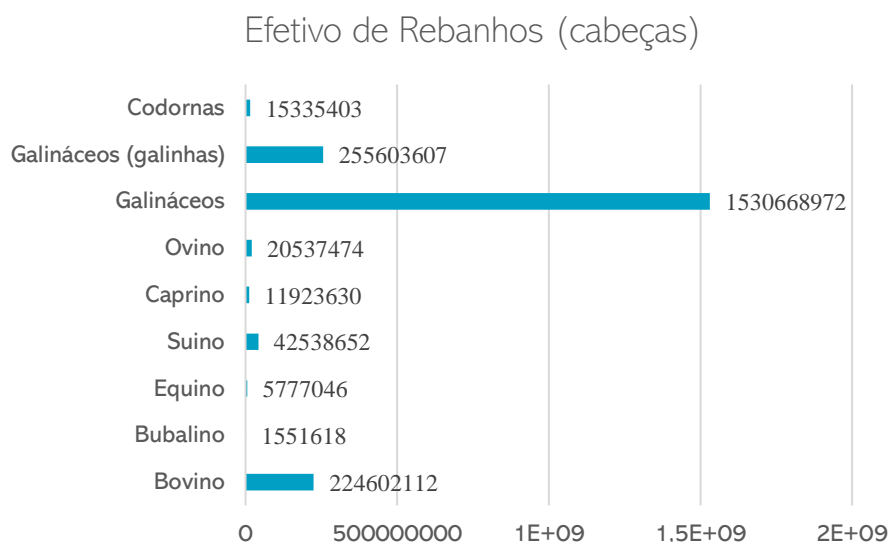


Figura 4 Efetivo de rebanhos no Brasil, por tipo (cabeças).
 Fonte: Adaptado de IBGE (2023).

Isso leva à produção de uma grande quantidade de efluentes, que podem ser convertidos em biogás por meio da DA, processo biológico que ocorre na ausência de oxigênio. A DA, por sua vez, é uma forma de realizar a conversão desses resíduos. O processo envolve microorganismos que quebram a matéria orgânica nas excretas, produzindo metano e dióxido de carbono como subprodutos. A quantidade de metano produzida dependerá de fatores como a quantidade de sólidos voláteis presentes, o pH, a temperatura e a composição microbiana das excretas (KOUGIAS; ANGELIDAKI, 2018). Portanto, o biogás produzido é composto por frações majoritárias de metano (CH_4), cerca de 40% a 60%, e dióxido de carbono (CO_2), além de amônia (NH_3), sulfeto de hidrogênio (H_2S), hidrogênio (H_2), oxigênio (O_2), nitrogênio (N_2) e monóxido de carbono (CO) (NKUNA; OLWAL; CHOWDHURY, 2022).

É importante salientar que a quantidade de metano a ser produzida pelas excretas de animais depende de uma variedade de fatores. Isto é, o tipo animal e sua espécie (raça de gado ou tipo de frango, por exemplo), a composição dos excrementos e as condições sob as quais essas excretas são armazenadas e processadas (CANTRELL et al., 2008). No entanto, em geral, as excretas de animais de criação, como galináceos, bovinos e suínos, têm potencial para produzir quantidades significativas de metano. A quantidade de metano produzida por tonelada de excremento de animais é variável, mas pode ficar tipicamente entre 200 e 400 Nm^3 por tonelada de excretas (MEYER; EHIMEN; HOLM-NIELSEN, 2018). É importante notar que este cálculo é baseado na suposição de que as excretas são processadas em condições ideais, o que nem sempre pode ser o caso na

prática. De modo geral, dependendo das condições, uma granja com capacidade para 100 mil aves, ou uma fazenda com mil cabeças de gado, poderiam produzir entre 20 mil e 40 mil metros cúbicos de metano por ano.

Quanto aos galináceos, a porcentagem de excreta de frango que pode ser coletada e utilizada para produzir biogás depende de vários fatores. Estes são o tipo de galináceo, as condições sob as quais a excreta é produzida e armazenada e os métodos usados para coletar e processar a excreta. Em granjas avícolas modernas e bem administradas, é possível coletar e utilizar até 80-90% do total de excretas produzidas. Isso pode ser feito a partir do uso de poços ou lagoas para armazenamento de excretas e métodos mecânicos ou manuais para a coleta.

No entanto, em muitas fazendas tradicionais e de pequena escala, a coleta e o uso de excretas para a produção de biogás podem ser limitados. Por exemplo, se os animais puderem andar livremente, pode ser difícil coletar os excrementos (KELLOGG; MOFFITT; GOLLEHON, 2014). Além disso, se os excrementos não forem armazenados de forma a permitir uma coleta eficiente (como em campos abertos ou espalhados em pequenas pilhas) ou não forem manuseados adequadamente, podem não ser adequados para a produção de biogás. É importante notar que, além das excretas de frango, outros fluxos de resíduos orgânicos (tais como a chamada “cama de frango”, uma mistura de serragem e palha de arroz, urina e fezes) podem ser adicionados ao reator de biogás para aumentar a biomassa disponível e a produção de biogás.

Diversos estudos relataram o desempenho de sistemas de DA usando diferentes tipos de resíduos de gado, incluindo resíduos de bovinos, suínos e aves. Por exemplo, Castro et al. (2022) avaliaram os impactos de geração de biogás a partir de resíduos da bovinocultura de leite. O estudo apontou que a utilização de biodigestores no tratamento dos resíduos bovinos diminuiu o seu impacto ambiental, além de poderem ser recuperados energeticamente. Da Silva et al. (2020) aponta que os digestores anaeróbios, por conseguirem reduzir a emissão de GEEs e gerar créditos de carbono a partir de negociações no mercado de carbono internacional, são amplamente difundidos.

A recuperação energética do biogás é apresentada por Esswein Junior (2020). Segundo o autor, o acoplamento de inversor ao motorizador de combustão interna, e podendo atingir eficiência de até 40%, pode viabilizar projetos a partir desta fonte, garantindo retorno financeiro em oito anos. Ainda, contribuiria para o não-ilhamento de áreas rurais. Pinto et al. (2023) avalia teoricamente a geração de energia elétrica a partir

do biogás gerado por codigestão de excretas bovinas e suínas, além da análise de viabilidade técnica-econômica e de compensação de GEEs. A pesquisa aponta que o projeto de usinas passa a ser viáveis a partir de 1.410 cabeças de gado e 2.350 cabeças de suínos, gerando uma vazão de $163,41 \text{ m}^3 \cdot \text{dia}^{-1}$ de metano e potencial energético de $128 \text{ MWh} \cdot \text{ano}^{-1}$.

É possível apontar, portanto, que a recuperação das excretas animais para fins bioenergéticos pode apresentar benefícios ambientais e econômicos. Isto é, reduzir as emissões de GEEs do armazenamento e decomposição de estrume, na melhoria das práticas de gestão de resíduos e fornecimento de fonte de energia renovável e sustentável. Além disso, o uso de biogás para geração de eletricidade e calor pode fornecer renda adicional para agricultores e comunidades rurais (ALBUQUERQUE et al., 2022b).

2.2.1.4 RSU e esgoto

O Brasil é o quinto maior país do mundo em população e área, gerando quantidades significativas de RSU todos os anos. O gerenciamento adequado desses resíduos é essencial haja vista a prevenção da poluição ambiental e melhoria e manutenção da saúde pública (GOUVEIA, 2012). No entanto, o RSU também pode ser um recurso valioso, pois possui um alto potencial bioenergético que pode ser aproveitado para produzir energia e que é considerado em parte no PDE 2031.

A Política Nacional de Resíduos Sólidos, instituída pela Lei nº 12.305/2010 (BRASIL, 2010), cuja Portaria Interministerial nº 274/2019 disciplina a recuperação de todo o RSU gerado, estabelece que todos os municípios devem reciclar seus resíduos antes de depositarem em aterros sanitários. Em países da Europa e determinados países da Ásia, essa recuperação é dada a partir de rotas tecnológicas consolidadas, o que não ocorre a níveis maduros no Brasil. Para tanto, além das ações governamentais para uso da incineração de RSUs frente ao exposto na PNRS, está o Decreto Presidencial nº 10.117/2019 (BRASIL, 2019) que trata da qualificação de projetos para recuperação energética a partir do RSU, cuja projeção do PDE 2031 apontou para inserção de 300 MWe até o ano de 2031 (EPE, 2022b).

No país, a geração de RSU atingiu a marca de 82,5 milhões de toneladas por ano. Esses dados, fornecidos pela Abrelpe (2021), indicam que, anualmente, cada habitante gera cerca de 390 kg de resíduos sólidos, ou 225.965 toneladas por dia. O fato é que 70% das emissões de metano são provenientes de atividades humanas, e que cada tonelada de

CH₄, em um horizonte de 100 anos, representa o equivalente a 27,2 toneladas de CO₂ (PÖRTNER, 2022). Assim, é importante que sejam tomadas medidas de controle das emissões de GEEs para valorização energética destes resíduos.

Vários estudos têm demonstrado que o RSU possui alto potencial bioenergético que pode ser aproveitado para gerar energia por meio de diferentes tecnologias de conversão. Leite et al. (2022) avaliaram alternativas tecnológicas para tratamento de RSU no estado de Minas Gerais a partir do ponto de vista energético, econômico e ambiental. As rotas bioquímica e térmica foram consideradas. Os resultados apontam para uma geração de eletricidade maior em cenários onde foram consideradas incineração e gaseificação juntos a digestão anaeróbica e reciclagem dos resíduos. Isso significaria 56.7% do potencial total de geração e 34% a menos de emissões.

Santos et al. (2019) investigam a geração de energia a partir de RSU no Brasil a partir de análise comparativa econômica e energética. Barros et al. (2014) investigam o potencial de geração de energia elétrica a partir do biogás produzido em aterros sanitários no Brasil. O estudo considera geração de eletricidade a partir de biogás de aterros sanitários, metanização de frações orgânicas em digestores anaeróbios e combustão por incineração. A análise econômica por meio do *levelized cost of electricity* (LCOE) indica viabilidade econômica apenas em projetos que consideram o biogás de aterro.

Rodrigues et al. (2022) analisam o uso de gaseificadores e incineradores no tratamento de RSUs e sua recuperação energética em três municípios de diferentes regiões do Brasil: Itajubá (MG), Campinas (SP) e Campo Grande (MS). Também, foi considerado no estudo a produção de resíduos, composição gravimétrica de cada cidade e fluxos de resíduos com valores constantes e com variações de energia anuais. Os resultados apontaram para uma relação de menor custo entre a quantidade de matéria orgânica e a tecnologia de recuperação utilizada. Ademais, ambas tecnologias não demonstraram viabilidade econômica em nenhuma das cidades e em nenhuma das duas condições especificadas.

Um estudo da Cibiogás (2021) apontou que entre os anos de 2015 e 2018, houve um aumento de 117% nas usinas de biogás no país - de 127 para 276 unidades. Em 2019, o total foi de 400 unidades cadastradas e em junho de 2021, 638 usinas no país. Embora as usinas de RSU representem apenas 9% de todas as unidades operacionais do país, elas geram 73% do volume total de biogás. No que diz respeito às unidades de RSU, elas têm potencial para a comercialização de energia elétrica, pois 85% das usinas em operação e

73% da produção total diária de biogás são voltadas para essa finalidade de geração (SINIGAGLIA et al., 2022).

Não obstante, a Associação Brasileira das Distribuidoras de Gás Canalizado (Abegás) e a Abiogás mapearam 27 usinas de biometano com potencial para serem conectadas à rede de gasodutos do país. O estudo aponta a expectativa de produção de biometano na faixa de 2,2 milhões de m³/dia até 2027. O estado de São Paulo tem o maior número de usinas - 15 no total. Em seguida está o Rio Grande do Sul, com 6 projetos (EPBR, 2022).

No que se refere aos GEEs, Lobato (2011) indica que a principal rota de conversão da matéria orgânica que contribui para a redução dos GEE é a anaeróbia. A autora apresenta, a partir dos resultados de reatores UASB para esgoto doméstico, um biogás composto por 75% de metano. No entanto, Bachmann (2015) indica 60%.

As tecnologias WTE podem ser aplicadas para o aproveitamento energético desses potenciais combustíveis. Padilha & Mesquita (2022) apresentam que as rotas de conversão cujas tecnologias WTE estão comercialmente maduras, atualmente, são a incineração e a digestão anaeróbia. No mundo, segundo a Ecoprog (2018), existem cerca de 2.430 usinas, 90% das quais possuem tratamento térmico por incineração por combustão em grelha móvel. No cenário nacional e de acordo com a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), existem 29 projetos WTE em operação utilizando gás de aterro (LFG), totalizando 215,9 MW (Tabela 3) (ABREN, 2019).

Tabela 3 Empreendimentos WTE que utilizam gás de aterro no Brasil.

Estado	Plantas em operação	Início de operação [ano]	Capacidade [MW]
SP	12	2002	89,3
PE	1	2019	25,7
RJ	4	2003	24,2
BA	1	2010	19,7
MG	5	2009	19,5
RS	1	2015	12,7
PR	1	2016	10
PB	1	2019	5
SC	2	2021	7
DF	1	2020	2,8

Fonte: Adaptado de Aneel (2022).

O Plano Decenal de Expansão Energética 2031, publicado pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE) em 2022, apresenta um novo horizonte para o país nesse contexto. Segundo o relatório, ainda que a incineração seja uma tecnologia pouco explorada no cenário nacional, o Plano prevê que esses recursos sejam direcionados para o abastecimento de 50 MW/ano de RSU em termelétricas no país que estarão disponíveis a partir de 2026, garantindo 300 MW até o ano de 2031 (EPE, 2022b). Além disso, segundo a ABREN (2022), é possível que 5% do consumo de energia das grandes cidades seja suprido por esse resíduo, abastecendo 27 milhões de unidades consumidoras.

No que diz respeito ao esgotamento sanitário, em 2020, foram coletados cerca de 6 bilhões de m³ de esgoto. Esse valor representa a produção de esgoto de apenas 2.807 municípios que possuem sistemas de esgotamento sanitário, onde apenas 4,8 bilhões de m³ foram tratados (SNIS, 2021). Ainda de acordo com o SNIS, apenas 55% da população do país teria acesso a sistema de esgotamento sanitário e deste valor, somente 50% do total de efluentes são tratados.

O novo marco regulatório do saneamento no Brasil, implementado pela Lei nº 14.026/2020 e que apresenta a nova estrutura do saneamento básico do país, amplia o potencial de produção de biogás (BRASIL, 2020). É estabelecido que 99% da população deverá ter acesso à água potável e 90% ao tratamento de esgoto e coleta de resíduos até 2033.

2.2.1.5 Indústria de papel e celulose – licor negro

O Brasil contribui significativamente para indústria de papel e celulose mundial. Segundo ranking dos maiores produtores de celulose no mundo em 2020 apresentado por IBA (2021) e FAO (2021), o Brasil garante a segunda posição, produzindo um montante de 21 milhões de toneladas de celulose no respectivo ano – i.e., 11,3% da produção mundial. O principal motivo está nas condições favoráveis de clima e solo, bem como investimento em pesquisa e inovação, técnicas de manejo florestal e melhoramentos genéticos das espécies garantindo destaque na produtividade de plantios florestais. Estas, por sua vez, geram consideráveis quantidades de licor negro – um subproduto do processo de tratamento químico da celulose. O seu uso, no entanto, é dado a partir da queima em caldeiras de recuperação (EPE, 2022a).

O licor negro pode ser caracterizado como uma mistura complexa de resíduos de lignina, hemicelulose e celulose e compostos inorgânicos – sódio, potássio e enxofre

(EMBRAPA, 2021a). E o seu conteúdo energético deriva, principalmente, da matéria orgânica presente em sua composição, i.e., da lignina. No processo de polpação, a lignina é separada das fibras da madeira e dissolvida no licor negro e, quando em combustão, suas ligações químicas são quebradas, caracterizando um processo exotérmico que libera energia em forma de calor (JORGE, 2018).

Atualmente, as fibras de maior importância econômica são as fibras de madeira. Estas podem ser divididas em folhosas (porosas, *hardwood*) e resinosas (não porosas, *softwood*). Segundo Bajpai (2018), as espécies de madeira mais largamente utilizadas para a produção de celulose são: o Eucalipto, do grupo das folhosas, de fibras curtas e *hardwood*; e o Pinus, do grupo das coníferas resinosas, de fibras longas e *softwood*. Destacam-se as espécies de *Eucalyptus saligna* e *Pinus elliottii*.

A madeira é uma matéria-prima formada de fibras em múltiplas camadas, ligadas entre si por forças interfibrilares e pela lignina que age como ligante. Para a separação dessas fibras, unidas por forças coesivas intermoleculares, é necessário despende uma certa quantidade de energia. A qualidade, as características e as utilizações da pasta produzida serão funções da quantidade de energia aplicada. Deste modo, pode-se definir o processo de polpação como sendo o processo de separação das fibras de madeira mediante a utilização de energia química e/ou mecânica.

Desse modo, o propósito da polpação é o de livrar as fibras de celulose de outros componentes da madeira (principalmente a lignina) em condições que as deixem, o tanto quanto possível, puras e sem danos, para que suas propriedades finais desejadas, resistência e alvura, possam ser obtidas [BAJPAI, 2018]. Existem diferentes tipos de polpação: mecânica, termomecânica, semiquímica, química etc.

O termo “polpação química alcalina” inclui todos os métodos de produção de pasta celulósica, nos quais as fibras vegetais são tratadas com soluções alcalinas aquosas. Segundo Pola et al. (2022), o principal processo alcalino na produção de pasta química é o processo kraft ou sulfato, onde a celulose e a lignina são separadas com o auxílio dos reagentes químicos Hidróxido de Sódio (NaOH) e Sulfeto de Sódio (Na₂S), a temperaturas entre 160 e 180°C, sendo a lignina despolimerizada e dissolvida. A quantidade destes desses reagentes durante o processo é chamada de álcali ativo.

A solução contendo os reagentes químicos e os subprodutos gerados na decomposição dos constituintes da madeira é denominada licor negro (ou lixívia negra).

Em uma etapa posterior (o ciclo de recuperação química), esse licor é concentrado através de evaporação e, então, queimado em caldeiras de recuperação com o objetivo de recuperar energia e compostos inorgânicos para reutilização no processo industrial (POLA et al., 2022). Desta forma, o processo torna-se mais econômico e é eliminada uma fonte potencial de poluição da água (descarte do licor negro).

De acordo com Bajpai (2018), a recuperação constitui uma parte essencial do processo kraft. Tanto do ponto de vista energético quanto econômico, pois além de contribuir com o balanço energético das fábricas de celulose (gerando vapor para diversas operações, tais como cozimento, branqueamento e secagem), também recupera importantes reagentes retornando-os ao digestor com um mínimo de perdas, e elimina parte dos efluentes com maior potencial poluidor. A Figura 5 a seguir mostra a natureza cíclica do processo de recuperação.

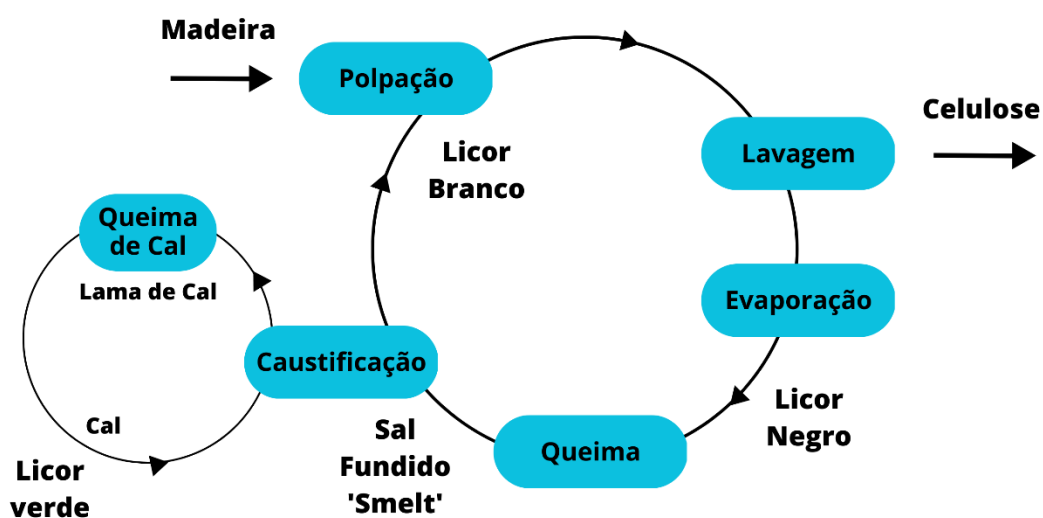


Figura 5 Natureza cíclica do processo de recuperação do licor negro.

Fonte: Adaptado de Bajpai (2018).

A indústria de papel e celulose é intensiva em energia. Nas últimas cinco décadas, a participação do licor negro no atendimento da demanda energética do setor no Brasil aumentou de 15% para 52%, tornando-se a fonte energética mais significativa para a produção de celulose (EPE, 2021). Em 2021, foram produzidas 35,372 milhões de toneladas de licor negro pela indústria no Brasil (EPE, 2022a), equivalentes a 10,128 milhões de TEP ($4,24 \times 10^{11}$ MJ/ano) em 2021. O montante utilizado para suprir o consumo de energia do setor produzindo calor e vapor foi de 7,294 milhões de TEP ($3,05 \times 10^{11}$ MJ/ano) e a quantidade de licor negro convertido em eletricidade nas usinas de autoprodução foi de 2,834 milhões de TEP ($1,19 \times 10^{11}$ MJ/ano) (Figura 6).

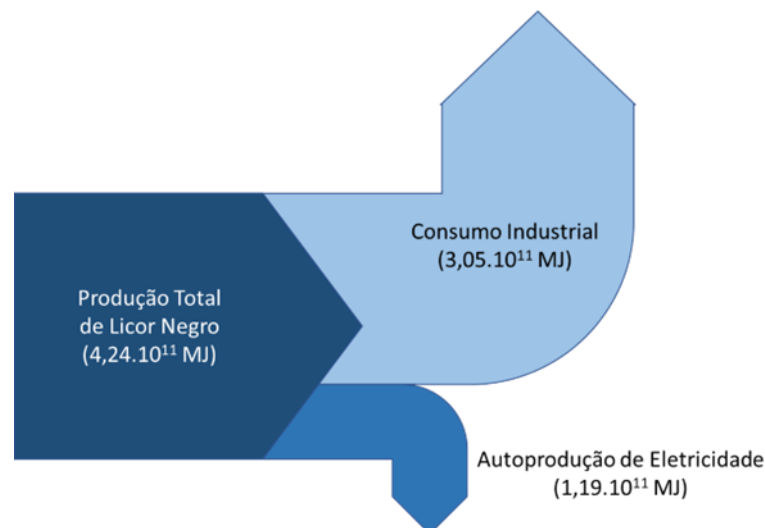


Figura 6 Uso de licor negro produzido no Brasil, em 2021.

Fonte: Adaptado de EPE (2022).

A autoprodução de licor negro resultou na geração de 15.144 GWh em 2021, com uma eficiência de conversão de cerca de 46% por cogeração. Em 2021, o setor de papel e celulose consumiu um total de 24.464 GWh de eletricidade. Segundo o Guia da Associação Brasileira Técnica de Celulose e Papel (ABTCP, 2020), essas fábricas representam quase 100% da capacidade de produção de celulose do Brasil (Tabela 4).

Tabela 4 Indústrias de celulose no Brasil e suas respectivas capacidades instaladas, em mil t/ano.

Fabricante	Município	Capacidade de produção de celulose [10 ³ ton/ano]
International Paper	Luiz Antônio (SP)	410
International Paper	Mogi Guaçu (SP)	400
Suzano	Suzano (SP)	400
Suzano	Limeira (SP)	170
Fibria	Jacareí (SP)	1,100
Veracel	Eunápolis (BA)	1,100
Cenibra	Belo Oriente (MG)	1,200
Klabin	Ortigueira (PR)	1,500
Suzano	Mucuri (BA)	1,540
Suzano	Imperatriz (MA)	1,650
Eldorado	Três Lagoas (MS)	1,700
Celulose Riograndense	Guaíba (RS)	1,750
Fibria	Aracruz (ES)	2,340
Fibria	Três Lagoas (MS)	3,200
Capacidade total		18,460

Fonte: ABTCP (2020).

Em conclusão, o licor negro das indústrias de celulose e papel no Brasil tem um potencial significativo como fonte de energia renovável. No entanto, a maior parte está sendo queimada em caldeiras de recuperação para uso interno, e mais pesquisas e investimentos são necessários para realizar plenamente o seu potencial energético. A integração da gaseificação do licor negro com usinas de ciclo combinado é uma abordagem promissora para o uso do licor negro como fonte de energia renovável, ao mesmo tempo em que podem reduzir as emissões de GEE's.

2.2.1.6 Gases de fornos da indústria de carvão vegetal

O carvão vegetal é uma importante fonte de combustível no Brasil e sua produção gera uma quantidade significativa de gases, que têm potencial para serem utilizados como fonte de energia. O país é considerado o líder mundial na produção de aço a carvão vegetal. Em 2005, segundo dados da EMBRAPA (2021b), 42,8% da produção de lenha do país foi destinada à produção de carvão vegetal, aproximadamente 58,46 milhões de m³ de lenha. Em 2021, segundo o IBGE (2021), foram produzidas mais de 6 milhões de toneladas de carvão vegetal no Brasil.

Além dos usos na indústria siderúrgica, o carvão vegetal detém outras destinações. Samoraj et al. (2022) aponta que o biochar é utilizado para a correção do solo, podendo substituir os fertilizantes convencionais e tratamento de águas residuais. Ainda, sua utilização pode se estender ao tratamento de águas residuais dadas as suas propriedades físico-químicas, cocção e fonte energética.

No Brasil, a indústria siderúrgica lidera o uso do carvão vegetal. Ao contrário do restante do mundo que utiliza o coque, o país aplica-o no processo de redução do ferro para produção de ferro-gusa (SCHETTINI et al., 2022). Este fato é ambientalmente importante, visto que as rotas da biomassa e da produção do aço e ferro-gusa se integram, promovendo vantagens, além de ambientais, competitivas para o aço nacional. Isto significa menor intensidade de emissões de CO₂ e compensação e GEEs a partir das plantações florestais (IBÁ, 2023).

A produção de carvão vegetal normalmente envolve a conversão de madeira em carvão em fornos ou retortas a partir da pirólise lenta. Nos fornos tradicionais de terra – fornos ‘rabo quente’ e que compreendem cerca de 80% da produção comercial no país - a madeira é empilhada em um monte e coberta com terra e outros materiais para criar um ambiente livre de oxigênio. A madeira, então, sofre lentamente um processo de

decomposição térmica durante vários dias, e o carvão resultante é resfriado e removido do forno. Nas retortas modernas, a madeira é aquecida em um sistema fechado que permite melhor controle de temperatura e aproveitamento mais eficiente do calor e gases gerados pelo processo (OLIVEIRA, 2021).

Segundo Leme et al. (2018), a produção de carvão vegetal por pirólise lenta também gera Gases Condensáveis (GCs) e Gases Não Condensáveis (GNCs) e que compreendem 70% dos produtos da conversão. Os GC compreendem o extrato pirolenhoso e alcatrão insolúvel – 45% - e os GNCs -25% - dióxido e monóxido de carbono, hidrogênio e metano (SILVA, 2022).

Quanto ao conteúdo energético dos gases de carvoaria, este varia em função de sua composição. Autores como Antal & Grønli (2003), Laird et al. (2009), Leme et al. (2018) e Park et al. (2014) apresentam estudos focados na utilização de gases de pirólise lenta, tendo um LHV de cerca de 6 MJ/kg. No entanto, o potencial de uso destes gases como fonte energética é diverso. Além de poderem ser utilizados no processo próprio processo de produção de carvão vegetal, o que pode levar a uma economia significativa de energia, podem ser utilizados para geração de energia por meio de motores, turbinas a gás ou combustão direta, notadamente em processos industriais (SILVA, 2022).

Além de ser uma indústria de grande importância do ponto de vista econômico brasileiro, com significativo potencial de produção de energia e geração de empregos, ela também apresenta desafios ambientais, como desmatamento e emissões de gases de efeito estufa. Importante salientar que a implementação de regulamentos e programas de sustentabilidade é essencial para garantir que o setor opere de maneira ambiental e socialmente responsável.

2.3 Tecnologias de conversão da biomassa

A biomassa contém energia química, que é armazenada nas moléculas dos compostos orgânicos presentes nos organismos vivos e nos materiais de origem animal e vegetal. A exploração da energia contida na biomassa envolve a utilização de processos que promovam a quebra das moléculas orgânicas, liberando a energia química contida nessas moléculas (DA SILVA, 2014). Entre as vantagens do uso da energia proveniente da biomassa estão o fato de esta ser uma fonte renovável de energia, ou seja, uma fonte cuja capacidade de renovação natural ocorre em uma taxa superior à taxa de consumo

humano, além de que a exploração da bioenergia é um processo neutro (ou quase neutro) em emissões de dióxido de carbono.

Quando a biomassa utilizada é um resíduo proveniente de atividades agrícolas, florestais ou industriais, ou ainda RSU, as suas vantagens em termos ambientais e de sustentabilidade são potencializadas. Isso acontece pois se trata do aproveitamento de uma energia que de outra forma seria perdida, sem provocar alguns inconvenientes que podem ser associados aos cultivos de biomassa energética, como a competição com o uso de áreas para produção de alimentos e sem contribuir para o aumento no consumo de fertilizantes (JENKINS; EKANAYAKE, 2017).

A conversão energética da energia química contida na biomassa pode produzir eletricidade, calor e combustíveis derivados, dependendo da rota tecnológica utilizada no processamento da biomassa. A escolha da rota tecnológica mais adequada dependerá das características gerais da biomassa (tais como disponibilidade, grau de umidade, composição de matéria fixa e volátil, poder calorífico, complexidade molecular, etc.) e do produto que se deseja produzir (eletricidade, calor ou combustíveis). Além disso, pré-tratamentos podem ser necessários para tornar a biomassa mais adequada a um determinado processo de conversão (DA ROSA; ORDONEZ, 2021). Por exemplo, uma determinada biomassa pode precisar passar por um processo de secagem, ou de redução de suas partículas macroscópicas, antes de ser encaminhada ao processo de conversão energética propriamente dito.

Existem diferentes tipos de processos que podem ser empregados para a conversão de biomassa em energia. De maneira geral, esses processos podem ser divididos em processos bioquímicos (tais como fermentação, digestão anaeróbia etc.) e processos termoquímicos (tais como combustão, gaseificação, pirólise). Como já mencionado anteriormente, a escolha do tipo de processo mais adequado depende das características da biomassa (DA SILVA, 2014).

A biomassa com estruturas moleculares mais complexas, tais como materiais celulósicos em geral, apresentam uma maior dificuldade para que se realize a quebra dessas moléculas e a extração da energia contida. Nesses casos, a combustão é o processo mais indicado, pois trata-se de um processo termoquímico de alta reatividade e alta velocidade de reação, capaz de romper as ligações moleculares mais complexas. Por outro lado, biomassas com um alto teor de umidade são desfavoráveis para o uso da combustão, uma vez que a presença de elevados níveis de umidade consome calor durante a

evaporação, reduzindo assim a eficiência da combustão. Nesses casos, processos bioquímicos são mais adequados, inclusive porque ambientes mais úmidos são mais favoráveis à ação dos microrganismos responsáveis pela quebra das moléculas de biomassa (DA ROSA; ORDONEZ, 2021).

Portanto, o primeiro critério de seleção da tecnologia de conversão energética da biomassa é o seu nível de umidade. A Tabela 5 apresenta os dois tipos de conversão energética, os níveis de umidade de biomassa mais indicados, os principais processos tecnológicos disponíveis e os produtos gerados.

Tabela 5 Tipos e critérios de conversão energética de biomassa.

Tipo de Conversão	Nível de Umidade da Biomassa	Processos → Produtos
Termoquímico	Baixo (< 50%)	Combustão → Calor Gaseificação → Syngas Pirólise → Gás de pirólise
Bioquímico	Alto (> 50%)	Fermentação → Biocombustível Digestão Aeróbica ou Anaeróbica → Calor/Biogás

Fonte: Adaptado de Da Rosa & Ordóñez (2021).

Uma vez tendo sido feita essa primeira seleção, ainda restam diferentes processos que podem ser empregados para a conversão energética, tanto em relação à rota termoquímica como em relação bioquímica. Dovichi Filho et al. (2021) realizou uma avaliação do nível de prontidão tecnológica, medido em uma escala de 1 a 9, e do nível de maturidade de diversas tecnologias de geração de energia a partir da biomassa. Os principais resultados dessa investigação são apresentados na Tabela 6 a seguir.

Tabela 6 Nível de prontidão e Maturidade de diferentes tecnologias de conversão.

Tecnologia	Nível de Prontidão (em escala de 1 a 9)	Maturidade
Ciclo Rankine Convencional	9	Alta
BIGCC – Gaseificador de Biomassa em ciclo combinado	7	Alta
Ciclo Rankine Orgânico (ORC)	8	Alta
Turbina a gás de queima externa (EFGT)	6	Média
Turbinas radiais a vapor	6	Média
Motores a vapor de pistão	6	Média
Expansores a vapor de parafuso	6	Média
Motores Stirling	6	Média
Gaseificador / motor de combustão interna (G/ICE)	7	Média
Gaseificador / Microturbina a gás	6	Média

Fonte: Dovichi Filho et al. (2021).

Do ponto de vista técnico, considerando a produção de energia a ser obtida, o principal parâmetro a ser observado é a eficiência de conversão, mas outros fatores como a confiabilidade e a prontidão da tecnologia para aplicações comerciais também são importantes (TOLMASQUIM, 2016). Além disso, a escala também tem influência na escolha, uma vez que algumas tecnologias precisam de uma determinada disponibilidade mínima de biomassa para alcançar a faixa operacional - como níveis de temperatura e de pressão, por exemplo - em que desenvolvem sua melhor eficiência.

Nesse sentido, Lora et al. (2019) compilaram informações sobre as faixas de capacidade adequadas para cada tipo de tecnologia de conversão de biomassa e suas eficiências típicas. Os resultados da pesquisa são apresentados na Tabela 7 a seguir.

Tabela 7 Faixa de capacidade e eficiências típicas de diferentes tecnologias.

Tecnologia	Faixa de Capacidade (MWe)	Eficiências típicas (%)
Ciclo Rankine Convencional	3-100	5-36
Gaseificador de Biomassa em ciclo combinado (BIGCC)	1-3	30-45
Ciclo Rankine Orgânico (ORC)	0,01-3	15-25
Turbina a gás de queima externa (EFGT)	0,02-0,08	15-16
Turbinas radiais a vapor	0,01-0,03	30
Motores a vapor de pistão	0,3-1,2	5-11
Expansores a vapor de parafuso	0,07-0,6	15
Motores Stirling	0,006-0,03	6-20
Gaseificador/Motor de combustão interna (G/ICE)	0,04-3,0	12-32
Gaseificador/Microturbina a gás	0,03-0,2	15

Fonte: Adaptado de Lora et al. (2019).

É importante notar que as eficiências apresentadas na Tabela 7 são valores de referência, que podem diferir dos valores realmente encontrados em cada projeto de geração. Segundo Tolmasquim (2016), a natureza da biomassa a ser utilizada, suas características específicas, as variáveis de cada processo e até mesmo fatores ambientais locais irão afetar a eficiência das tecnologias de conversão em cada projeto isolado.

2.4 O Sistema de Informação Geográfica (SIG) e a distribuição espacial da biomassa

O sistema de informação geográfica (SIG) desempenha um papel fundamental na análise e gestão da distribuição espacial da biomassa e na prospecção de sua potencialidade energética. O fato é que a viabilidade de um projeto de biomassa está intrinsecamente ligada a uma série de fatores: investimento da planta, viabilidade

tecnológica, gestão de toda uma cadeia de abastecimento e raio econômico (DOVICH FILHO, 2022). Isto é, são altamente influenciados pela sua localização, onde a produção e o transporte dessa biomassa compreendem parte significativa dos custos (ZHAN et al., 2005).

O SIG, por sua vez, compreende um sistema capaz de processar dados gráficos e alfanuméricos com fins de realizar análises espaciais, bem como modelagem de superfícies. Nesse sentido, é possível caracterizá-lo pela integração de dados a uma única base de dados, i.e., dados censitários, cartográficos, imagens de satélites, redes, entre outros (INPE, 2023). A Figura 7 apresenta a arquitetura dos SIGs, que envolve i) interface com o usuário, onde será determinada a forma de operação do sistema, ii) a entrada e integração dos dados, iii) ferramentas para processamento de dados e análise espacial e iv) gerenciamento de dados espaciais e atributos (armazenamento e recuperação de dados).

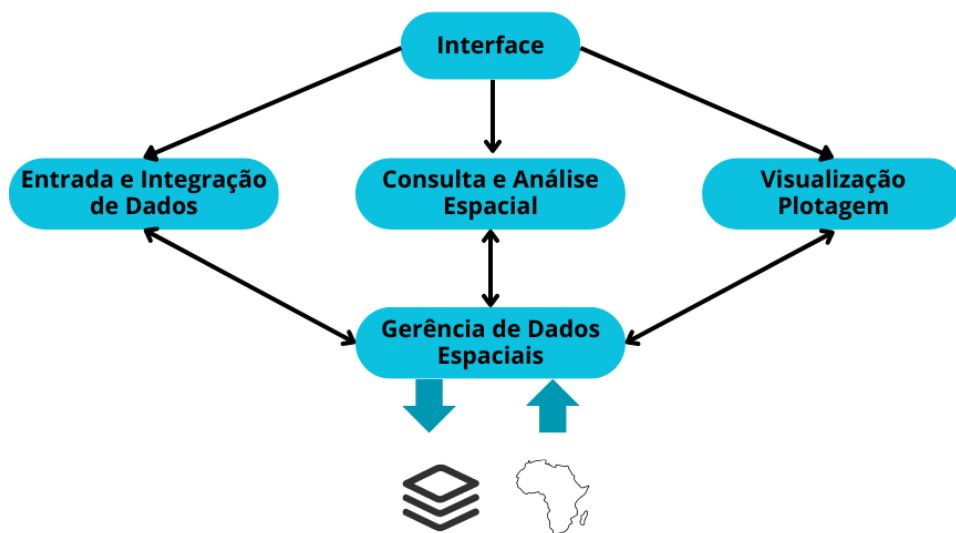


Figura 7 Arquitetura dos Sistemas de Informação Geográfica (SIG).
Fonte: Adaptado de INPE (2023).

O Sistema de Referência Geodésico para as Américas (SIRGAS) é uma organização panamericana com fins de manter uma rede de referência geocêntrica continental. A organização, composta por agências governamentais de geodésia e cartografia, universidades e centros de pesquisa, mantém o sistema de referência vertical unificado, i.e., um sistema de referência adotado em todos os países americanos (Figura 8) (SIRGAS, 2023).

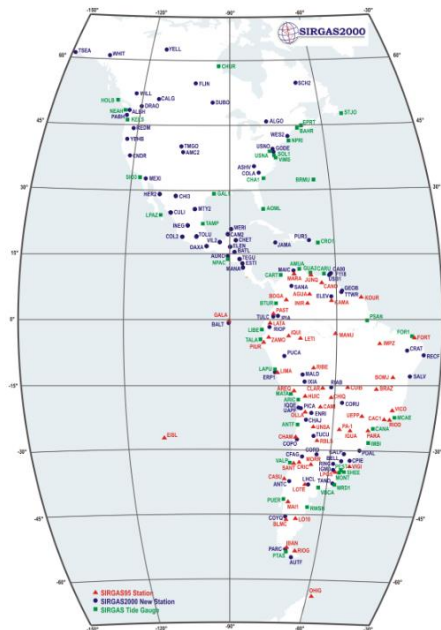


Figura 8 Coordenadas SIRGAS2000.
Fonte: SIRGAS (2023).

O SIG, portanto, pode ser programado para visualizar a disponibilidade e alocação espacial de biomassa visando determinar o tamanho, localização, cadeia de suprimentos e seleção de tecnologia para usinas de biomassa. Além disso, pode ser acoplado a uma metodologia de tomada de decisão multicritério (MCDM) (JI et al., 2023). Alguns exemplos notáveis de aplicação de SIG para avaliar a disponibilidade de biomassa para energia começam com o de Gomez et al. (2010), para as condições da Espanha apresentando a avaliação de resíduos de culturas e florestas incluindo os potenciais técnicos e econômicos, considerando questões logísticas. Eles concluíram que o potencial econômico corresponde a 4,4% da eletricidade gerada na Espanha. Lozano-Garcia et al. (2020) determinou a disponibilidade georreferenciada de resíduos de culturas para o México, aplicando uma metodologia de três estágios: culturas adequadas, facilitadores e camadas de restrição, dando pesos a cada um. Ukoba et al (2023) realizaram um trabalho semelhante para a Nigéria, mas não considerando a fração de resíduos a ser recuperada. Os potenciais teóricos, técnicos e econômicos foram determinados, mas os fundamentos dos cálculos dos potenciais teóricos não foram descritos. Outras publicações usaram SIG para avaliar o potencial de biogás de resíduos agrícolas e industriais (LOVRAK et al., 2022; LOVRAK; PUKŠEC; DUIĆ, 2020; VALENTI et al., 2023). Publicações que consideram todos os tipos de resíduos de biomassa para o cálculo de um potencial georreferenciado, como este, são raras.

Dessa forma, ao integrar dados geográficos com informações sobre a biomassa, o SIG permite uma abordagem mais precisa e eficiente na tomada de decisões relacionadas à produção e utilização de biomassa como fonte de energia. Isso ajuda a identificar áreas com maior potencial para investimentos em projetos de energia renovável, otimizar a logística de transporte da biomassa, planejar o estabelecimento de plantações de culturas energéticas e realizar análises de viabilidade econômica e ambiental.

CAPÍTULO - III

3 Metodologia

A abordagem metodológica do presente estudo segue focada em recursos, como apresenta De Souza et al. (2021). Isto é, considera os recursos totais de bioenergia para avaliação de seu potencial bioenergético (potencial teórico), levando em conta restrições ambientais de produção da biomassa. Ainda, estende a análise ao potencial técnico considerando tecnologias de rota termoquímica e bioquímica para recuperação energética das respectivas biomassas.

A Figura 10 apresenta o fluxo metodológico aplicado ao estudo. As fontes de biomassa residual foram selecionadas e, em seguida, prospectados dados referentes à produtividade, Poder Calorífico Inferior (PCI), bem como dados respectivos ao cálculo do potencial teórico e que serão abordados com maior detalhamento nas seções seguintes. As restrições, por sua vez, aplicadas ao cálculo do potencial teórico, referem-se a limitações ou condições específicas que são impostas ao modelo teórico utilizado. Essas restrições podem ser baseadas em considerações físicas, matemáticas ou empíricas.

Os mapas de potencialidade, portanto, foram elaborados a partir dos valores de potencial teórico obtidos de cada biomassa residual (Figura 9). A ferramenta utilizada para gerar os mapas foi o software QGIS3.24.2 Tisler®, que considerou o Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas (SIRGAS2000). As *shapefiles* referentes às malhas municipais e de microrregiões foram obtidas na base de dados do (IBGE, 2022b). Considerando a limitação de algumas das bases de dados oficiais, como malhas municipais e de microrregiões do IBGE, de coleta e tratamento de águas residuais do Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS), das quantidades produzidas por cultivo agrícola pelo SIDRA, foram elaborados mapas de potencialidade para microrregiões para resíduos agrícolas e florestais, excretas de animais e de carvão vegetal. Para RSU, esgotos e indústria de papel e celulose, foram elaborados mapas de municipalidade.



Figura 9 Esquema de elaboração de mapas no QGIS a partir dos potenciais calculado.

Fonte: Do autor (2023)

O potencial técnico, por sua vez, é definido como parte do potencial teórico disponível nas possibilidades tecnológicas atuais. A escolha da tecnologia para recuperação energética foi definida a partir de critérios determinados, como umidade da biomassa, maturidade da tecnologia.

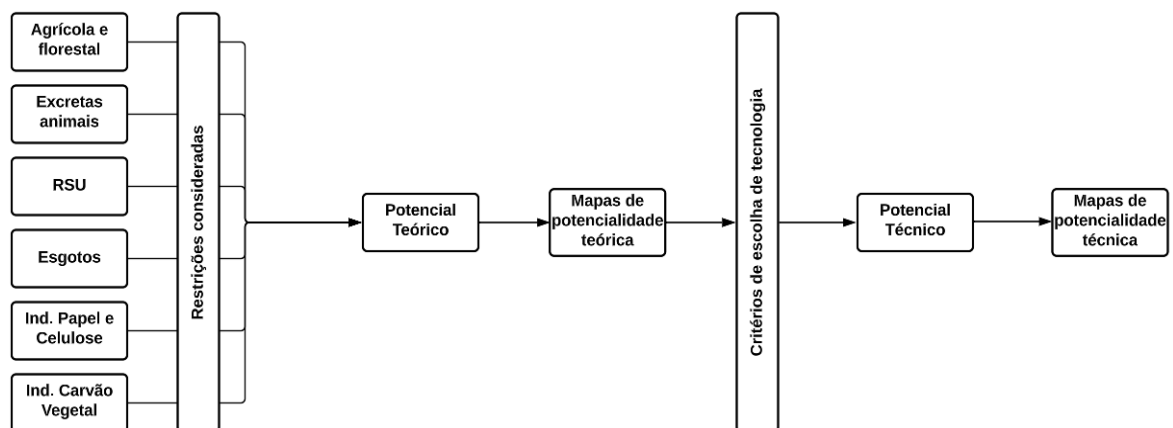


Figura 10 Fluxo metodológico do estudo.

Fonte: Do autor (2023).

Os resultados, então, apontam os valores de potencialidade bioenergética obtidos para o Brasil. A discussão dos resultados busca avaliar os valores obtidos no presente estudo em comparação com diferentes autores cuja pesquisa também buscou prospectar estes potenciais bioenergéticos no país.

3.1 Potencial teórico da biomassa residual

As seções seguintes apontam as metodologias aplicadas para obtenção do potencial teórico de cada biomassa residual avaliada.

3.1.1 Biomassa agrícola e florestal

O potencial teórico de biomassa representa o potencial que apresenta o limite superior de bioenergia obtido de fato a partir de lavouras regionais (VOIVONTAS; ASSIMACOPOULOS; KOUKIOS, 2001). A Figura 11 apresenta o esquema metodológico para obtenção dos valores potenciais.

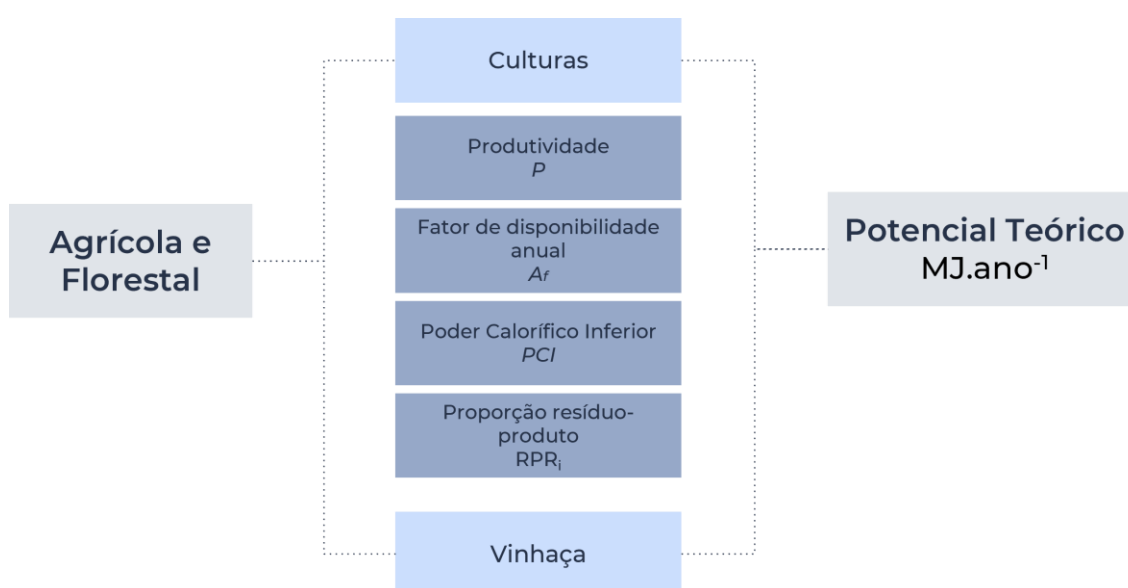


Figura 11 Fluxograma esquemático da metodologia para obtenção do potencial teórico agrícola e florestal. Fonte: Do autor (2023).

O valor para a produtividade do cultivo (P), em t/ha, foi obtido a partir da base de dados do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). O Sistema IBGE de Recuperação Automática (SIDRA) fornece valores de quantidade produzida por meio de tabelas de Produção Agrícola Municipal (PAM) (IBGE, 2022b), com ano de referência 2021. Os cultivos estudados (cana-de-açúcar, cevada, algodão, arroz, aveia, café, centeio, dendê, mandioca, soja, sorgo, trigo, feijão amendoim e milho) são referentes a lavouras temporárias e permanentes apresentados por De Souza et al. (2021).

O fator de disponibilidade anual dos resíduos (Af), em %, indica a fração disponível a ser retirada para usos energéticos e a razão resíduo-produto representa o percentual da biomassa bruta disponível em toneladas convertida resíduo como palha ou casca ou serragem. De Souza et al. (2021), Portugal-Pereira et al. (2015), Avcioglu et al. (2019), De Oliveira et al. (2013) e Voivontas et al. (2001) apresentam a mesma abordagem da

equação 1. Gonzalez-Salazar et al. (2014) no entanto, leva em consideração os valores de unidade da biomassa residual.

O poder calorífico inferior (PCI), em MJ/kg, compreende a quantidade de calor liberado por unidade de massa resultando em toda a água liberada no estado gasoso. A proporção resíduo-produto (RPR), por sua vez, compreende a quantidade de biomassa residual que poderá ser deixada após o processo de colheita (KIM; DALE, 2004).

O cálculo aplicado para a biomassa residual agrícola e florestal é dado pela equação (1) a seguir.

$$PTA_i = \sum_1^n P \cdot A_f \cdot PCI \cdot RPR \quad (1)$$

Onde:

- PTA_i : potencial teórico da biomassa, em PJ;
- P: produção anual do cultivo, em toneladas;
- A_f : fator de disponibilidade anual que indica a fração disponível que pode ser utilizada para usos energéticos;
- PCI_i : poder calorífico inferior, em MJ.t⁻¹;
- RPR: proporção resíduo-produto, que representa o quanto de biomassa residual é possível deixar após a colheita de determinado cultivo;
- Conversão para PJ (10⁹).

A Tabela 8 apresenta os valores respectivos a cada cultivo para as variáveis apresentadas.

Tabela 8 Biomassas residuais avaliadas no estudo e respectivos parâmetros de análise.

Fonte	Biomassa	Resíduo	Microrregiões	Af [%]	PCI [MJ/kg]	RPR
Agrícola	Algodão	Palha	558	40	14,6	2,45
	Amendoim	Palha	315	100	15,5	2,52
	Arroz	Palha	558	40	16	1,55
		Casca		40	16	0,18
	Aveia	Palha	558	100	19,58	1,54
	Café	Casca	558	50	16,5	0,59
	Cana-de-açúcar	Palha	558	59	18,62	0,22
		Bagaço		100	19,81	0,22
	Centeio	Palha	558	100	20,08	1,61
Cevada	Palha	558	100	19,68	1,48	

	Dendê	Casca	558	80	15,54	0,06
		Fibras		80	15,62	0,12
		Cachos		100	15,17	0,2
	Feijão	Folhas	551	30	17,1	1,45
	Milho	Restolho	547	40	17,7	1,68
	Soja	Palha	558	30	14,6	2,3
	Sorgo	Palha	558	80	19,06	1,9
	Trigo	Palha	558	23	19,54	1,55
	Mandioca	Casca	558	40	16	0,65
	Florestal	Eucalipto	Casca	447	80	15,97
Pinus		Casca	447	100	18,06	0,12

Fonte: Adaptado de De Souza et al. (2021).

Vinhaça da produção de etanol

O potencial teórico da vinhaça foi estimado considerando proporções iguais de produção de açúcar e etanol a partir da cana-de-açúcar (Figura 12).

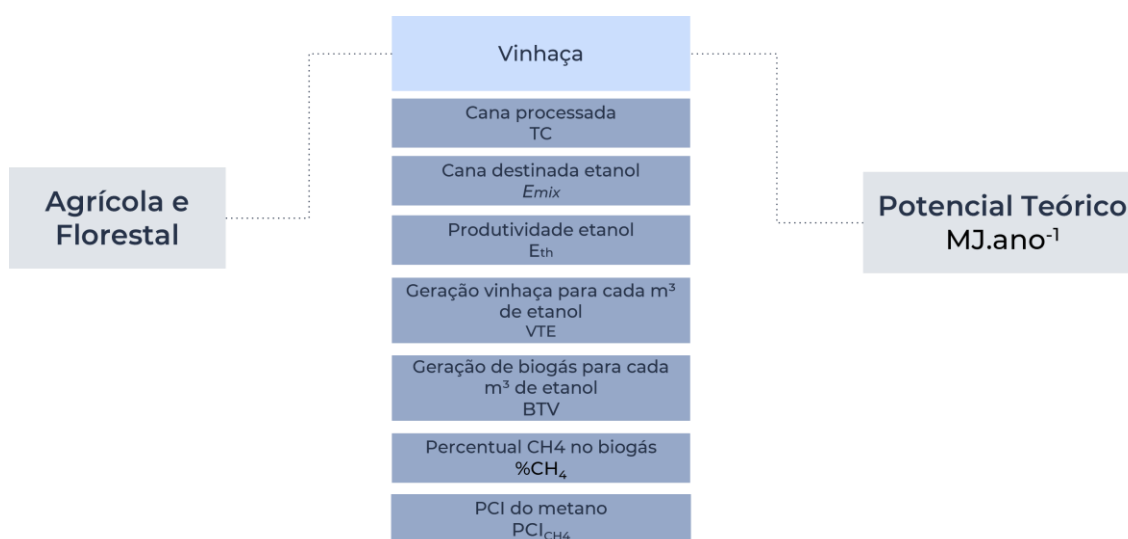


Figura 12 . Fluxograma esquemático da metodologia para obtenção do potencial teórico agrícola e florestal.

Fonte: Do autor (2023).

Para estimar o potencial de geração de energia elétrica a partir da biomassa, considerou-se que a produção de cana-de-açúcar é destinada para a fabricação de açúcar (processo que não produz vinhaça) e de etanol (processo que produz vinhaça) em proporções iguais (50%-50. Nesse caso, cada 1 tonelada de cana-de-açúcar processada, gera em média 0,5 m³ de vinhaça (SILVEIRA, 2015). Sendo tratada em um biodigestor, cada m³ de vinhaça pode produzir até 14 Nm³ de biogás, com cerca de 60% de metano em sua composição. Considerando o poder calorífico do metano (35,8 MJ/Nm³), é

possível calcular em 0,15 PJ/ano o potencial teórico de geração a partir da vinhaça, pelo processamento de 1 milhão de toneladas de cana-de-açúcar por ano (0,15 PJ/milhão de tonelada de cana).

Com base nas metodologias apresentadas por Castro (2019) e Silveira (2015), o potencial teórico de geração de energia a partir da vinhaça foi estimado por meio da equação (2).

$$PTV_i = TC \cdot E_{mix} \cdot E_{th} \cdot VTE \cdot BTV \cdot \%CH_4 \cdot LHV_{CH_4} \quad (2)$$

Onde,

- PTV_i é o potencial teórico de geração da vinhaça, em MJ.ano⁻¹;
- TC é a quantidade de cana processada, em t.ano⁻¹;
- E_{mix} é a proporção de cana destinada à produção de etanol, adotada como 50%;
- E_{th} é a produtividade média do etanol, igual a 0,0833 m³.ton⁻¹ de cana.
- VTE é a geração média de vinhaça para cada m³ de etanol produzido, igual a 11,5 m³.m⁻³ de etanol;
- BTV é a geração média de biogás para cada m³ de vinhaça, igual a 12,6 Nm³.m⁻³;
- %CH₄ o percentual de metano no biogás gerado, igual a 60%;
- PCI_{CH₄} poder calorífico do metano, igual a 35,8 MJ. Nm⁻³.

A Tabela 9 apresenta os valores adotados para o cálculo da equação (2).

Tabela 9 Parâmetros adotados para o cálculo de potencial teórico da vinhaça.

Parâmetro	Valor	Referências
E_{mix}	50%	Castro (2019); Silveira (2015)
E_{th}	0,08 m ³ . ton ⁻¹	
VTE	11,5 m ³ .m ⁻³	
BTV	12,6 Nm ³ .m ⁻¹	

3.1.2 Excretas de bovinos, suínos e galináceos

A metodologia de cálculo é orientada pelo Relatório Técnico da EPE DEA 15/14 (EPE, 2014) e dados para número de cabeças por rebanho fornecidos pelo SIDRA por meio da Pesquisa da Pecuária Municipal (IBGE, 2022b), conforme fluxo esquemático na Figura 13.

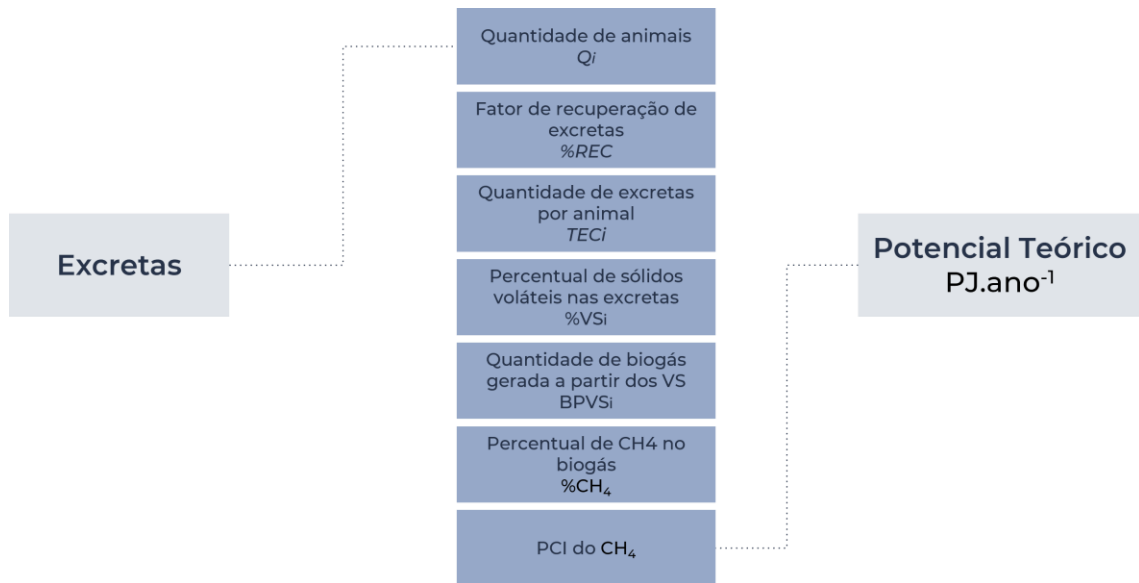


Figura 13 Fluxograma esquemático da metodologia para obtenção do potencial teórico de excretas bovinas, suínas e galináceas.

Fonte: Do autor (2023).

A energia primária obtida a partir das excretas de suínos, bovinos e galináceos é dada pela equação (3).

$$PTE_i = Q_i \cdot \%REC \cdot TEC_i \cdot \%VS_i \cdot BPVS_i \cdot \%CH4_i \cdot PCI_{CH4} \quad (3)$$

Onde,

- PTE_i é o potencial teórico de geração a partir das excretas da cultura animal i , em $MJ.ano^{-1}$;
- Q_i é a quantidade de animais criados de cada tipo i (galináceos, bovinos ou suínos);
- $\%REC$ é o fator de recuperação de excretas;
- TEC_i é a quantidade de excretas em toneladas produzidas por animal, por ano;
- $\%VS_i$ é a fração de sólidos voláteis nas excretas;
- $BPVS_i$ é a quantidade de biogás gerada a partir dos sólidos voláteis presentes ($Nm^3.t VS^{-1}$);
- $\%CH4_i$ é a fração de metano no biogás produzido;
- PCI_{CH4} é o poder calorífico inferior do metano ($35,8 MJ.Nm^{-3}$).

Em relação à capacidade de recuperar as excretas geradas, este trabalho levou em consideração os dados e índices calculados por Kellogg, Moffitt & Gollehon (2014) a respeito das excretas recuperáveis da criação de animais em fazendas de diversos portes nos Estados Unidos, que é um grande produtor agropecuário, assim como o Brasil. Segundo o estudo promovido pelo Departamento de Agricultura dos Estados Unidos, para

criações intensivas, o potencial recuperável de excretas é de 78%, enquanto para criações de todos os tipos, representando a média de todas as fazendas, o potencial recuperável de excretas é de 43% (KELLOGG; MOFFITT; GOLLEHON, 2014). Neste estudo, para uma análise mais conservadora, foram utilizados fatores de recuperação iguais a 75% para galináceos e suínos, cuja criação é majoritariamente intensiva, e de 40% para bovinos, cuja criação é mista, com produção extensiva para o gado de corte e intensiva para o gado leiteiro.

A Tabela 10 a seguir apresenta os parâmetros aplicados ao cálculo da equação 3.

Tabela 10 Parâmetros adotados para o cálculo de potencial teórico de excretas.

Parâmetro	Bovinos	Galináceos	Suínos	Referências
TS (Sólidos Totais, %)	16,91%	67,84%	31,02%	Kafle & Chen (2016)
VS (Sólidos Voláteis, %)	10,25%	47,50%	26,93%	
Potencial de Biogás (Nm ³ .tVS ⁻¹)	295	425	495	
% de CH ₄ no Biogás	69,1%	61,1%	65,3%	
Produção de CH ₄ (Nm ³ .t ⁻¹)	20,9	123,3	87,0	
TEC_i (t.ano ⁻¹)	5,47	0,06	0,91	EPE (2014)
%REC	40%	75%	75%	Kellogg, Moffitt & Gollehon (2014)

3.1.3 RSU e esgotos

3.1.3.1 RSU

A metodologia para obtenção do potencial teórico dos RSU seguiu o modelo proposto por Leite et al. (2022). Isto é, foi considerado o potencial energético a partir do biogás (rota bioquímica) e rota termoquímica (Figura 14).

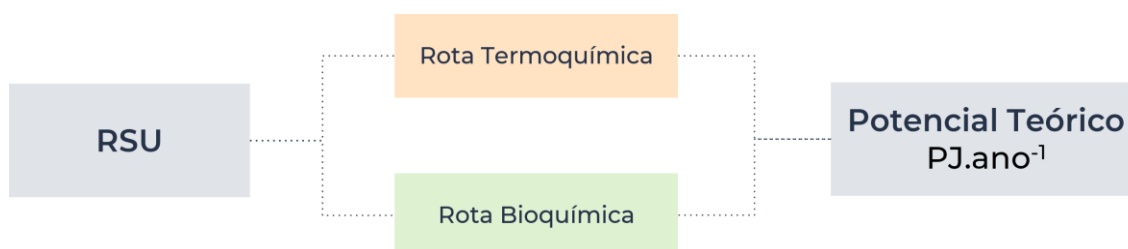


Figura 14 Fluxograma esquemático da metodologia para obtenção do potencial teórico do RSU. Fonte: Do autor (2023).

A partir da base de dados do SNIS (SNIS, 2022) obteve-se a quantidade de resíduos gerados por município. O índice de massa coletado é representado pelo IN021 indicado em kg/habitante/dia calculado a partir da equação (4) abaixo para os mais de 4.500 municípios.

$$IN021 = \left(\frac{CO116+CO117+CS048+CO142}{população} \right) \quad (4)$$

Onde,

- CO116 é a quantidade de resíduos domiciliares (RDO) e resíduos públicos (RPU) coletados pelo agente público.
- CO117 a quantidade de RDO e RPU arrecadada por agentes privados, em kg.dia⁻¹.
- CS048 a quantidade coletada por meio da coleta seletiva realizada por associações ou cooperativas de catadores com parceria/apoio da Prefeitura.
- CO142 a quantidade de RDO e RPU coletada por outros agentes executores, em kg.dia⁻¹.

A composição gravimétrica de RSU no Brasil é dada pela Tabela 11 (ABRELPE, 2011).

Tabela 11 Composição gravimétrica média dos RSU no Brasil.

Material	Percentual [%]
Metais	2.9
Papel e papelão	13.1
Plásticos	13.5
Vidro	2.4
Matéria orgânica	51.4
Outros	16.7
Total	100

Fonte: ABRELPE (2011).

A metodologia aplicada para obtenção dos potenciais a partir da rota bioquímica é dada no fluxograma esquemático a seguir (Figura 15).

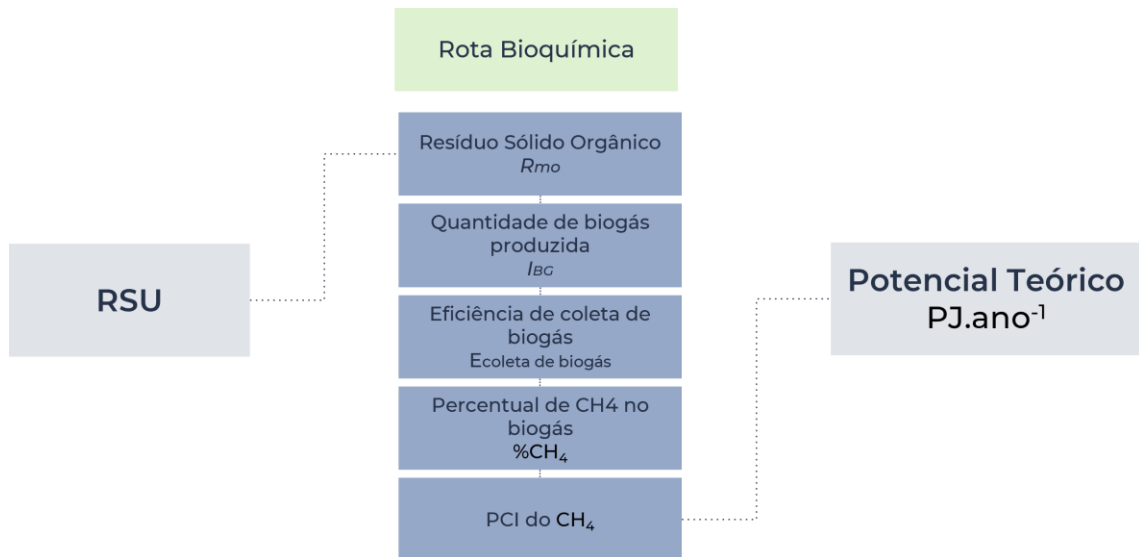


Figura 15 Fluxograma esquemático da metodologia para obtenção do potencial teórico do RSU a partir de rota bioquímica.

Fonte: Do autor (2023).

A energia primária recuperada dos RSU por digestão anaeróbia, é dada pela equação (5) (SANTOS et al., 2019). Para isso, foi considerado apenas material orgânico.

$$PTM_i = R_{mo} \cdot I_{BG} \cdot E_{coleta\ de\ biogás} \cdot \%CH4_i \cdot PCI_{CH4} \quad (5)$$

Onde,

- PTM_i é a energia primária disponível em biogás, em $PJ.ano^{-1}$.
- R_{mo} o Resíduo Sólido Orgânico (RSO), em $t.ano^{-1}$;
- I_{BG} a quantidade de biogás produzida considerada como $100\ Nm^3.t^{-1}$ de RSU (OSTREM, 2004);
- $E_{coleta\ de\ biogás}$ a eficiência de coleta de biogás considerada igual a 50%, conforme Magnano (2010);
- $\%CH4_i$ o percentual de metano no biogás, considerado em 60% por Ostrem (2004);
- PCI_{CH4} o poder calorífico inferior do metano, em $MJ. Nm^{-3}$.

A recuperação energética pela rota termoquímica pode ser calculada a partir da equação (7), conforme apresentado por Lino & Ismail (2018), seguindo o esquemático apresentado na Figura 16.

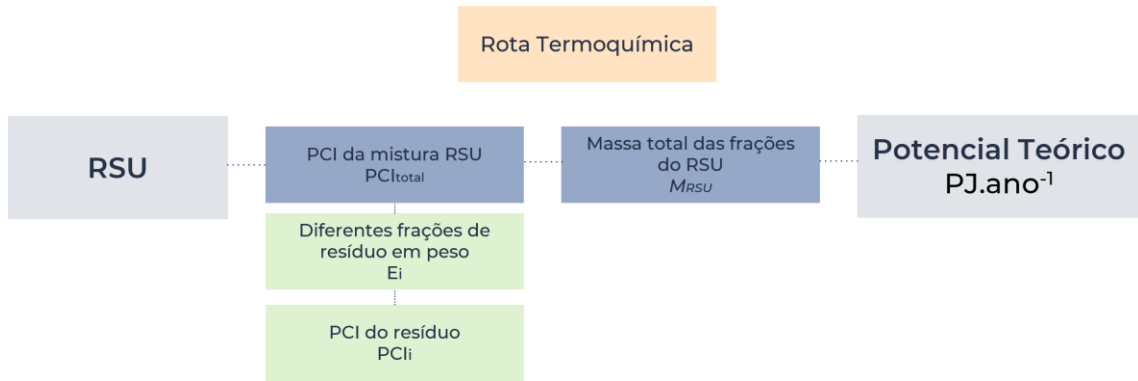


Figura 16 Fluxograma esquemático da metodologia para obtenção do potencial teórico do RSU a partir de rota termoquímica.

Fonte: Do autor (2023).

Inicialmente, o PCI total, ou seja, o PCI da mistura de resíduos é calculado na equação (6).

$$PCI_{total} = \sum_i^m E_i \cdot PCI_i \quad (6)$$

Onde,

- PCI_{total} é o PCI da mistura RSU, em $MJ.kg^{-1}$;
- E_i são as diferentes frações de resíduos em peso;
- PCI_i é o PCI do resíduo, em $MJ.kg^{-1}$.

Portanto, a energia primária disponível nas frações de papel e papelão, plástico e matéria orgânica dos RSU é obtida pela equação (7).

$$PT_{RSUi} = PCI_{total} \cdot \dot{M}_{RSU} \quad (7)$$

Onde,

- PT_{RSUi} é a energia primária em RSU, em $PJ.ano^{-1}$.
- PCI_{total} é o PCI total das frações de RSU, em $MJ.kg^{-1}$.
- \dot{M}_{RSU} é a massa total das frações de RSU, em $kg.ano^{-1}$.

3.1.3.2 Esgotos

O potencial de geração de esgoto doméstico foi estimado com base nos dados disponíveis no Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS). Os dados referentes ao volume de água consumida e aos volumes de esgoto coletados e tratados em nível estadual têm como ano-base 2020. Considerando que a significativa parcela da população não tem acesso total aos sistemas de esgotamento sanitário, outros dois cenários foram elaborados para avaliar esse potencial: i) o cenário com recuperação total do recurso, ii) o potencial considerando o esgoto coletado e iii) o esgoto tratado (Figura 17).

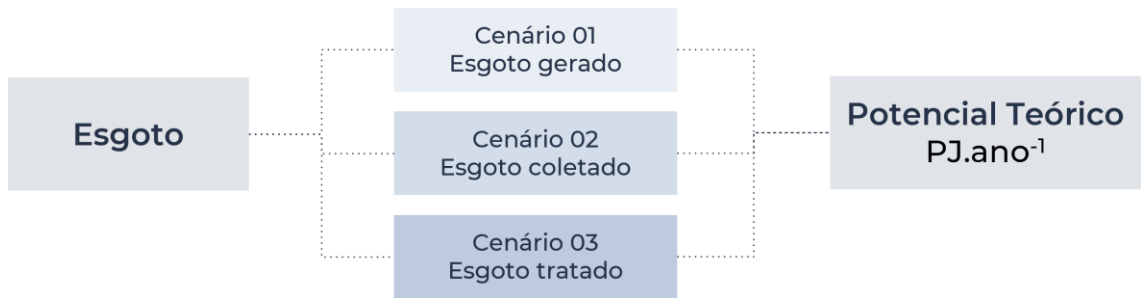


Figura 17 Fluxograma esquemático da metodologia para obtenção do potencial teórico do RSU a partir de rota termoquímica.

Fonte: Do autor (2023).

De forma a simplificar o entendimento do cálculo, foi elaborado o esquemático da Figura 18.

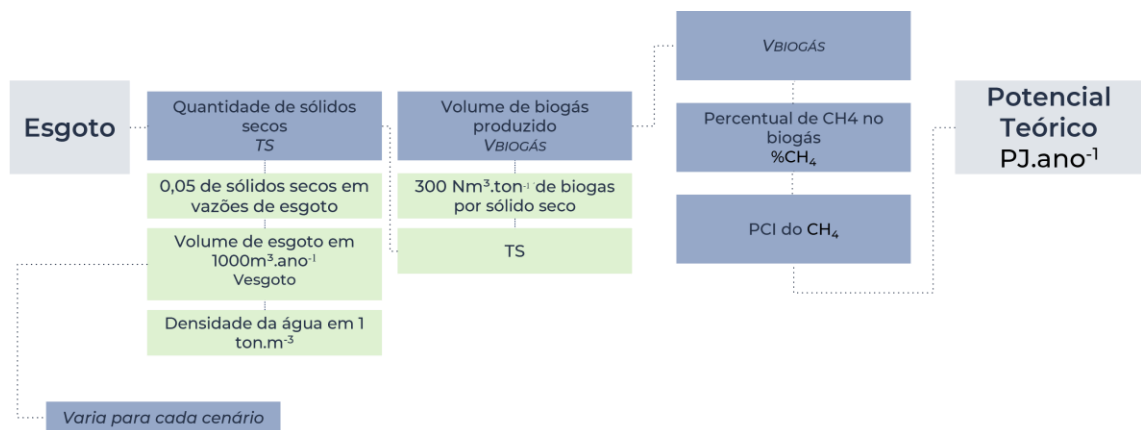


Figura 18 Fluxograma esquemático da metodologia para obtenção do potencial teórico do esgoto.

Fonte: Do autor (2023).

Foi calculado o teor de sólidos secos no volume de esgoto gerado que, segundo Andreoli, Von Sperling & Fernandes (2001), pode variar tipicamente entre 2% e 8%. Para esta avaliação, foi utilizado o valor médio de 5% de sólidos secos nas vazões de esgoto.

$$TS = 0.05 \cdot V_{esgoto} \cdot \rho_{\text{água}} \quad (8)$$

Onde,

- TS a quantidade de sólidos secos, em ton.ano^{-1} ;
- 0,05 a fração de sólidos secos em vazões de esgoto;
- V_{esgoto} volume de esgoto (gerado, coletado ou tratado) em $1.000 \text{ m}^3 \cdot \text{ano}^{-1}$;
- $\rho_{\text{água}}$ a densidade de $1 \text{ t} \cdot \text{m}^{-3}$.

A partir da quantidade de sólidos secos disponíveis, foi calculada a geração de biogás considerando um fator de produção de $300 \text{ Nm}^3/\text{ton}$ de por sólido seco (SVENSKT GASTEKNISKT CENTER, 2012). Assim, foi calculada pela equação 9 a produção de

biogás que seria possível obter nos casos de aproveitamento de todo esgoto gerado (cenário 1), todo esgoto coletado (cenário 2) e todo esgoto tratado (cenário 3).

$$V_{biogas} = 300 \cdot TS \cdot \frac{1}{365} \quad (9)$$

Onde,

- V_{biogas} o volume de biogás produzido (nos cenários de esgoto gerado, coletado ou tratado) em $Nm^3 \cdot dia^{-1}$.
- TS a quantidade de sólidos secos, em $ton \cdot ano^{-1}$.

Por fim, a partir da produção de biogás em cada cenário, foi possível estimar a energia primária disponível (equação 10), considerando uma composição de 60% de metano (CH_4) no biogás, e PCI do metano igual a de $35,8 MJ \cdot Nm^{-3}$ (BACHMANN, 2015; GUPTA, 2020).

$$PTS_i = 0,60 \cdot V_{biogas} \cdot PCI_{metano} \cdot 365 \quad (10)$$

Onde,

- PTS_i é a energia primária disponível a partir do biogás de esgoto, em $MJ \cdot ano^{-1}$;
- V_{biogas} é o volume diário de biogás produzido (nos cenários de esgoto gerado, coletado ou tratado) em $Nm^3 \cdot dia^{-1}$;
- PCI_{metano} é o poder calorífico inferior do metano, considerado $35,8 MJ \cdot Nm^{-3}$.

3.1.4 Licor negro da Indústria de Papel e Celulose

Em relação ao potencial de geração de energia elétrica do licor negro, inicialmente foram realizadas pesquisas para identificar as principais fábricas de celulose em operação no Brasil (Tabela 4), uma vez que o licor negro é um subproduto da produção de celulose.

Considerando a produção total de celulose e licor negro em 2020, tem-se um fator de produção médio de 1.966 toneladas de licor negro por tonelada de celulose produzida. Como não há dados individuais de produção de licor negro em cada uma das unidades produtoras, este fator médio foi utilizado para estimar a quantidade de licor negro disponível em cada município (equação 11).

$$LN = 1,966 \cdot Q_{cellulose} \quad (11)$$

Onde,

- LN é a quantidade de licor negro gerada, em $t \cdot ano^{-1}$.

- $Q_{celulose}$ é a produção anual de celulose, também em $t.ano^{-1}$.

A partir da disponibilidade de licor negro em cada unidade de produção, foi possível estimar a energia primária, considerando o licor negro de menor poder calorífico igual a 2.900 kcal/kg, equivalente a 12,13 MJ/kg (equação 12) (CARDOSO; DE OLIVEIRA; PASSOS, 2009).

$$PTB_i = LN \cdot PCI_{licor\ negro} \quad (12)$$

Onde,

- PTB_i é o potencial energético primário do licor negro das indústrias de celulose e papel no Brasil, em $MJ.ano^{-1}$;
- LN é a quantidade de licor negro gerado, em $t.ano^{-1}$;
- $PCI_{licor\ negro}$ é o poder calorífico inferior do licor negro, 12,13 MJ. kg^{-1} .

O esquemático a seguir apresenta a metodologia aplicada (Figura 19).

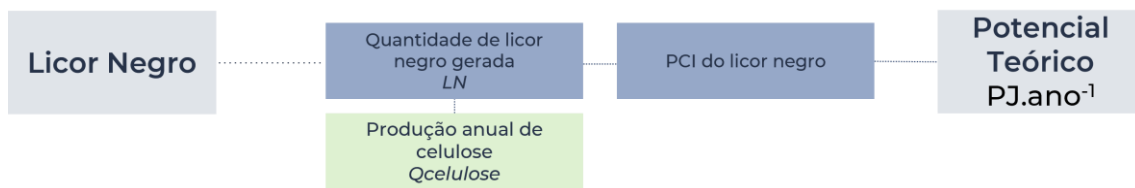


Figura 19 Fluxograma esquemático da metodologia para obtenção do potencial teórico do licor negro.
Fonte: Do autor (2023).

3.1.5 Potencial energético da indústria de carvão vegetal

O potencial energético da indústria de carvão vegetal foi avaliado a partir de dois cenários. O primeiro cenário considera a energia total disponível a partir do carvão vegetal, desconsiderando seus demais usos (Figura 20). Sua produção anual foi levantada utilizando dados municipais do IBGE com ano base 2020.

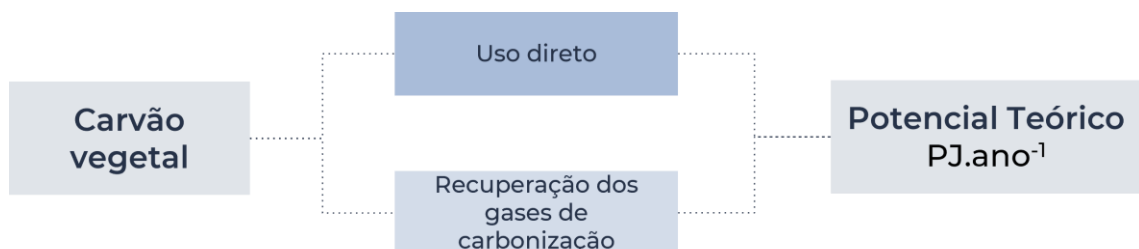


Figura 20 Fluxograma esquemático da metodologia para obtenção do potencial teórico do carvão vegetal.
Fonte: Do autor (2023).

Para o cálculo, foram utilizados valores quantitativos de carvão vegetal por município e seu PCI médio. Para este último, como o PCI do carvão vegetal varia em função da madeira utilizada e das condições do processo de carbonização (temperatura, umidade, tempo de residência), foi utilizado um valor médio. Dados fornecidos por Thomaz et al. (2007) apresentam PCI de carvão obtido de duas espécies diferentes de eucalipto, 30,9 MJ/kg para *E. badjensis* e 27,7 MJ/kg para *E. benthamii*. Assim, o valor médio utilizado para o trabalho foi de 29,30 MJ/kg. O potencial teórico é então calculado (equação 13).

$$PTC_i = Q_{carvão\ vegetal} \cdot PCI_{carvão\ vegetal} \quad (13)$$

Onde,

- PTC_i o potencial teórico do carvão vegetal (cenário 1), em PJ.ano⁻¹.
- $Q_{carvão\ vegetal}$ é a quantidade de carvão disponível, em kg.ano⁻¹.
- $PCI_{carvão\ vegetal}$ o poder calorífico inferior do carvão vegetal, em MJ. kg⁻¹.

O esquemático a seguir apresenta a metodologia aplicada (Figura 21).

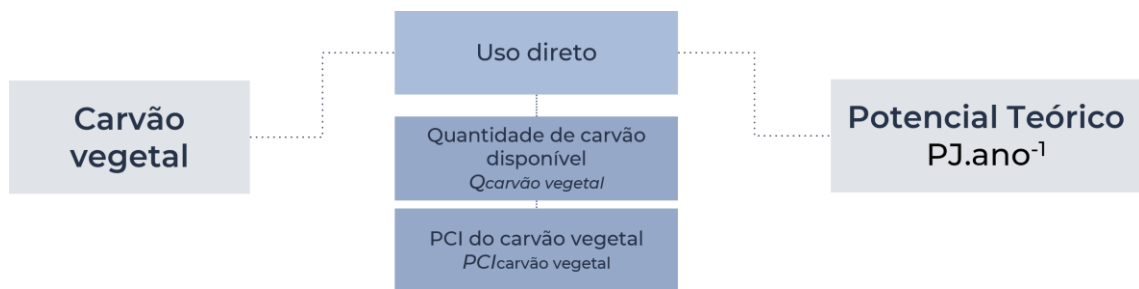


Figura 21 Fluxograma esquemático da metodologia para obtenção do potencial teórico a partir do uso direto do carvão vegetal.

Fonte: Do autor (2023).

O segundo cenário avaliou o potencial energético disponível a partir da recuperação dos gases da carbonização. Leme et al. (2021) avalia o PCI médio dos gases de forno em uma faixa de 1,28 a 1,36 MJ/kg. Com o eucalipto sendo composto por 14% de carbono fixo (para ser transformado em carvão) e 86% de voláteis (SILVA et al., 2015) o balanço de massa dá que cada tonelada de carvão produzida liberaria 6,14 toneladas de gases. Para o cálculo do potencial teórico, estimou-se que apenas 10% da energia contida nos gases poderia ser efetivamente recuperada e o restante seria perdido. Essa estimativa se baseia no ganho de eficiência normalmente proporcionado pela instalação de sistemas de recuperação de calor dos gases de combustão, que é em torno de 10%. Assim, é possível

calcular o potencial teórico (PTCG_i) resultante do produto da quantidade de carvão (Q_{charcoal}), PCI e fator de utilidade (equação 14).

$$PTCG_i = Q_{\text{carvão vegetal}} \cdot PCI_{CG} \cdot \text{Fator de Utilidade} \quad (14)$$

Onde,

- $PTCG_i$ potencial teórico dos gases de carbonização (cenário 2), em PJ. ano⁻¹.
- $Q_{\text{carvão vegetal}}$ quantidade de carvão, em toneladas.
- PCI_{CG} poder calorífico inferior dos gases da carbonização do carvão vegetal, com valores médios de 17,57 MJ. Kg⁻¹.
- *Fator de Utilidade* representa a quantidade de energia contida nos gases que poderia ser efetivamente recuperada, como 10%.

A Figura 22 apresenta, esquematicamente, a metodologia para a recuperação dos gases de carbonização.

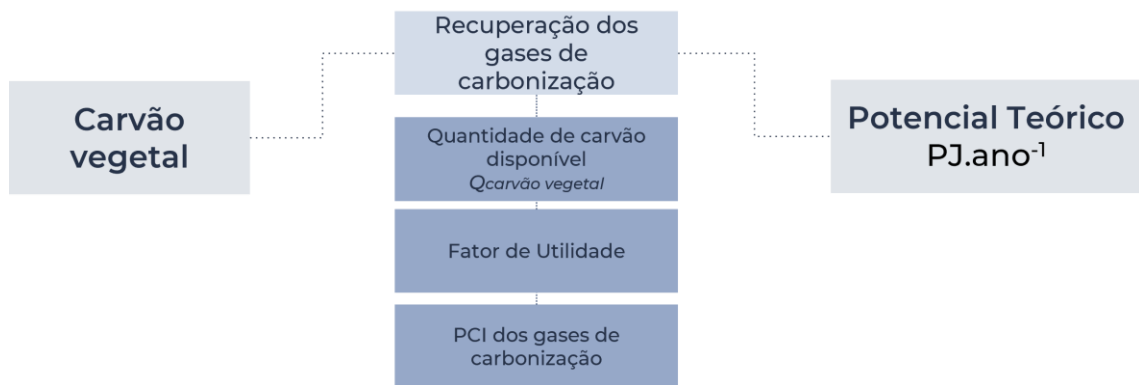


Figura 22 Fluxograma esquemático da metodologia para obtenção do potencial teórico na recuperação dos gases de carbonização do carvão vegetal.

Fonte: Do autor (2023).

A Tabela 12 apresenta, de maneira sintética, as equações para obtenção do potencial teórico para cada fonte de biomassa residual, bem como as restrições consideradas.

Tabela 12 Equações e restrições aplicadas à metodologia do estudo.

Biomassa	Equação	Descrição	Restrições	Referências
Agrícola e florestal	(1) $PTA_i = \sum_1^n P \cdot A_f \cdot PCI \cdot RPR$	<ul style="list-style-type: none"> • PTA_i: potencial teórico da biomassa, in GJ. • P: produção anual do cultivo, em toneladas. • A_f: fator de disponibilidade anual que indica a fração disponível que pode ser removida para usos energéticos. • PCI_i: poder calorífico inferior in GJ. t^{-1}. • RPR: proporção resíduo-produto, que representa o quanto de biomassa residual é possível deixar após a colheita de determinado cultivo. 	Alta dispersão geográfica de resíduos ; Disponibilidade de resíduo de 40% a 60%	De Souza et al. (2021) ; IBGE (2021)
Vinhaça	(2) $PTV_i = TC \cdot E_{mix} \cdot E_{th} \cdot VTE \cdot BTV \cdot \%CH4 \cdot PCI_{CH4}$	<ul style="list-style-type: none"> • PTV_i: potencial teórico de geração da vinhaça, em MJ.ano⁻¹. • TC: quantidade de cana processada, em toneladas.ano⁻¹. • E_{mix}: proporção de cana destinada à produção de etanol, adotada como 50%. • E_{th}: produtividade média do etanol, igual a 0,0833 m³.ton⁻¹ de cana. • VTE: geração média de vinhaça para cada m³ de etanol produzido, igual a 11,5 m³.m⁻³ de etanol. • BTV: geração média de biogás para cada m³ de vinhaça, igual a 12,6 Nm³.m⁻¹. • %CH₄: percentual de metano no biogás gerado, igual a 60%. • PCI_{CH4}: poder calorífico do metano, igual a 35.8 MJ. Nm⁻³. 	Competição com o uso atual para fertirrigação; 50% da cana-de-açúcar para etanol; 0,96 m ³ vinhaça/t de cana-de-açúcar.	Castro (2019); Silveira (2015)
Excretas animais	(3) $PTE_i = Q_i \cdot \%REC_i \cdot TEC_i \cdot \%VS_i \cdot BPVS_i \cdot \%CH4_i \cdot PCI_{CH4}$	<ul style="list-style-type: none"> • PTE_i: potencial teórico de geração a partir das excretas da cultura animal i, em MJ. ano⁻¹. • Q_i: quantidade de animais criados da cultura i (galináceos, bovinos ou suínos). • $\%REC_i$: fator de recuperação de excretas. • TEC_i: quantidade de excretas em toneladas produzidas por animal, por ano. • $\%VS_i$: fração percentual de sólidos voláteis nas excretas. • $BPVS_i$: quantidade de biogás gerada a partir dos sólidos voláteis presentes, em Nm³/t VS. • $\%CH4_i$: fração de metano no biogás produzido. • PCI_{CH4}: poder calorífico inferior do metano, in MJ. Kg⁻¹ (NIST). 	Cultura extensiva (gado) com dificuldade na coleta de dejetos ; Fator de recuperação: 75% para galinhas e porcos, 40% para gado.	EPE (2014) ; IBGE (2021) ; Gollehon et al. (2016)
RSU	Rota bioquímica (apenas matéria orgânica)	<ul style="list-style-type: none"> • PTM_{MSW}: energia primária disponível em biogás, em MJ. ano⁻¹ • R_{mo}: resíduo sólido orgânico, em t. ano⁻¹. • I_{BG}: quantidade de biogás produzida considerada como 100 m³. ton⁻¹ de RSU. • $E_{biogas\ collection}$: eficiência de coleta de biogás considerada em 50%. 	1kg de RSU por pessoa/dia	De Oliveira Leite et al. (2021); SNIS

	$(4) PTM_i = R_{mo} \cdot \dot{I}_{BG} \cdot E_{coleta\ de\ biogás} \cdot \%CH4_i \cdot PCI_{CH4}$	<ul style="list-style-type: none"> • $\%CH4_i$: percentual de metano no biogás. • PCI_{CH4}: poder calorífico inferior do metano, em $MJ \cdot m^{-3}$. 		(2022); ABRELPE (2011); OSTREM (2004); Magnano (2010)
	<p>Rota termoquímica</p> $(5) PCI_{total} = \sum_i^m E_i \cdot PCI_i$ $(6) PT_{RSU_i} = PCI_{total} \cdot \dot{M}_{RSU}$	<ul style="list-style-type: none"> • PCI_{total}: PCI da mistura RSU, em $MJ \cdot kg^{-1}$. • PCI_i: PCI do resíduo, em $MJ \cdot kg^{-1}$. • E_i as diferentes frações de resíduos em peso de RSU. • PT_{MSW_i}: energia primária em RSU, em $MJ \cdot ano^{-1}$. • PCI_{total}: PCI total das frações de RSU, em $MJ \cdot Kg^{-1}$. • \dot{M}_{RSU}: massa total das frações de RSU, em $kg \cdot ano^{-1}$. 	51,8% de MO no RSU.	Lino & Ismail (2018)
Esgoto	$(7) TS = 0,05 \cdot V_{esgoto} \cdot \rho_{água}$ $(8) V_{biogas} = 300 \cdot TS \cdot \frac{1}{365}$ $(9) PTS_i = \%CH4 \cdot V_{biogas} \cdot PCI_{metano}$	<ul style="list-style-type: none"> • TS: quantidade de sólidos secos, em $ton \cdot ano^{-1}$. • 0,05 de sólidos secos em vazões de esgoto. • V_{esgoto}: volume de esgoto (gerado, coletado ou tratado) em $1,000 m^3 \cdot ano^{-1}$. • $\rho_{água}$: densidade de $1 ton \cdot m^{-3}$ é assumida. • V_{biogas}: volume de biogás produzido (nos cenários de esgoto gerado, coletado ou tratado) em $Nm^3 \cdot dia^{-1}$. • $300 Nm^3 \cdot ton^{-1}$ considerado como fator de produção de biogás a partir de sólidos secos. • PTS_i: energia primária disponível a partir do biogás de esgoto, em $MJ \cdot ano^{-1}$. • $\%CH4_i$: percentual de metano no biogás. • PCI_{metano}: poder calorífico do metano, $35,8 MJ \cdot Nm^{-3}$. • 	Menos da metade do esgoto total é coletado e tratado; 48% do total de esgotos disponível; $300 m^3$ de biogás/t seca.	SNIS (2021); Andreoli, Von Sperling & Fernandes (2001); SGC (2012); Moran et al. (2010)
Indústria de Papel e	$(10) LN = 1,966 \cdot Q_{celulose}$ $(11) PTB_i = LN \cdot PCI_{licor\ negro}$	<ul style="list-style-type: none"> • LN: quantidade de licor negro gerada, em toneladas por ano, em $t \cdot ano^{-1}$. • $Q_{celulose}$: produção anual de celulose, também em toneladas por ano, em $t \cdot ano^{-1}$. • 1.966: fator médio de produção de licor negro por tonelada de celulose produzida. 	Compensação entre alta concentração de sólidos (melhor LHV)	Cardoso et al. (2009)

Celulose (licor negro)		<ul style="list-style-type: none"> • PTB_i: potencial energético primário do licor negro das indústrias de celulose e papel no Brasil, in MJ. ano⁻¹. • $PCI_{licor\ negro}$: poder calorífico inferior do licor negro, 12.13 MJ. Kg⁻¹. 	e viscosidade (problemas de bombeamento); 1,97 t de lixívia/t celulose.	
Indústria de Carvão Vegetal	Uso direto do carvão vegetal (cenário 01) (12) PTC_i $= Q_{carvão\ vegetal} \cdot PCI_{carvão\ vegetal}$	<ul style="list-style-type: none"> • PTC_i: potencial teórico do carvão vegetal, em MJ.ano⁻¹. • $PCI_{carvão\ vegetal}$ poder calorífico inferior do carvão vegetal, em MJ. Kg⁻¹. • $Q_{carvão\ vegetal}$: quantidade de carvão disponível, em kg.ano⁻¹. 	Competição com uso metalúrgico; 930 kWh/t de carvão.	Thomaz et al. (2007)
	Gases de carbonização (cenário 02) (13) $PTCG_i =$ $Q_{carvão\ vegetal} \cdot PCI_{CG} \cdot Fator\ de\ Utilidade$	<ul style="list-style-type: none"> • $PTCG_i$: potencial teórico dos gases de carbonização, em PJ. ano⁻¹. • $Q_{carvão\ vegetal}$: quantidade de carvão, em toneladas. • PCI_{CG}: poder calorífico inferior dos gases da carbonização do carvão vegetal, em MJ. Kg⁻¹. • Fator de Utilidade: quantidade de energia contida nos gases que poderia ser efetivamente recuperada, como 10%. 	10% de recuperação energética dos gases dos fornos.	Leme et al. (2021); Silva et al. (2015)

Fonte: Do autor (2023).

3.2 Potencial técnico da biomassa residual

O potencial técnico pode ser definido como a fração do potencial teórico a ser convertido em energia elétrica, devido a limitações tecnológicas. De Souza et al. (2021) apresenta uma metodologia aplicada para obter o potencial técnico da biomassa residual que, por sua vez, considera as eficiências de conversão das tecnologias aplicadas (equação 15).

$$P_{técnico} = \sum_1^n P_{teórico} \cdot \eta \quad (14)$$

Onde,

- $P_{técnico}$ é o potencial técnico da biomassa residual, em MJ.ano⁻¹;
- $P_{teórico}$ o potencial teórico da biomassa, em MJ.ano⁻¹;
- η a eficiência de conversão de energia.

Em linha com o observado na literatura, fica estabelecido um primeiro critério de seleção, com base no teor de umidade das biomassas. Este critério determina o uso de uma rota tecnológica bioquímica para as biomassas de elevado teor de umidade (tais como vinhaça, esgoto, excretas de criação pecuária, e RSU com grande parcela de matéria orgânica) e de uma rota termoquímica para as biomassas que possuem níveis de umidade relativamente baixos - como resíduos agrícolas e florestais, parcelas secas de RSU. O licor negro de fábricas de celulose trata-se de um caso à parte, pois apesar de não ser uma biomassa seca, passa por um processo termoquímico que permite a recuperação de reagentes químicos importantes utilizados na fabricação de celulose (POLA et al., 2022).

Como é objeto de estudo desta pesquisa a realização de uma avaliação holística do potencial de geração elétrica em todo o território nacional, a partir de todas as fontes de biomassa disponíveis, decidiu-se selecionar apenas as alternativas tecnológicas mais maduras e consolidadas, seguindo o trabalho de Dovichi Filho et al. (2021). Por estarem em avançado estágio de prontidão e maturidade, essas alternativas fornecem uma geração energética confiável e que pode ser projetada mais facilmente, sem depender excessivamente das condições específicas de cada projeto de geração de energia.

Dessa forma, considerando-se o trabalho de Dovichi Filho et al. (2021) e os dados da Tabela 13, observa-se que o uso de ciclos de potência a vapor, como o ciclo Rankine convencional e o ciclo Rankine orgânico, são as alternativas mais maduras e prontas para aplicação à biomassa, em se tratando de materiais sólidos e relativamente secos, uma vez

que os ciclos de potência a vapor são acionados pelo calor liberado pela combustão. No caso de biomassas líquidas ou de resíduos de biomassa com alto teor de umidade (acima de 50%), foi considerada a utilização de um processo de biodigestão anaeróbia para produção de biogás e posterior queima desse gás em motores de combustão interna. Essa opção busca um compromisso entre a melhor eficiência de conversão e os maiores níveis de maturidade e confiabilidade das tecnologias disponíveis (Tabela 6). A única exceção ao critério da umidade é a queima do licor negro, que é realizada em caldeiras de recuperação que não são apenas geradores de vapor, mas verdadeiros reatores químicos, cuja função não é apenas a de converter o conteúdo energético da biomassa, mas também de recuperar os produtos químicos presentes no licor.

Tabela 13 Rotas tecnológicas de conversão energética assumidas para cada biomassa residual.

Fonte de biomassa residual	Rota tecnológica
Agrícola e florestal, RSU, carvão vegetal, licor negro	Combustão Direta no Ciclo Rankine Convencional
Vinhaça, excreta animal, RSU (aterro), esgoto	Digestão anaeróbia produzindo biogás para alimentar motores de combustão interna

Fonte: Do autor (2023).

No caso da combustão direta, o uso de ciclos Rankine convencionais ou ciclos Rankine orgânicos podem ser aplicados conforme a escala dos projetos específicos, uma vez que os ciclos convencionais são mais eficientes para elevadas temperaturas de combustão e os ciclos orgânicos conseguem se adequar para operação com fontes de calor a relativas baixas temperaturas, como é o caso de unidades de geração que fazem uso de recuperação de calor (MURGIA et al., 2017).

Evidentemente, unidades de geração localizadas em diferentes posições geográficas, expostas a diferentes condições ambientais de temperatura, pressão e umidade do ar, alimentadas com resíduos de biomassas de diversas naturezas, em quantidades diferentes, terão condições operacionais e parâmetros de operação específicos que a análise global proposta nesta pesquisa não conseguirá avaliar. Sendo assim, foram escolhidas as tecnologias mais maduras disponíveis, ajustadas pela escala de cada potencial de geração, e utilizando-se eficiências de conversão de referência encontradas a partir da literatura específica. Considerando esses critérios, chega-se à seleção de tecnologias apresentada na Tabela 14, assim como as eficiências de conversão utilizadas e respectivos fatores de capacidade.

Tabela 14 Faixa de capacidade e eficiências típicas de diferentes tecnologias.

<i>Biomassa</i>	<i>Tecnologia</i>	<i>Eficiência</i>	<i>Fator de Capacidade</i>
Agrícolas			
Milho	CRC	20%	60%
Amendoim	ORC	20%	60%
Feijão	ORC	20%	60%
Cana-de-açúcar	CRC	20%	60%
Vinhaça	BD/ICE	28%	60%
Cevada	ORC	20%	60%
Algodão	ORC	20%	60%
Arroz	CRC	20%	60%
Aveia	ORC	20%	60%
Café	ORC	20%	60%
Centeio	ORC	20%	60%
Dendê	ORC	20%	60%
Mandioca	ORC	20%	60%
Soja	CRC	20%	60%
Sorgo	ORC	20%	60%
Trigo	ORC	20%	60%
Carvão Vegetal			
Carvão Vegetal	CRC	24%	90%
Gases Carbonização	ICE	24%	80%
Esgoto	BD/ICE	25%	80%
Excretas			
Bovinos	BD/ICE	28%	80%
Galináceos	BD/ICE	28%	80%
Suínos	BD/ICE	28%	80%
Florestais			
Eucalipto	CRC	20%	80%
Pinus	CRC	20%	80%
Licor Negro	CRC	24%	90%
RSU			
Incineração	CRC	22%	80%
Aterro	BD/ICE	39%	80%

Fonte: Do autor (2023).

Em relação ao cálculo do potencial técnico, duas versões foram realizadas: i) uma considerando o conceito de potência firme - medido em MW médios – ii) e outra

considerando o conceito de potência instalada - medido em MW nominais. Para o cálculo do potencial técnico em MW médios, utiliza-se apenas o produto do potencial teórico, medido em MW, e da eficiência de conversão. Obtém-se como resultado a potência que seria gerada por usinas operando em 100% do tempo, sem precisar considerar o fator de capacidade. Nesse caso, o potencial técnico medido em MW médios já é uma referência da quantidade de energia elétrica que seria disponibilizada ao sistema, sendo, portanto, uma medida mais eficaz para avaliar o potencial nacional de geração a partir da bioenergia.

A outra medida do potencial técnico, indicado em MW nominais, considera as diferentes usinas operando de acordo com a sua disponibilidade e é calculado a partir da razão entre o potencial técnico em MW médios e o fator de capacidade. Os fatores de capacidade foram obtidos de acordo com o Plano Nacional de Energia 2050 (EPE, 2020), sendo igual a 60% para resíduos agrícolas, 90% para licor negro e 80% para outras aplicações.

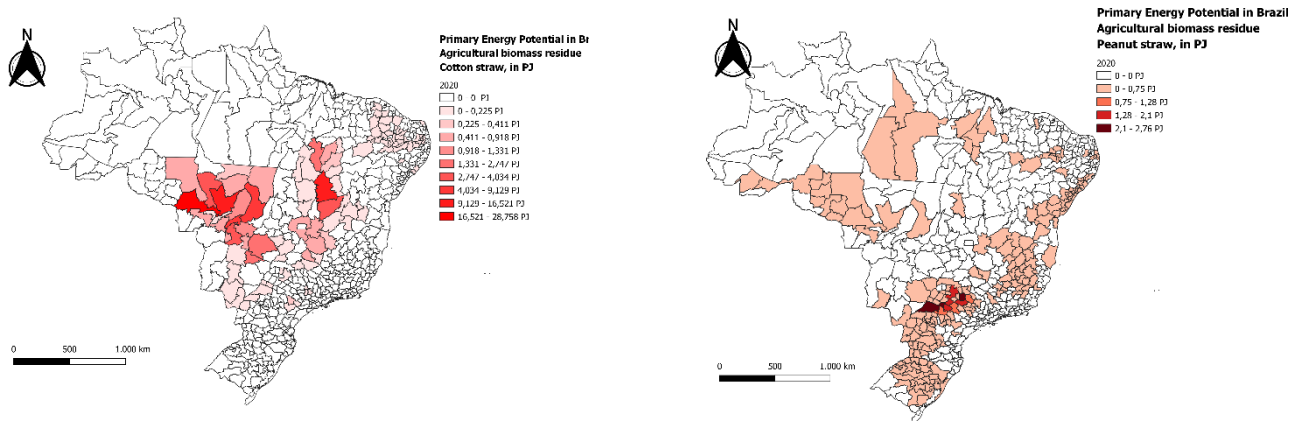
CAPÍTULO - IV

4 Resultados e discussão

O presente capítulo aponta os resultados obtidos para os potenciais teóricos e técnicos das biomassas residuais. Os mapas de potencialidade gerados na ferramenta QGIS são apresentados, bem como as tabelas com respectivos valores calculados.

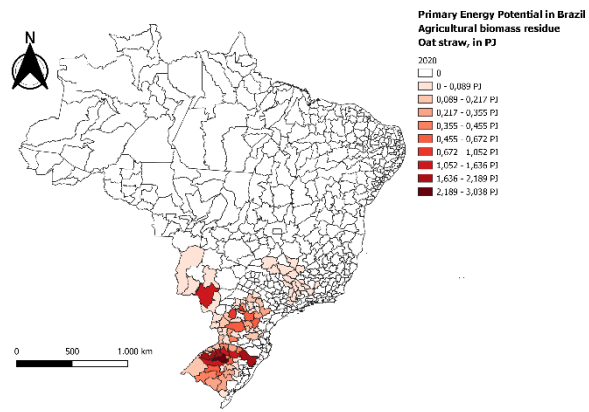
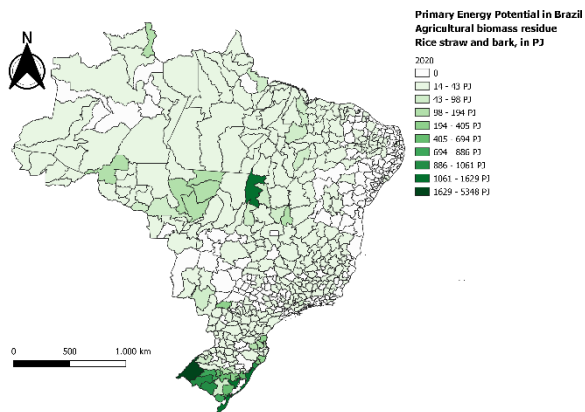
4.1 Potencial energético primário agrícola e florestal

O potencial energético primário dos principais resíduos agrícolas do país por microrregiões em Petajoule ($1PJ = 10^{15}J$) é dado pela Figura 23. A cana-de-açúcar apresentou-se como a maior fonte de bioenergia do país, com valores de produção de energia primária de até 224,1 PJ/ano no município de São José do Rio Preto, no Estado de São Paulo. Seguem-se a palha de milho 128,23 PJ.ano⁻¹ e a palha de soja com 86,14 PJ.ano⁻¹ em Alto Teles Pires, Mato Grosso, e a palha de algodão 28,75 PJ/ano em Parecis, também Mato Grosso. As concentrações desses potenciais ocorrem na região Centro-Oeste do Brasil.



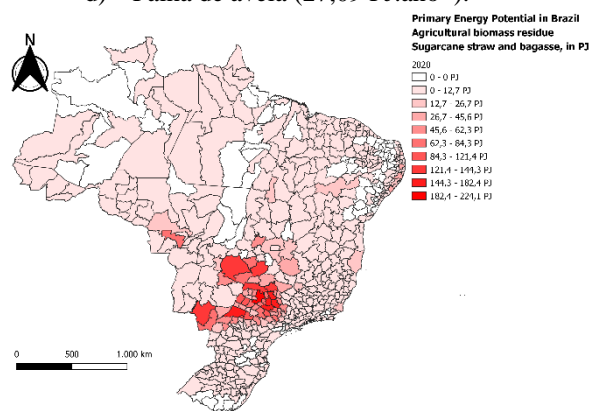
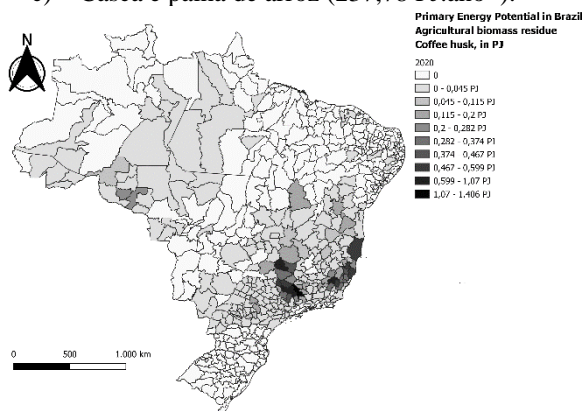
a) Palha de algodão (101,16 PJ.ano⁻¹).

b) Palha de amendoim (25,43 PJ.ano⁻¹).



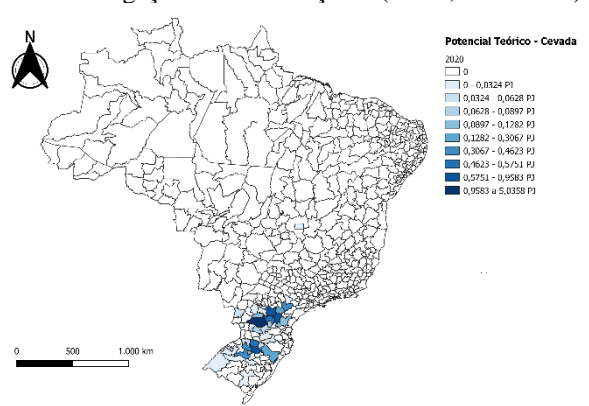
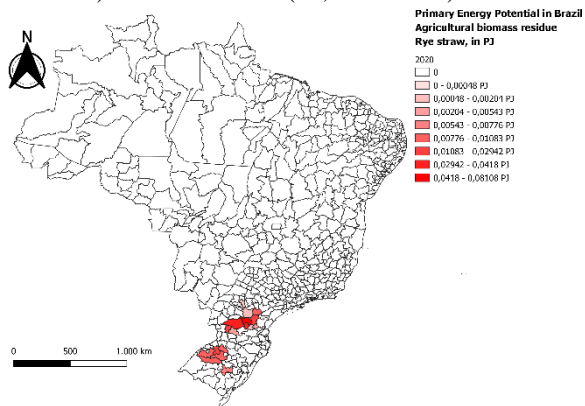
c) Casca e palha de arroz (237,78 PJ.ano⁻¹).

d) Palha de aveia (27,09 PJ.ano⁻¹).



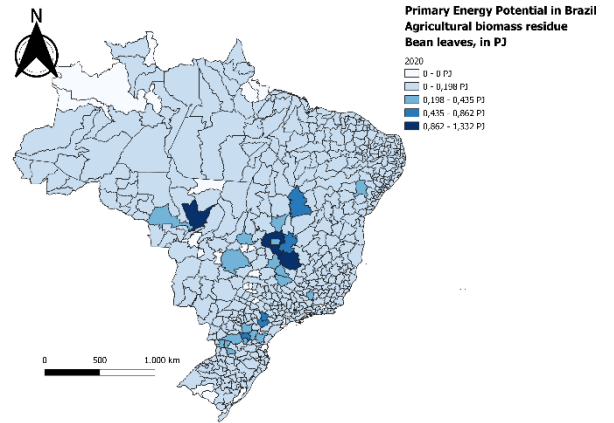
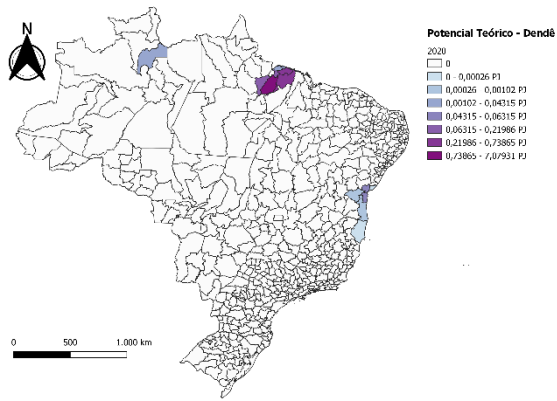
e) Casca de café (18,01 PJ.ano⁻¹).

f) Palha e bagaço de cana-de-açúcar (5.129,51 PJ.ano⁻¹).

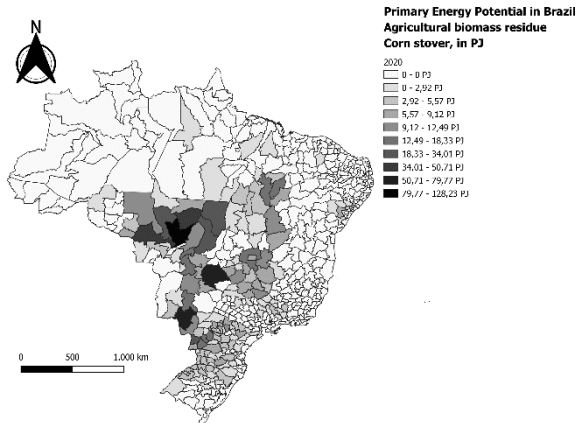


g) Palha de centeio (0,30 PJ.ano⁻¹).

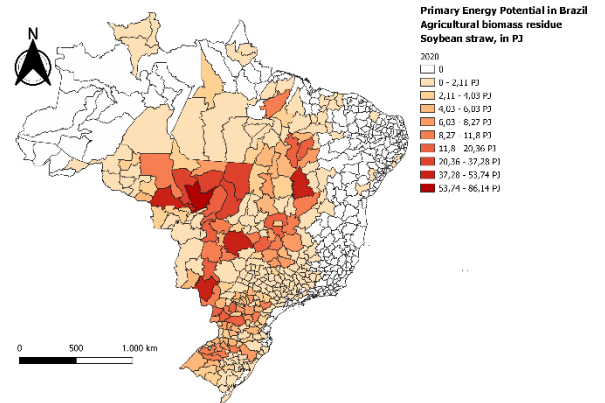
h) Palha de cevada (11,28 PJ.ano⁻¹).



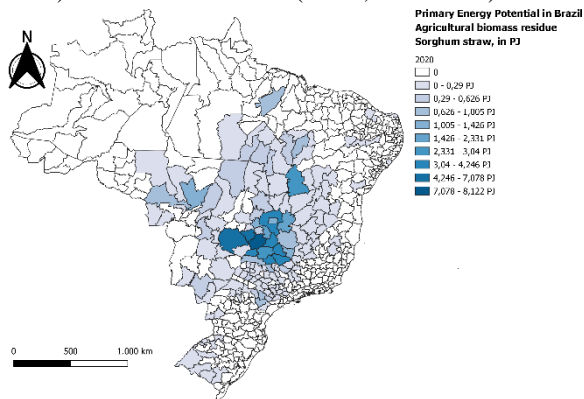
i) Fibras, cachos e casca de dendê (15,14 PJ.ano⁻¹).



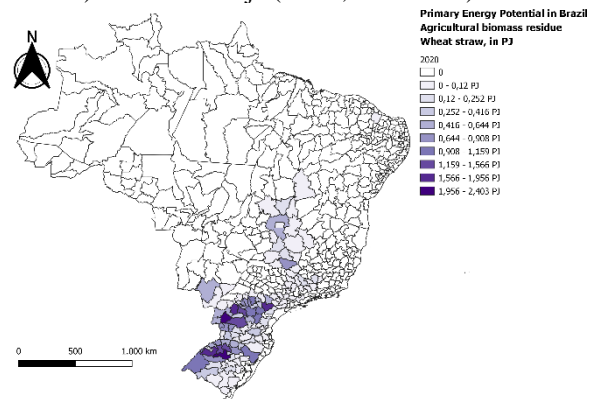
j) Folhas de feijão (22,58 PJ.ano⁻¹).



k) Restolho de milho (1.236,58 PJ.ano⁻¹).

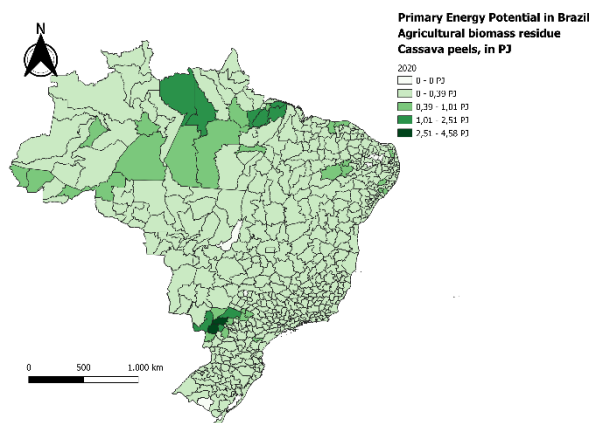


l) Palha de soja (1.226,99 PJ.ano⁻¹).



m) Palha de sorgo (80,23 PJ.ano⁻¹).

n) Palha de trigo (44,22 PJ.ano⁻¹).



o) Casca de mandioca (75,73 PJ.ano⁻¹).

Figura 23 Mapas de potencialidade teórica das biomassas residuais no Brasil, em PJ.ano⁻¹.
Fonte: Do autor (2023).

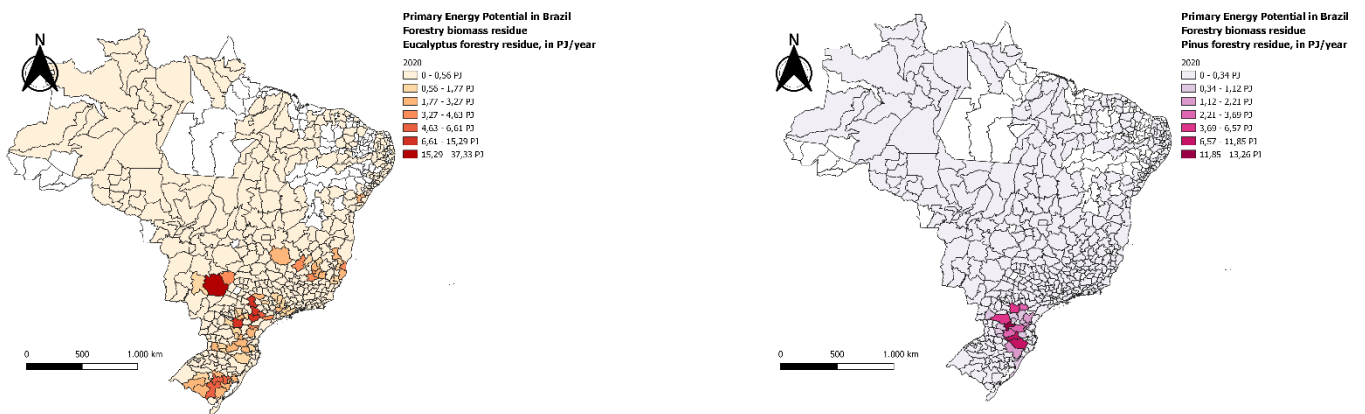
A energia primária total de resíduos agrícolas no Brasil é de 8.359,46 PJ.ano⁻¹, com destaque para os resíduos de cana-de-açúcar, milho e soja (Tabela 15).

Tabela 15 Total de energia primária disponível por resíduo agrícola no Brasil.

Cultivo	Biomassa residual	Energia primária [PJ/ano]
Algodão	Palha	101.16
Amendoim	Palha	25.43
Arroz	Palha	110.02
	Casca	127.76
Aveia	Palha	27.09
Café	Casca	18.01
Cana-de-açúcar	Palha	1,829.85
	Bagaço	3,299.66
Centeio	Palha	0.30
Cevada	Palha	11.28
Dendê	Casca	2.14
	Fibras	4.30
	Cachos	8.70
Feijão	Folhas	22.58
Milho	Restolho	1,236.58
Soja	Palha	1,226.99
Sorgo	Palha	80.23
Trigo	Palha	44.22
Mandioca	Casca	75.73
Total		8.359,46

Fonte: Do autor (2023).

Os potenciais teóricos da biomassa florestal residual de pinus e eucalipto são apresentados na Figura 24, utilizando como quantidade residual 20% da produção total de madeira (FERREIRA-LEITÃO et al., 2010). Os maiores potenciais calculados para o eucalipto foram em Três Lagoas no Estado do Mato Grosso do Sul (MS), com energia primária disponível de 0,037 PJ/ano, seguido de Telêmaco Borba no Paraná (PR), com 0,015 PJ/ano. Já as maiores quantidades de energia primária disponíveis a partir dos resíduos do cultivo de Pinus concentram-se na Região Sul. De fato, em União da Vitória (PR) e Campos de Lages, em Santa Catarina (SC), estão disponíveis 0,013 PJ/ano e 0,011 PJ/ano de resíduos florestais de Pinus.



- a) Resíduo florestal de eucalipto (395,85 PJ.ano⁻¹).
 b) Pine forestry residue (82,06 PJ.ano⁻¹).

Figura 24 Potencial teórico da biomassa residual das florestas de eucalipto e pinus, em PJ.ano⁻¹.

Fonte: Do autor (2023).

Avalia-se pelos mapas que os resíduos florestais de Eucalyptus e Pinus no Brasil têm maior ocorrência na Região Sul do país. A energia primária total disponível para o Eucalipto é de 385,95 PJ/ano e para o Pinus 86,02 PJ/ano, totalizando 471,97 PJ/ano em energia primária de resíduos florestais para o país (Tabela 16).

Tabela 16 Total de energia primária disponível por resíduo agrícola no Brasil.

Cultivo	Biomassa residual	Energia primária [PJ. ano ⁻¹]
Eucalipto	Resíduos florestais	395,85
Pinus		82,06
Total		477,91

Fonte: Do autor (2023).

4.1.1 Vinhaça

O Brasil é um dos maiores produtores de cana-de-açúcar e etanol do mundo, o que significa que o potencial de geração de eletricidade a partir da vinhaça no país é significativo. Os resultados obtidos confirmam essa realidade. O potencial teórico total que pode ser recuperado energeticamente a partir do biogás gerado a partir da vinhaça no

Brasil é de 98,19 PJ/ano. Os municípios de São José do Rio Preto (SP), São Joaquim da Barra (SP) e Ribeirão Preto (SP) detêm os potenciais de 4,29 PJ/ano, 3,49 PJ/ano, 3,47 PJ/ano, respectivamente (Figura 25).

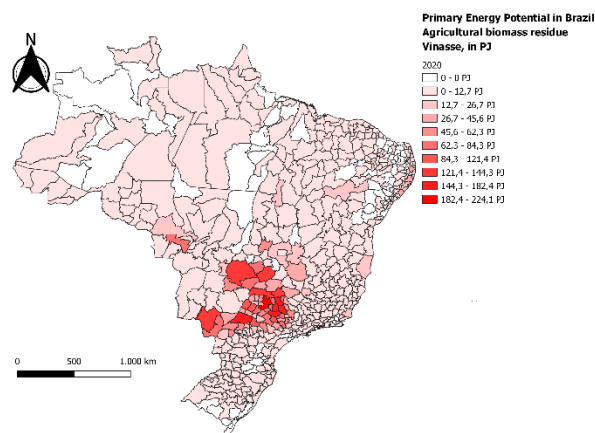


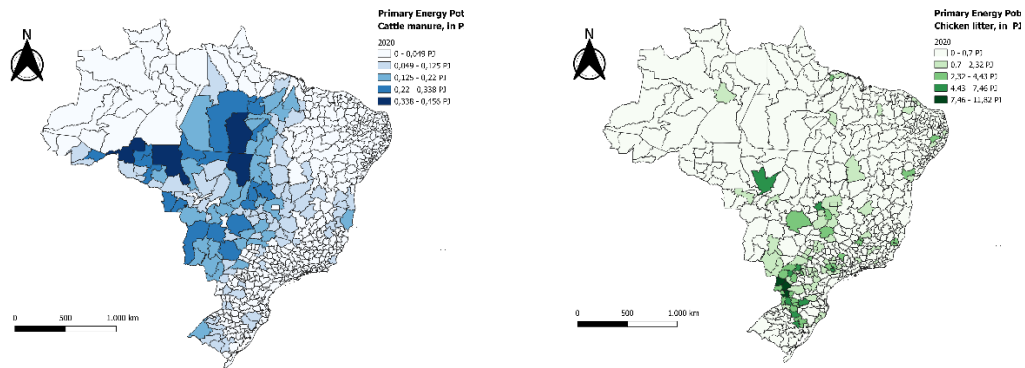
Figura 25 Potencial teórico da vinhaça da produção de etanol de cana-de-açúcar, em PJ.ano⁻¹.

Fonte: Do autor (2023).

Os resultados obtidos estão alinhados com um estudo prospectivo realizado pela EPE, sobre o potencial de geração renovável no Brasil. Esse estudo, realizado em 2016, projeta que, em 2022, o potencial teórico de disponibilidade da vinhaça para a geração de bioeletricidade seria em torno de 145 PJ (TOLMASQUIM, 2016). Em outros estudos já mencionados, Salomon & Lora (2009) estimaram o potencial técnico de geração a partir do biogás da vinhaça em torno de 850 MW, não muito distantes do potencial técnico encontrado neste trabalho, de 872 MW. Além disso, Nadaleti et al. (2020) encontraram um potencial de geração de energia elétrica de $2,15 \times 10^8$ kWh por dia de safra, o que seria equivalente a um potencial de 180 PJ/ano, considerando um ano com 240 dias de safra.

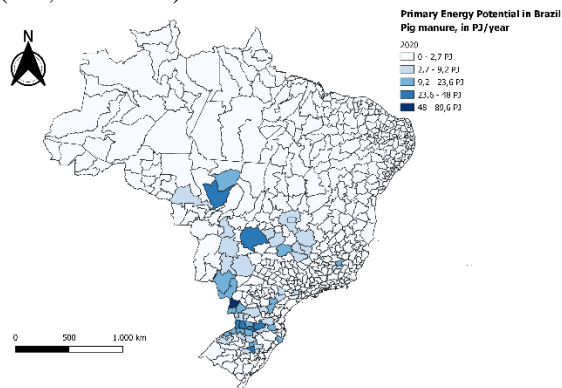
4.2 Potencial energético primário de excretas animais

A energia primária disponível a partir das excretas dos rebanhos bovinos, suínos e aves é apresentada na Figura 26. Os maiores valores de dejetos bovinos encontram-se no município de São Félix do Xingu, no estado do Pará (PA), com uma disponibilidade anual de 0,45 PJ/ano, Aripuanã (MT), com 0,44 PJ/ano e em Porto Velho, em Rondônia (RO), com 0,41 PJ/ano. Já na avicultura, Toledo (PR), com 11,81 PJ/ano, Cascavel (PR), com 10,13 PJ/ano, e Francisco Beltrão (PR), com 7,39 PJ/ano. O rebanho suíno em Toledo (PR) gera 89,62 PJ/ano, em Concórdia (SC) cerca de 48 PJ/ano, seguido de Joaçaba, no mesmo estado, com 45,25 PJ/ano.



a) Excreta bovina (357,36 PJ.ano⁻¹).

b) Cama de frango (321,89 PJ.ano⁻¹).



c) Excreta de suínos (87,71 PJ.ano⁻¹).

Figura 26 Potencial energético primário das excretas de bovinos, frangos e suínos, em PJ/ano.

Fonte: Do autor (2023).

A Tabela 17 lista a energia primária disponível para cada rebanho. A energia primária disponível do rebanho bovino, 357,36 PJ.ano⁻¹, é maior que a da avicultura, 321,89 PJ.ano⁻¹, embora esta última represente 82,39% do rebanho do país. Esse fato é dado pelas taxas de produção de esterco de cada animal: é de 15 kg/cabeça para bovinos, 0,18 kg/cabeça para aves poedeiras e 2,5 kg/cabeça para suínos (EPE, 2019). A energia primária disponível dos rebanhos suínos é de 87,71 PJ.ano⁻¹, pois representa 2,29% de todo o rebanho nacional avaliado.

Tabela 17 Energia primária total disponível a partir de dejetos de bovinos, suínos e aves em 2020 no Brasil, em PJ.ano⁻¹.

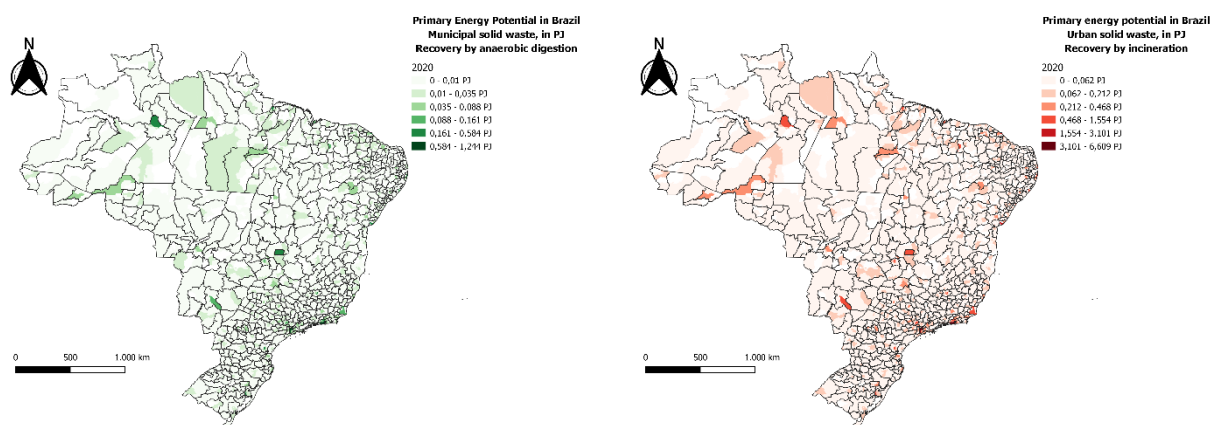
Rebanho	Biomassa residual	Energia primária [PJ.ano ⁻¹]
Bovina	Excreta	357,36
Suína		87,71
Galináceo		321,89
Total		766,96

Fonte: Do autor (2023).

4.3 Potencial energético dos RSU e esgotos

4.3.1 RSU

A avaliação da energia primária dos RSU no Brasil levou em consideração duas rotas para seu aproveitamento energético: a bioquímica e a termoquímica. Os resultados (Figura 27) apresentaram um total de $40,34 \text{ PJ.ano}^{-1}$ para aproveitamento energético do biogás considerando a biodigestão da matéria orgânica dos resíduos em aterros sanitários, com maior disponibilidade de energia primária em São Paulo e Rio de Janeiro, com $0,69 \text{ PJ.ano}^{-1}$ e $0,58 \text{ PJ.ano}^{-1}$, respectivamente. Em relação à incineração, $325,88 \text{ PJ.ano}^{-1}$ estão disponíveis para serem recuperados, sendo São Paulo, Rio de Janeiro e Fortaleza as cidades com maior disponibilidade de resíduos a serem recuperados de papel e papelão, plástico e matéria orgânica, com $17,05 \text{ PJ.ano}^{-1}$, $14,38 \text{ PJ.ano}^{-1}$ e 8 PJ.ano^{-1} , respectivamente.



a) Recuperação energética de RSU por digestão anaeróbia ($40,34 \text{ PJ.ano}^{-1}$).

b) Recuperação energética de RSU por incineração ($325,88 \text{ PJ.ano}^{-1}$).

Figura 27 Potencial energético primário de recuperação de RSU da digestão anaeróbia e incineração, em PJ.ano^{-1} .

Fonte: Do autor (2023).

Em termos de potencial técnico, os resultados encontrados foram de pouco mais de 500 MW a partir do aproveitamento do biogás gerado pelos RSU e de 2.270 MW a partir de incineração. Comparando os resultados com o encontrado em outros estudos, é possível citar Tolmasquim (2016) que estima em 1.040 MW o potencial técnico de geração a partir dos resíduos sólidos urbanos no Brasil, e Salomon& Lora (2009) que estimam esse potencial em 215 MW. No entanto, esse último estudo parece ter subestimado o potencial dessa fonte, pois atualmente já existem no Brasil 216 MW de potência instalada para exploração energética do biogás de aterro sanitário e esse valor pode chegar a 300 MW até 2031, conforme projetado pelo PDE 2031 (EPE, 2022b).

4.3.2 Esgotos

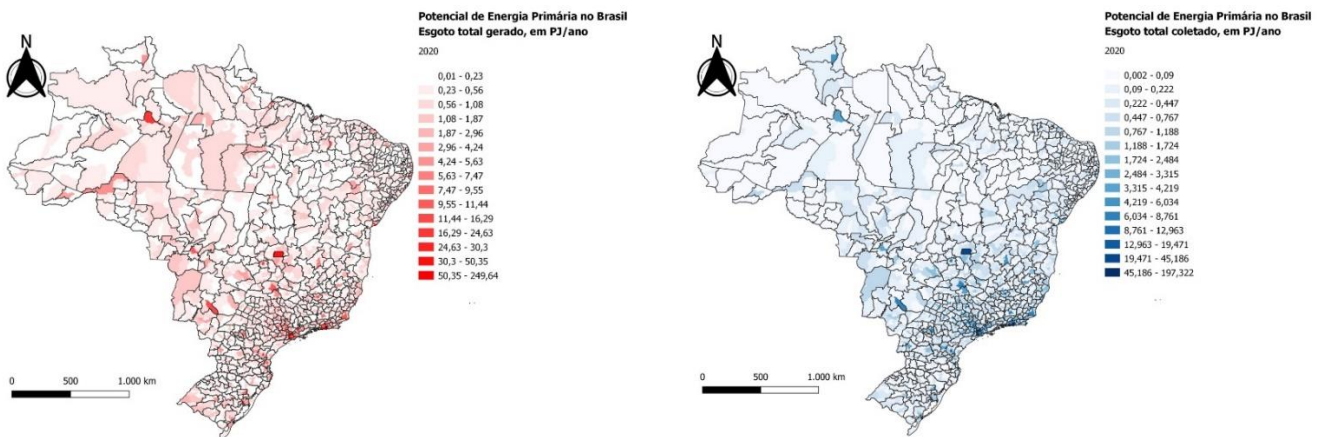
O potencial energético do esgoto foi mapeado a partir de três cenários. O primeiro cenário com recuperação total dos recursos de saneamento apresentou um potencial energético primário de 3.193 PJ.ano⁻¹. O segundo cenário apresentou o potencial de esgoto gerado e coletado de 1.935 PJ ano⁻¹ e o terceiro, que considera esgoto gerado, coletado e tratado, apresentou um potencial de 1.536 PJ/ano (Tabela 18).

Tabela 18 Energia primária de esgoto em todos os cenários, em PJ/ano.

Cenários	Energia primária [PJ. ano ⁻¹]
Cenário 01	3.193
Cenário 02	1.935
Cenário 03	1.536

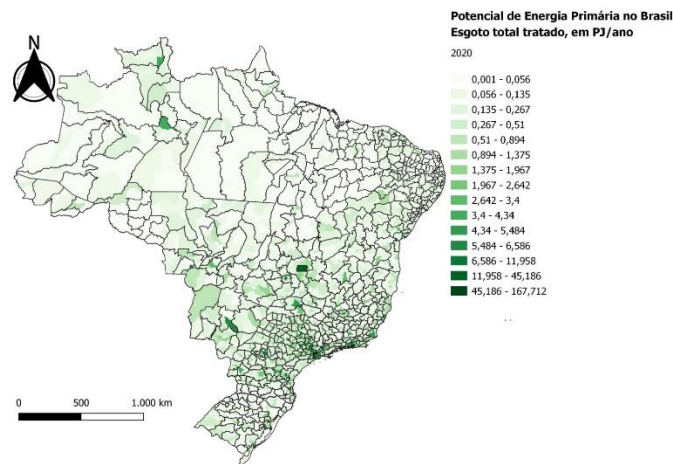
Fonte: Do autor (2023).

A Figura 28 apresenta os mapas de potencialidade para os três cenários avaliados.



a) Cenário 01 (3.193 PJ ano⁻¹).

b) Cenário 02 (1.935 PJ ano⁻¹).



c) Cenário 03 (1.536 PJ ano⁻¹).

Figura 28 Mapas de potencial energético primário de esgoto urbano no Brasil.

Fonte: Do autor (2023).

O estudo realizado indica que o potencial teórico de geração a partir do aproveitamento energético dos esgotos em todo o território brasileiro é de 1.536 PJ.ano⁻¹, o que equivale a 48,7 GW. Em termos técnicos, o potencial de geração se reduz para 12,2 GW. Os valores representam uma parte significativa do potencial de geração a partir de fontes de biomassa no Brasil, no entanto se reconhece a dificuldade de implantação deste tipo de geração devido à ampla extensão territorial brasileira e o ainda baixo nível de atendimento da população por redes de coleta de esgoto. Segundo informações do SNIS, apenas 54% da população brasileira é atendida com rede coletora de esgoto (SNIS, 2021).

Em localidades onde não há rede coletora de esgoto, uma alternativa para o aproveitamento energético é a utilização de sistemas descentralizados de tratamento de efluentes que incorporam a DA. Essas instalações descentralizadas são alimentadas por esgoto coletado e transportado em lotes, com resultados satisfatórios, mas com potencial de geração restrito pela escala e distâncias envolvidas.

4.4 Potencial energético da indústria de papel e celulose

Os potenciais energéticos primários calculados para cada unidade industrial são apresentados na Tabela 19. O valor utilizado para a produção anual de celulose foi de 17.992.274 toneladas (EPE, 2021) e a produção total de licor negro foi de 35.371.987 toneladas (MME, 2020).

Tabela 19 Indústrias de papel e celulose no Brasil e suas respectivas capacidades, em mil t/ano, e potencial energético primário gerado, em PJ. Ano⁻¹.

Fabricante	Município	Capacidade de Produção de Celulose [mil t/ano]	Potencial Teórico [PJ/ano]
International Paper	Luiz Antônio (SP)	410	9,53
International Paper	Mogi Guaçu (SP)	400	9,29
Suzano	Suzano (SP)	400	9,29
Suzano	Limeira (SP)	170	3,95
Fibria	Jacareí (SP)	1,100	25,57
Veracel	Eunápolis (BA)	1,100	25,57
Cenibra	Belo Oriente (MG)	1,200	27,89
Klabin	Ortigueira (PR)	1,500	34,87
Suzano	Mucuri (BA)	1,540	35,80
Suzano	Imperatriz (MA)	1,650	38,36
Eldorado	Três Lagoas (MS)	1,700	39,52
Celulose Riograndense	Guaíba (RS)	1,750	40,68
Fibria	Aracruz (ES)	2,340	54,40
Fibria	Três Lagoas (MS)	3,200	74,39
Total capacity		18,460	429,19

Fonte: Do autor (2023).

O potencial energético do licor negro das indústrias de celulose e papel é apresentado na Figura 29. Conforme apresentado na Tabela 19, o maior potencial prospectado foi na fabricante Fibria, no município de Três Lagoas, no Estado do Mato Grosso do Sul (MS).

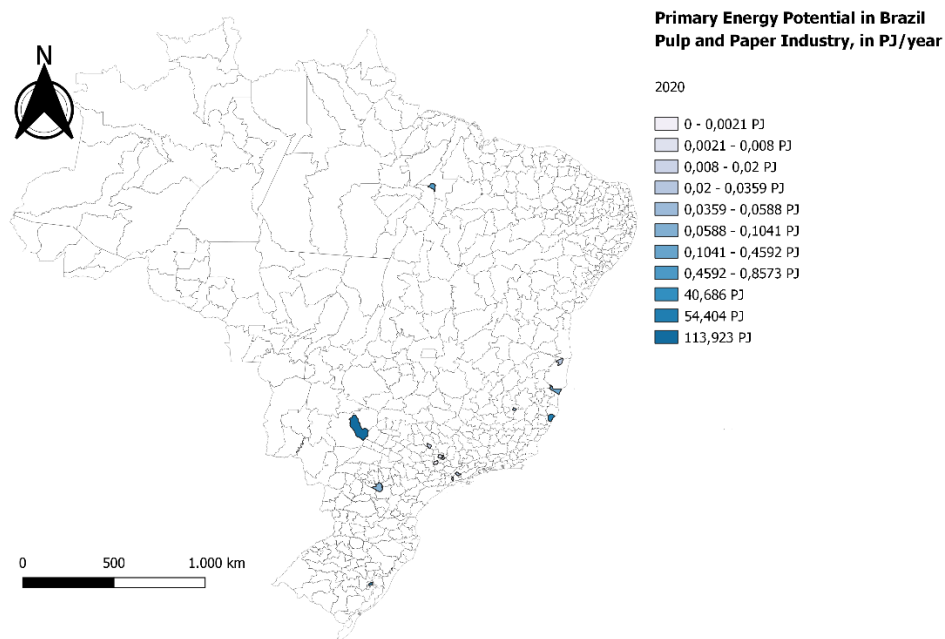
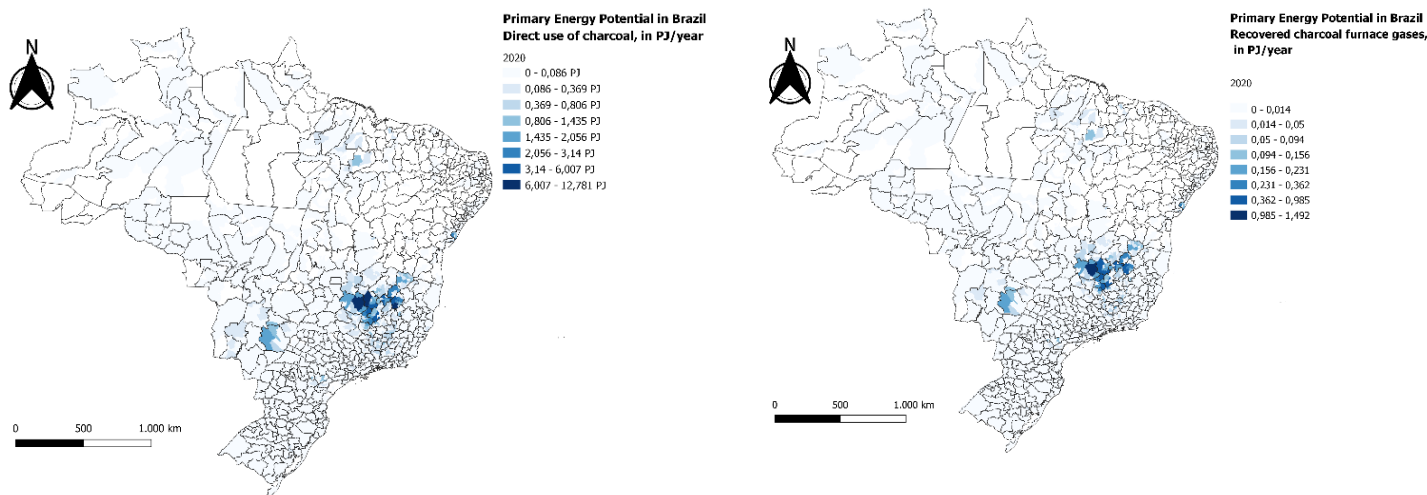


Figura 29 Potencial energético primário do licor negro das indústrias de celulose e papel no Brasil, em PJ.ano⁻¹.
Fonte: Do autor (2023).

4.5 Potencial energético primário da recuperação energética do carvão vegetal e gases dos fornos

Os dois cenários avaliados para o carvão vegetal foram elaborados com base no seu uso de energia direta e nos gases de exaustão dos fornos. O potencial avaliado para uma produção nacional de mais de 6 milhões de toneladas de carvão vegetal foi de 181,08 PJ.ano⁻¹. Para os gases de forno provenientes de sua carbonização, o potencial chegou a 66,73 PJ.ano⁻¹ para geração de mais de 3,5 milhões de toneladas de carvão vegetal por ano. A Figura 30 apresenta esses dados de forma georreferenciada.



a) Uso direto do carvão (181.08 PJ.ano⁻¹).

b) Recuperação energética dos gases de carbonização (66.73 PJ.ano⁻¹).

Figura 30 Mapas de potencial energético de carvão vegetal e gases de forno no Brasil.
Fonte: Do autor (2023).

A Tabela 20 apresenta o total de energia gerada.

Tabela 20 Potencial energético primário da carvoaria, em PJ.ano⁻¹.

Cenários	Energia primária [PJ/ ano]
Uso direto do carvão (cenário 01)	181,08
Recuperação energética dos gases de carbonização (cenário 02)	66,73
Total	247,81

Fonte: Do autor (2023).

Os resultados mostram que a geração de energia elétrica a partir do carvão vegetal ou do aproveitamento dos gases gerados na carbonização da madeira têm um potencial significativo em termos de produção de eletricidade, embora também apresentem desafios e considerações ambientais. A utilização direta do carvão vegetal possui um potencial maior (181 PJ/ano), mas requer a sua destinação para esse fim, desviando-o de outros usos, como o siderúrgico, por exemplo. Já no aproveitamento dos gases gerados no processo de carbonização da madeira, não existe essa competição de usos. É possível aproveitar energeticamente os materiais voláteis liberados durante a produção do carvão vegetal sem provocar qualquer influência negativa ou queda de produtividade. Além disso, em todos os casos, seja no uso direto do carvão vegetal ou no aproveitamento dos gases, é preciso garantir que o manejo da madeira tenha sido feito de maneira adequada, para garantir os benefícios ambientais da bioenergia.

4.6 O potencial técnico da biomassa residual

De acordo com os critérios definidos na seção de metodologia, foi possível calcular os potenciais técnicos a partir dos potenciais teóricos já levantados. Os resultados são apresentados na Tabela 21 abaixo, que também apresenta os valores da potência instalada real, indicador também utilizado no Sistema de Informações de Geração da ANEEL (2023). Os potenciais técnicos são apresentados em duas medidas: MW_{med} e MW_{nom}, sendo que a primeira representa a potência média que seria produzida uniformemente ao longo do ano, distribuindo a energia gerada pelas 8760 horas do ano, enquanto a segunda medida representa a potência nominal, levando em consideração o fator de capacidade, que reduz as horas equivalentes de operação da planta, portanto requer maior potência instalada para uma mesma geração anual.

Tabela 21 Potencial teórico e técnico das biomassas no Brasil, em 2020.

Biomassa	η [%]	Potencial			Potência instalada de bioeletricidade [MW]
		Teórico [PJ.ano ⁻¹]	Técnico [MW _{med}]	Técnico [MW _{nom}]	
Agrícola	20	8.359,46	53.165,14	88.608,56	12,176.91
Milho	20	1,236.58	7,842.37	13,070.62	
Amendoim	20	25.43	161.30	268.83	
Feijão	20	22.58	143.19	238.65	
Cana-de-açúcar	20	5,129.52	32,531.23	54,218.72	
Vinhaça	28	98,19	871,78	1.452,96	
Cevada	20	11.28	71.51	119.19	
Algodão	20	101.16	641.55	1,069.25	
Arroz	20	237.79	1,508.06	2,513.44	
Aveia	20	27.09	171.78	286.30	
Café	20	18.01	114.22	190.37	
Centeio	20	0.30	1.90	3.17	
Dendê	20	8.70	55.18	91.97	
Mandioca	20	75.73	480.30	800.50	
Soja	20	1,226.99	7,781.52	12,969.20	
Sorgo	20	80.23	508.81	848.01	
Trigo	20	44.22	280.44	467.40	
Florestal	20	477.91	3,030.89	3.788,61	662.69
Eucalipto	20	395.85	2,510.48	3.138,10	
Pinus	20	82.06	520.41	650,51	
Ind. Carvão vegetal	24	247.81	2,420.92	3.026,15	38.20

Carvão vegetal	24	181.08	1,722.63	2.153,29	
Gases de carbonização	24	66.73	698.29	872,87	
Excretas	28	766.96	6,809.62	8.512,02	4.89
Bovino	28	357.36	3,172.91	3.966,14	
Suíno	28	87.71	778.72	973,40	
Galinhas	28	321.89	2,857.98	3.572,48	
RSU	23.9	366.21	2,779.87	3.474,84	234.55
Incineração	22	325.88	2,273.36	2.841,69	24.41
Biogás	39.6	40.34	506.52	633,15	210.14
Esgotos	25	1,536.48	15,180.37	15.225,47	-
Licor Negro	24.5	429.19	3,334.33	3.704,81	3,285.44
Total		12,568,14	86.766,24	130.146,84	16,402.68

Fonte: Do autor (2023).

O gráfico da Figura 31 mostra os valores totais de capacidade teórica, técnica e instalada, em GW, para os principais tipos de resíduos de biomassa disponíveis no Brasil.

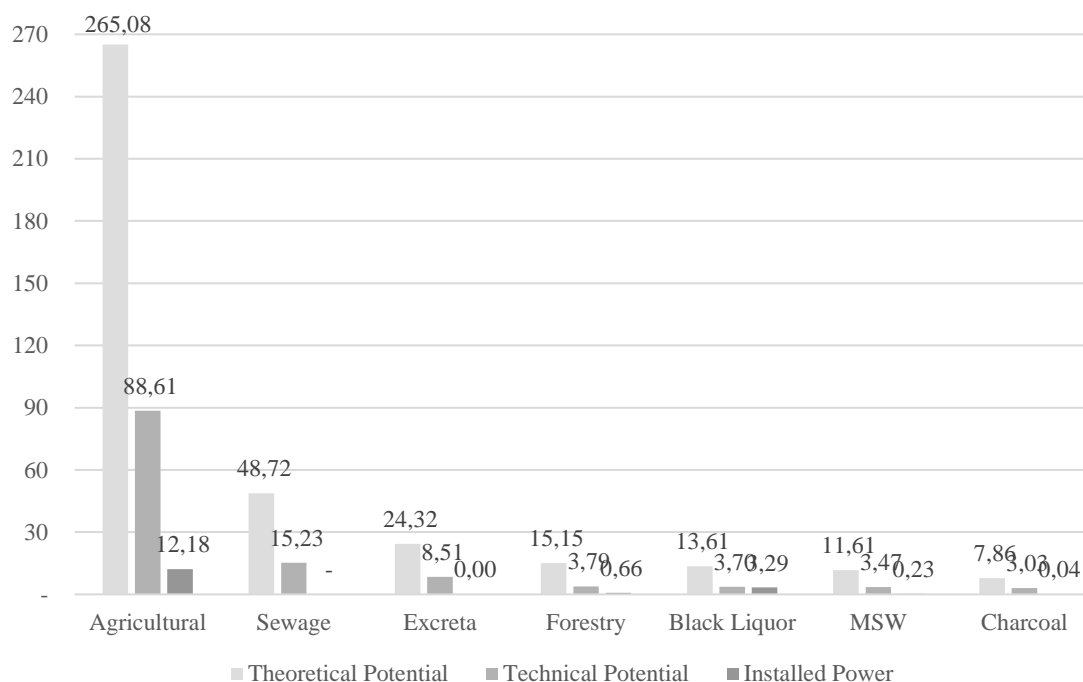


Figura 31 Potencial teórico-técnico e capacidade instalada de resíduos de biomassa, em GW.

Fonte: Do autor (2023).

O gráfico da Figura 32 mostra uma análise de Pareto dos potenciais técnicos que poderiam ser gerados, em termos nominais, pela bioenergia no Brasil. Pode-se observar que cana-de-açúcar, esgoto, milho, soja e licor negro respondem por 80% do potencial técnico bioenergético de geração.

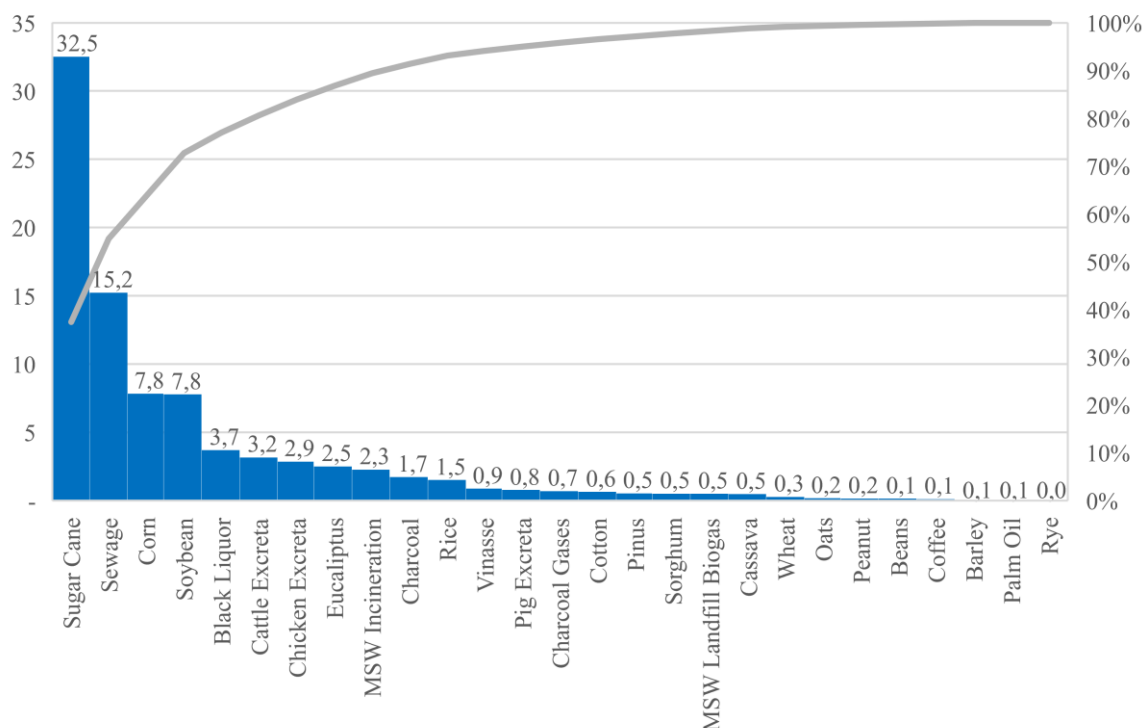


Figura 32 Análise de Pareto do Potencial Técnico Bioenergético de resíduos de biomassa, em GW.
Fonte: Do autor (2023).

Ao serem avaliados os potenciais teóricos, em PJ.ano⁻¹ por estado, São Paulo se apresenta com a maior contribuição nacional, seguido de Minas Gerais, Paraná e Mato Grosso (Figura 33).

Potencial teórico bioenergético nos Estados, em PJ.ano⁻¹

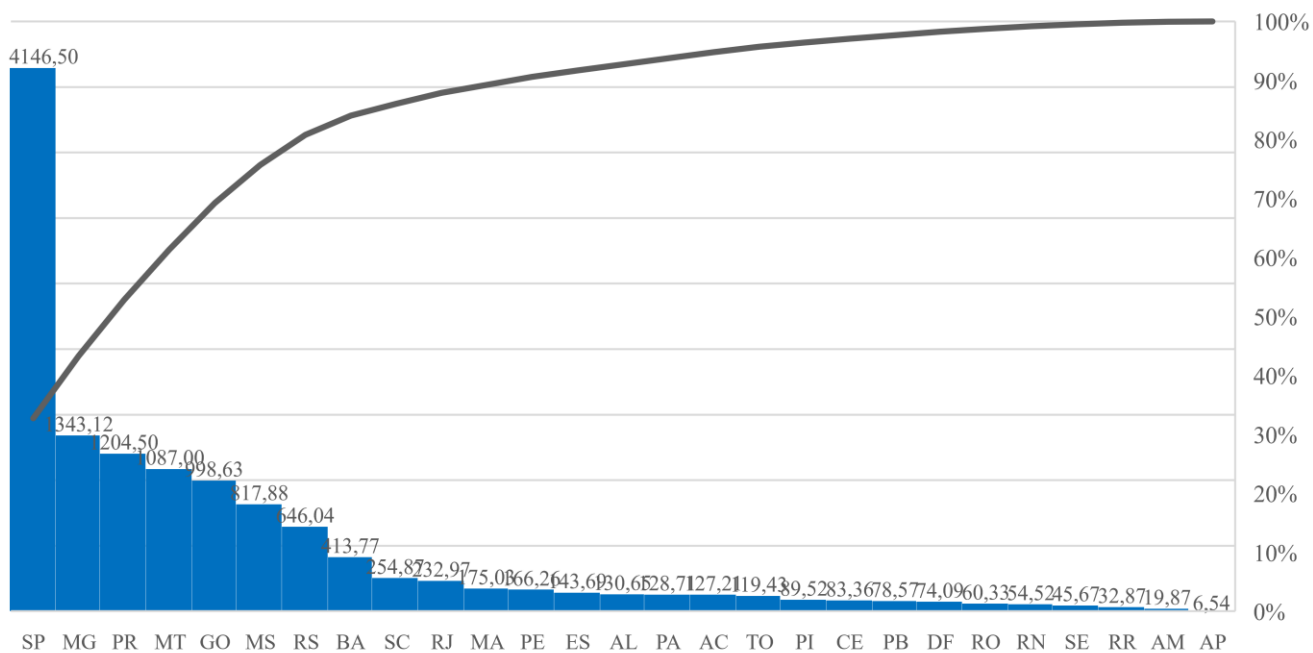


Figura 33 Pareto com as contribuições de potencial teórico bioenergético nos estados, em PJ. ano-1.
Fonte: Do autor (2023).

Portanto, os maiores potenciais de geração a partir da biomassa no Brasil se encontram na região Sudeste, e, como apresentado no gráfico anterior, nos Estados de São Paulo e Minas Gerais (Figura 34).

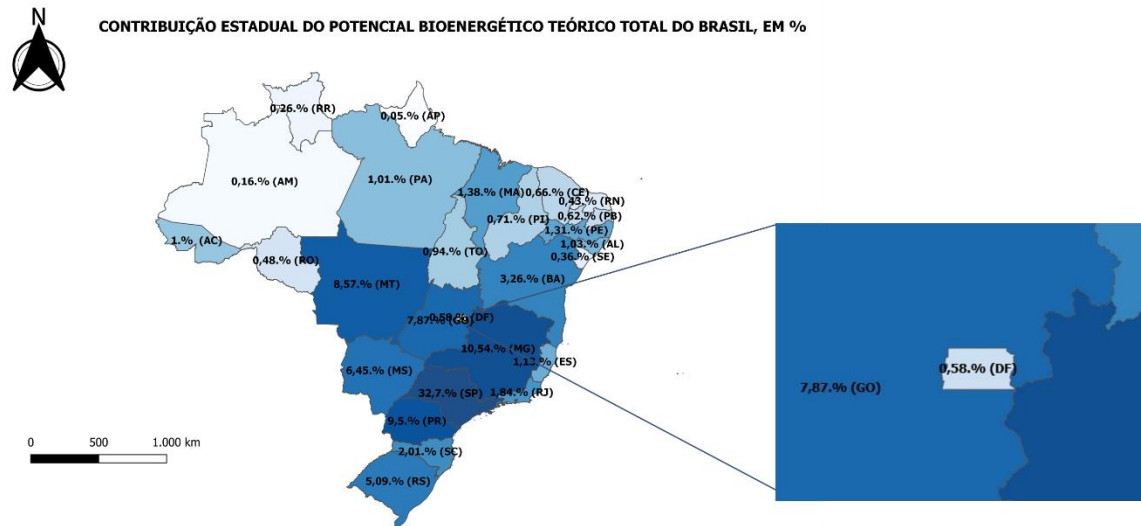
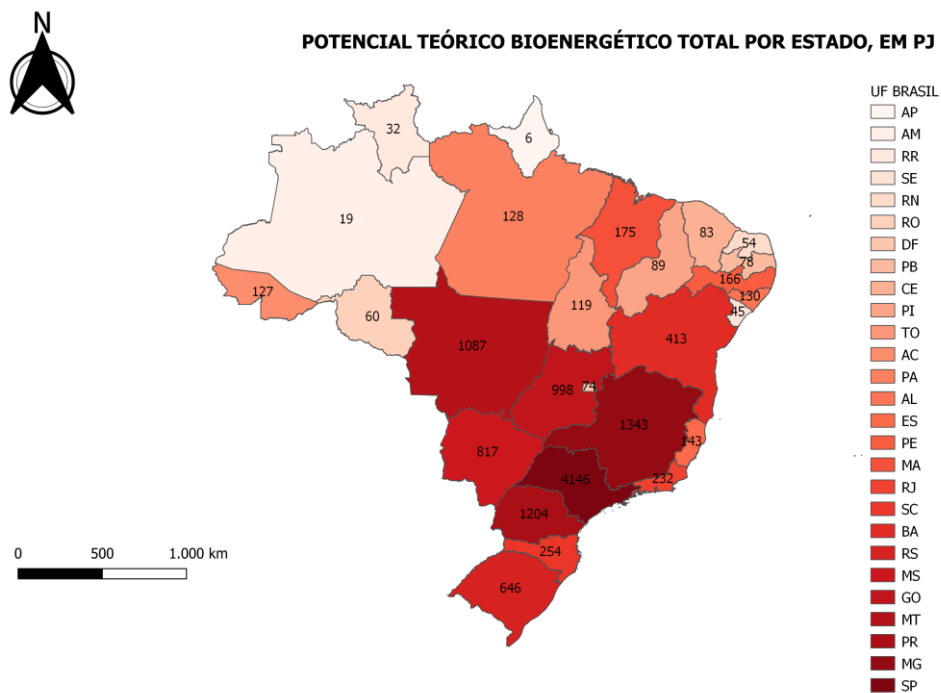


Figura 34 Mapa de contribuição percentual estadual da potencialidade bioenergética no Brasil.
Fonte: Do autor (2023).

As biomassas residuais agrícolas predominam no potencial de geração dos estados. Quando não há uma produção agrícola relevante no estado, outras fontes ganham espaço, como esgotos e RSU nos estados mais populosos (Figura 35).



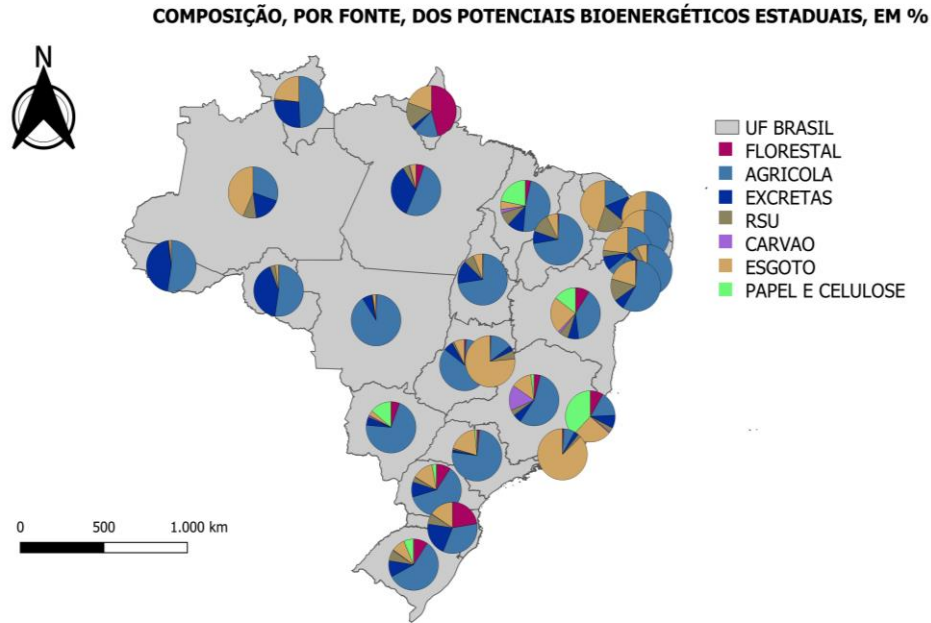


Figura 35 Mapas com i) graduação do potencial teórico nos estados, em PJ. ano-1 e ii) composição por fonte.

Fonte: Do autor (2023).

Os potenciais bioenergéticos técnicos, em MW, por Estados podem ser analisados no gráfico de Pareto, Figura 36 a seguir.

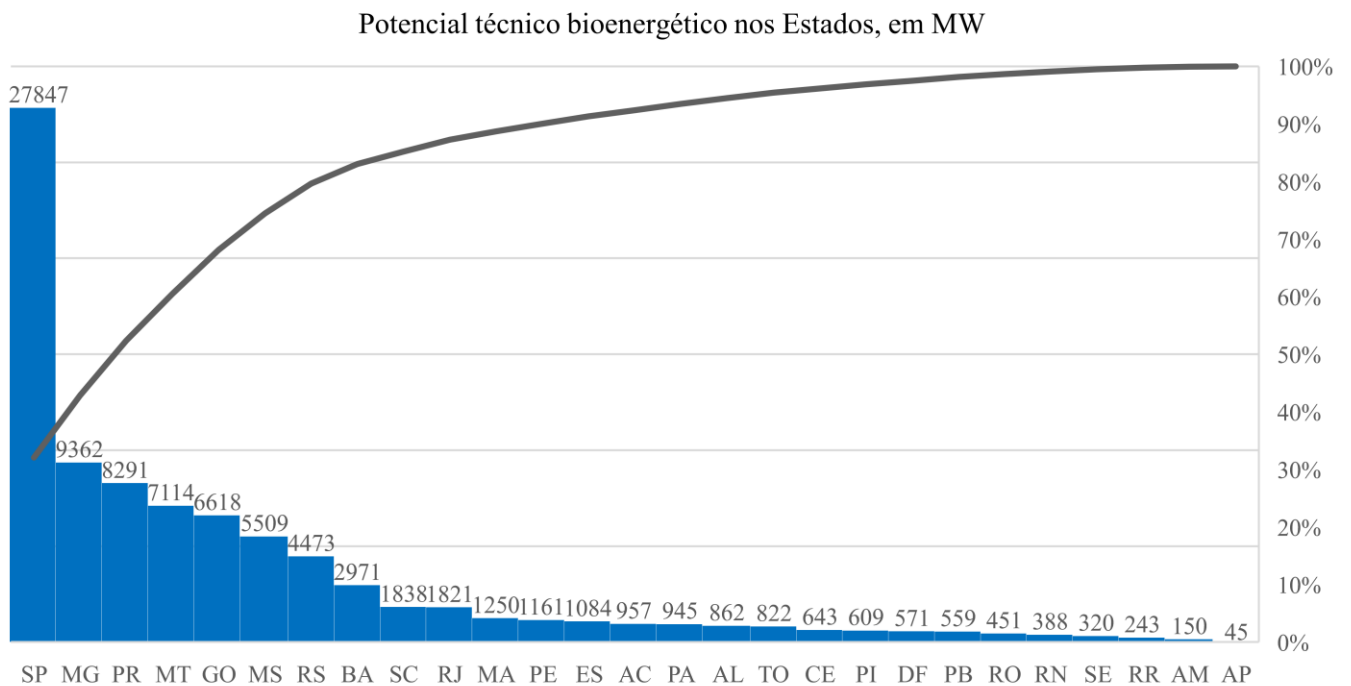


Figura 36 Potencial técnico bioenergético nos Estados, em MW.

Fonte: Do autor (2023)

O gráfico da Figura 37 apresenta os valores totais de capacidade teórica, técnica e instalada. A capacidade instalada refere-se à capacidade atual de todas as usinas que

utilizam fontes de biomassa consideradas no estudo e a capacidade instalada total refere-se a toda a capacidade de geração brasileira. Em ambos os cenários, são consideradas as usinas já em operação.

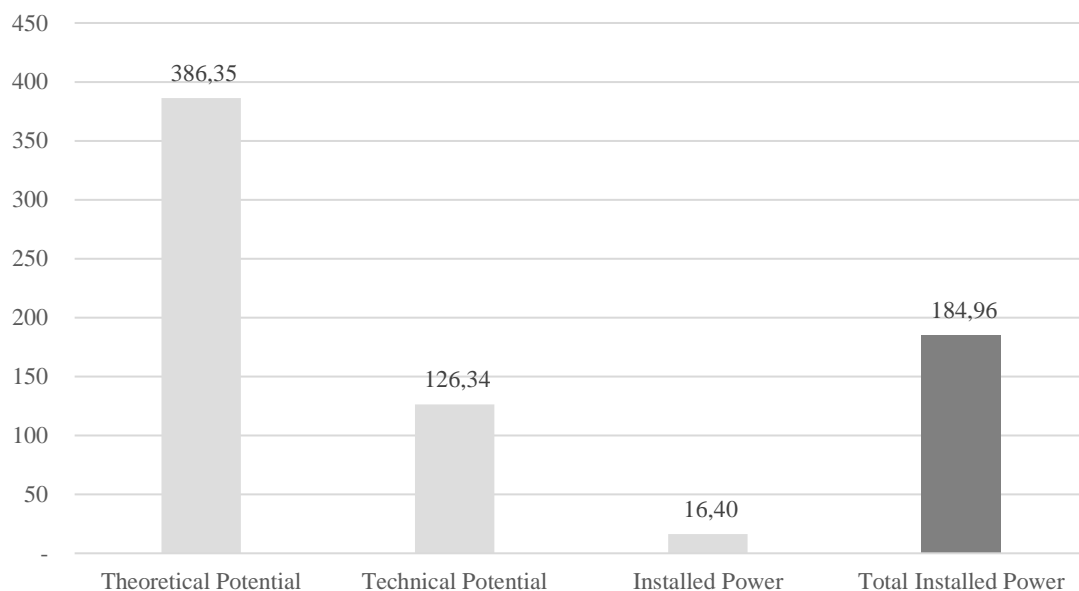


Figura 37 Potencialidades teóricas e técnicas das biomassas estudadas, potência instalada atual de bioenergia e potência instalada nacional total, em GW.

Fonte: Do autor (2022); adaptado de ANEEL (2022).

Todas as vezes em que a umidade do resíduo é alta, é mais vantajoso gerar biogás e queimar o biogás em motores de combustão interna para gerar energia. Alternativamente, seria possível queimar o biogás em geradores de vapor (caldeiras) para acionar um ciclo Rankine, sendo mais eficiente realizar a queima direta do gás em motores. O raciocínio contrário também pode ser utilizado para resíduos sólidos e secos. Também seria possível gaseificá-los e utilizar o gás gerado para a produção de energia, mas normalmente é mais simples e confiável realizar a queima direta dos resíduos sólidos em uma caldeira e produzir vapor.

Quanto ao segundo cenário considerando a medida de MW nominais, esta é útil para comparação com a capacidade já instalada a partir de outras fontes, mas não é um bom indicador da quantidade de eletricidade efetivamente gerada.

Além dos 16,4 GW já instalados e em operação, que se referem basicamente à exploração de cana-de-açúcar e licor negro, e que representam 9,1% do total da potência brasileira instalada e regulada pela ANEEL, é tecnicamente possível realizar um aproveitamento mais amplo do potencial de bioenergia brasileiro, representando a instalação de outros 109,9 GW a partir de resíduos de biomassa.

Capítulo - V

5 Conclusões

Existe um potencial significativo de conversão energética da biomassa residual no Brasil, distribuído de forma desigual em diversas microrregiões, cada uma contribuindo de forma particular para o potencial total. Entender como ocorre essa distribuição pode contribuir para um melhor planejamento energético, considerando o uso das diversas fontes disponíveis.

Observou-se cerca de 12.184 PJ/ano de energia primária disponível na biomassa residual onde mais de 50% deste potencial está concentrado nos rejeitos das culturas de cana-de-açúcar, milho e soja, concentrados em microrregiões do centro-oeste e sudeste. A utilização dessa energia de fonte renovável, além de reduzir os impactos ambientais, pode agregar valor às atividades agrícolas, melhorando a produtividade e a rentabilidade do agronegócio.

Além do potencial teórico, também foi calculado o potencial técnico considerando as limitações de aproveitamento do potencial total e eficiências na conversão disponíveis na literatura para cada tecnologia de aproveitamento energético da biomassa. O cálculo mostrou que, para além do 16 GW atualmente instalados no parque gerador nacional a partir da biomassa, especialmente através de termelétricas a bagaço de cana-de-açúcar e usinas de processamento de licor negro, ainda existem outros 109,9 GW em potência nominal que poderiam ser explorados de acordo com os potenciais bioenergéticos calculados. Os resíduos de biomassa com maior potencial teórico e técnico são resíduos agrícolas (265,1/53,1 GW), esgoto (48,7/12,2 GW) e excrementos animais (24,3/6,8 GW).

O potencial técnico de geração a partir de resíduos de biomassa identificado neste estudo, no total de 126,3 GW seria suficiente para aumentar em 67% a capacidade total de geração da matriz elétrica brasileira, que conta atualmente com 193,5 GW instalados. É claro que para que essa capacidade adicional fosse explorada, ela deveria mostrar-se viável economicamente para gerar eletricidade a preços competitivos frente às outras fontes de energia. Este trabalho não explorou o potencial econômico de geração das fontes de biomassa, mas neste contexto contribui para identificar a distribuição geográfica do

potencial técnico, fornecendo ao planejador da expansão do sistema de geração uma valiosa informação para a realização desse estudo, ajudando a identificar parâmetros importantes para a definição dos custos de geração, como a escala da usina, custos logísticos e de conexão elétrica.

Importante salientar que a análise se limitou aos dados fornecidos pelas bases de dados oficiais. Isto é, quando consideradas as malhas municipais e de microrregiões disponíveis pelo IBGE, de coleta e tratamento de águas residuais do SNIS, das quantidades produzidas por cultivo agrícola pelo SIDRA. Nesse sentido, os próximos passos da pesquisa envolveriam, seguramente, a análise técnico-econômica das biomassas residuais estudadas considerando os seus aspectos logísticos.

Referências Bibliográficas

ABIB BRASIL. **Potencial de biomassa de resíduos agroindustriais no Brasil.**

ABNT. **ABNT NBR 10.004:2004 - Resíduos sólidos - Classificação.** [s.l: s.n.].

Disponível em: <www.abnt.org.br>.

ABRELPE. **ABRELPE Panorama 2011 RSU-1.** 2011.

ABRELPE. **PANORAMA DOS RESÍDUOS SÓLIDOS NO BRASIL.** 2018.

ABRELPE. **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil.** [s.l: s.n.].

ABREN. **Contribuição para Consulta Pública Nº 025/2019.** 2019.

ABREN. **Produção de biogás, biometano e energia do lixo poderão ser incentivados no brasil.** 2022.

ABTCP. **Guia ABTCP de Fornecedores e Fabricantes de Papel e Celulose 2020/2021.** São Paulo: [s.n.].

ALBUQUERQUE, M. G. et al. **IMPACTOS SOCIOAMBIENTAIS DOS DEJETOS DA PECUÁRIA NO ÂMBITO RURAL: UMA REVISÃO DE LITERATURA. Revista AIDIS de Ingeniería y Ciencias Ambientales. Investigación, desarrollo y práctica, v. 15, n. 1, p. 517, 6 abr. 2022a.**

ALBUQUERQUE, M. G. et al. **IMPACTOS SOCIOAMBIENTAIS DOS DEJETOS DA PECUÁRIA NO ÂMBITO RURAL: UMA REVISÃO DE LITERATURA. Revista AIDIS de Ingeniería y Ciencias Ambientales. Investigación, desarrollo y práctica, v. 15, n. 1, p. 517, 6 abr. 2022b.**

ALVES SILVA, S. **Avaliação dos Impactos Ambientais da Produção de Carvão Vegetal: Um estudo de caso.** [s.l: s.n.].

AMORIM, E. P.; PIMENTA, A. S.; SOUZA, E. C. DE. **Aproveitamento dos resíduos da colheita florestal: estado da arte e oportunidades. Research, Society and Development, v. 10, n. 2, p. e4410212175, 3 fev. 2021.**

ANDREOLI, C.; VON SPERLING, M.; FERNANDES, F. **Lodo de esgotos: tratamento e disposição final / Silt of sewers: treatment and final disposal.** Belo Horizonte: UFMG, 2001.

ANEEL. **SIGA - Sistema de Informações de Geração da ANEEL.**

ANTAL, M. J.; GRØNLI, M. The Art, Science, and Technology of Charcoal Production. **Industrial & Engineering Chemistry Research**, v. 42, n. 8, p. 1619–1640, 1 abr. 2003.

ANTENOR, S.; SZIGETHY, L. **Resíduos sólidos urbanos no Brasil: desafios tecnológicos, políticos e econômicos.** [s.l.: s.n.].

AVCIOĞLU, A. O.; DAYIOĞLU, M. A.; TÜRKER, U. Assessment of the energy potential of agricultural biomass residues in Turkey. **Renewable Energy**, v. 138, p. 610–619, ago. 2019.

BACHMANN Nathalie. **Sustainable biogas production in municipal wastewater treatment plants.** IEA Bioenergy, 2015.

BAJPAI, P. Nonwood Fiber Use in Pulp and Paper. Em: **Biermann's Handbook of Pulp and Paper.** [s.l.] Elsevier, 2018. p. 261–278.

BARROS, R. M.; TIAGO FILHO, G. L.; DA SILVA, T. R. The electric energy potential of landfill biogas in Brazil. **Energy Policy**, v. 65, p. 150–164, fev. 2014.

BATIDZIRAI, B.; SMEETS, E. M. W.; FAAIJ, A. P. C. Harmonising bioenergy resource potentials—Methodological lessons from review of state of the art bioenergy potential assessments. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 16, n. 9, p. 6598–6630, dez. 2012.

BAUER, N. et al. Shared Socio-Economic Pathways of the Energy Sector – Quantifying the Narratives. **Global Environmental Change**, v. 42, p. 316–330, jan. 2017.

BOUCKAERT, S. et al. **Net Zero by 2050: A Roadmap for the Global Energy Sector.** Paris: [s.n.].

BRASIL. **LEI Nº 14.026, DE 15 DE JULHO DE 2020.** [s.l.: s.n.]. Disponível em: <<https://www.in.gov.br/web/dou/-/lei-n-14.026-de-15-de-julho-de-2020-267035421>>.

BRASIL. **PRETENDIDA CONTRIBUIÇÃO NACIONALMENTE DETERMINADA PARA CONSECUÇÃO DO OBJETIVO DA CONVENÇÃO-QUADRO DAS NAÇÕES UNIDAS SOBRE MUDANÇA DO CLIMA.** [s.l.: s.n.].

CÂMARA DOS DEPUTADOS. LEI 14300 Lei institui marco legal da micro e minigeração de energia. 2022.

CANTRELL, K. B. et al. Livestock waste-to-bioenergy generation opportunities. **Bioresource Technology**, v. 99, n. 17, p. 7941–7953, nov. 2008.

CARDOSO, M.; DE OLIVEIRA, É. D.; PASSOS, M. L. Chemical composition and physical properties of black liquors and their effects on liquor recovery operation in Brazilian pulp mills. **Fuel**, v. 88, n. 4, p. 756–763, abr. 2009.

CASTRO, J. M. **Estudo do potencial de geração de bioeletricidade a partir de biogás proveniente de biodigestão de vinhaça no estado de Minas Gerais**. [s.l.] UFMG, 2019.

CASTRO, M. B. S. et al. Impactos da geração de biogás a partir de resíduos da bovinocultura de leite. **Research, Society and Development**, v. 11, n. 12, p. e109111234079, 8 set. 2022.

CBIC. Governo cria marco regulatório para a geração de energia elétrica distribuída - CBIC – Câmara Brasileira da Indústria da Construção 2022. **Câmara Brasileira da Indústria da Construção**, 2022.

CERVI, W. R. et al. Bioelectricity potential from ecologically available sugarcane straw in Brazil: A spatially explicit assessment. **Biomass and Bioenergy**, v. 122, p. 391–399, mar. 2019.

CIBIOGÁS. **Nota Técnica nº 001/2021 – Panorama do biogás no Brasil**. [s.l.: s.n.].

CNA. PIB do Agronegócio avança no trimestre e acumula alta de 9,81% no primeiro semestre de 2021. 2021.

CONAB. **Nova estimativa de cana-de açúcar traz produção de 572,9 milhões de toneladas**. Disponível em: <<https://www.conab.gov.br/ultimas-noticias/4725-nova-estimativa-de-cana-de-acucar-traz-producao-de-572-9-milhoes-toneladas>>. Acesso em: 1 abr. 2023.

CORRÊA, L. **Transição energética, políticas de inovação e desenvolvimento econômico: uma análise das iniciativas em energias eólica e solar fotovoltaica no Brasil**. [s.l.: s.n.].

COSTA, G. G. DA et al. Mapping and energy analysis of Brazilian bioenergy power potential for three agricultural biomass byproducts. **Journal of Cleaner Production**, v. 349, 15 maio 2022.

DA ROSA, A.; ORDONEZ, J. **Fundamentals of Renewable Energy Processes**. 4. ed. Florida: Academic Press, 2021.

DA SILVA, E. P. **Fontes renováveis de energia: produção de energia para um desenvolvimento sustentável**. . 1º Edition ed. [s.l.] Livraria da Física, 2014.

DA SILVA, J. A. R. et al. Treatment of wastes in Brazil: A comparison between compost techniques and anaerobic biodigesters. **Revista em Agronegocio e Meio Ambiente**, v. 13, n. 2, p. 797–817, 11 abr. 2020.

DE OLIVEIRA, J. L. et al. Characterization and mapping of waste from coffee and eucalyptus production in Brazil for thermochemical conversion of energy via gasification. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 21, p. 52–58, maio 2013.

DIAS, T. A. DA C. et al. Global potential assessment of available land for bioenergy projects in 2050 within food security limits. **Land Use Policy**, v. 105, 1 jun. 2021.

DOVICH FILHO, F. B. et al. Evaluation of the maturity level of biomass electricity generation technologies using the technology readiness level criteria. **Journal of Cleaner Production**, v. 295, 1 maio 2021.

DOVICH FILHO, F. B. **DETERMINAÇÃO DOS POTENCIAIS TÉCNICO E ECONÔMICO DA GERAÇÃO DE ELETRICIDADE A PARTIR DA BIOMASSA: ESTUDO DE CASO DO ESTADO DE MINAS GERAIS**. [s.l: s.n.].

ECOPROG. Waste-to-energy 2018/2019. technologies, plants, projects, players and backgrounds of the global thermal waste treatment business. 2018.

EMBRAPA. **Licor Negro**. [s.l: s.n.]. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/agencia-de-informacao-tecnologica/inicial>>.

EMBRAPA. **Carvão Vegetal**. [s.l: s.n.]. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/agencia-de-informacao-tecnologica/tematicas/agroenergia/socioeconomia/florestas/carvao-vegetal/5Agroenergia>>.

EPBR. **Brasil tem 27 novas plantas de biometano previstas para os próximos anos.** Disponível em: <<https://epbr.com.br/brasil-tem-27-novas-plantas-de-biometano-previstas-para-os-proximos-anos/>>.

EPE. **NOTA TÉCNICA DEA 15/14 Inventário Energético de Resíduos Rurais.** Rio de Janeiro: [s.n.]. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-251/topico-308/DEA%2015%20-%2014%20-%20Invent%20Energ%20de%20Res%20Rurais%20.pdf>>. Acesso em: 6 mar. 2023.

EPE. **PNE 2050.** [s.l: s.n.]. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/Plano-Nacional-de-Energia-2050>>. Acesso em: 6 mar. 2023.

EPE. **Balanco Energético Nacional.** [s.l: s.n.]. Disponível em: <www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-2021>. Acesso em: 11 jun. 2023.

EPE. **A Indústria de Papel e Celulose no Brasil e no Mundo-panorama geral.** [s.l: s.n.].

EPE. **PDE 2031.** [s.l: s.n.].

EPE. **Oferta de Biocombustíveis Estudos do Plano Decenal de Expansão de Energia 2032.** [s.l: s.n.].

ERRERA, M. R. et al. Global bioenergy potentials projections for 2050. **Biomass and Bioenergy**, v. 170, 1 mar. 2023.

ESSWEIN JUNIOR, J. A. L. **ANÁLISE TÉCNICA E ECONÔMICA DA GERAÇÃO DE ENERGIA ATRAVÉS DE BIODIGESTORES EM PROPRIEDADE LEITEIRA.** [s.l: s.n.].

EY. **Renewable Energy Country Attractiveness Index (RECAI).** [s.l: s.n.].

FAO. **Unified Bioenergy Terminology (UBET).** [s.l: s.n.].

FAO. **Online data FAOSTAT.** Disponível em: <<https://www.fao.org/faostat/en/#data/FO>>. Acesso em: 7 abr. 2023.

FAOSTAT. **Which Country Produces the Most Sawnwood?** [s.l: s.n.]. Disponível em: <<https://www.helgilibrary.com/charts/which-country-produces-the-most-wood-charcoal/>>.

FERREIRA, L. R. A. et al. **Review of the energy potential of the residual biomass for the distributed generation in Brazil. Renewable and Sustainable Energy Reviews** Elsevier Ltd, , 1 out. 2018.

FERREIRA-LEITÃO, V. et al. Biomass Residues in Brazil: Availability and Potential Uses. **Waste and Biomass Valorization**, v. 1, n. 1, p. 65–76, 7 mar. 2010.

GÓMEZ, A. et al. The potential for electricity generation from crop and forestry residues in Spain. **Biomass and Bioenergy**, v. 34, n. 5, p. 703–719, maio 2010.

GONZALEZ-SALAZAR, M. A. et al. Methodology for estimating biomass energy potential and its application to Colombia. **Applied Energy**, v. 136, p. 781–796, dez. 2014.

GOUVÊA, A. R. **Uma visão estratégica do setor de distribuição de energia elétrica frente aos desafios da expansão de recursos energéticos distribuídos no Brasil.** 2019.

GOUVEIA, N. Resíduos sólidos urbanos: impactos socioambientais e perspectiva de manejo sustentável com inclusão social. **Ciência & Saúde Coletiva**, v. 17, n. 6, p. 1503–1510, jun. 2012.

GRANDO, A. Viabilidade técnica da produção de briquetes a partir de cama de aviário. **Revista Brasileira de Tecnologia Aplicada nas Ciências Agrárias**, v. 13, n. 1, p. 1–8, 2020.

GUPTA, Akash Som. **Feasibility Study for Production of Biogas from Wastewater and Sewage Sludge: Development of a Sustainability Assessment Framework and its Application.** Master of Science Thesis. KTH Industrial Engineering and Management, 2020.

HASSAN, S. S.; WILLIAMS, G. A.; JAISWAL, A. K. Moving towards the second generation of lignocellulosic biorefineries in the EU: Drivers, challenges, and opportunities. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 101, p. 590–599, mar. 2019.

HOOGWIJK, M. et al. Exploration of the ranges of the global potential of biomass for energy. **Biomass and Bioenergy**, v. 25, n. 2, p. 119–133, ago. 2003.

IBA. **Relatório Anual IBÁ 2021**. [s.l: s.n.]. Disponível em: <<https://www.iba.org/publicacoes/relatorios>>. Acesso em: 7 abr. 2023.

IBÁ. **Carvão Vegetal**. Disponível em: <<https://www.iba.org/carvao-vegetal-2>>. Acesso em: 8 abr. 2023.

IBGE. **Produção da Extração Vegetal e da Silvicultura**.

IBGE. **Macrocaracterização dos Recursos Naturais do Brasil: Potencialidade Agrícola Natural das Terras**. [s.l: s.n.].

IBGE. **Produção Agrícola Municipal (PAM-IBGE-SIDRA)**.

IBGE. **Pesquisa da Pecuária Municipal - PPM**.

IEA. **Global Energy Review**. Paris: [s.n.].

IEA. **Renewables**. Paris: [s.n.].

INPE. **SPRING: Introdução**. Disponível em: <http://www.dpi.inpe.br/spring/portugues/tutorial/introducao_geo.html>. Acesso em: 11 jun. 2023.

IRENA. **Global outlook Energy transition outlook**. [s.l: s.n.]. Disponível em: <<https://www.irena.org/Energy-Transition/Outlook>>.

JENKINS, N.; EKANAYAKE, J. **Renewable Energy Engineering**. [s.l.] Cambridge University Press, 2017.

Jl, L. et al. An integrated decision support method for strategic planning and tactical management of regional biomass power plants under uncertainties. **Journal of Cleaner Production**, v. 388, p. 135968, fev. 2023.

JORGE, I. E. **ESTUDO SOBRE A EXTRAÇÃO DE LIGNINA DO LICOR NEGRO, SEU IMPACTO NO PROCESSO DE RECUPERAÇÃO E GERAÇÃO DE ENERGIA E SEU POTENCIAL USO EM NOVAS APLICAÇÕES**. [s.l: s.n.].

KAFLE, G. K.; CHEN, L. Comparison on batch anaerobic digestion of five different livestock manures and prediction of biochemical methane potential (BMP) using different statistical models. **Waste Management**, v. 48, p. 492–502, fev. 2016.

KAZA, S. **What a waste 2.0: a global snapshot of solid waste management to 2050**. [s.l: s.n.].

KELLOG, R. L.; MOFFITT, D. C.; GOLLEHON, N. R. **Estimates of Recoverable and Non-Recoverable Manure Nutrients Based on the Census of Agriculture**. [s.l: s.n.]. Disponível em: <https://www.nrcs.usda.gov/sites/default/files/2022-10/ManRpt_KelMofGol_2007_final.pdf>. Acesso em: 6 mar. 2023.

KELLOGG, R. L.; MOFFITT, D. C.; GOLLEHON, N. R. **Estimates of Recoverable and Non-Recoverable Manure Nutrients Based on the Census of Agriculture Acknowledgements**. [s.l: s.n.]. Disponível em: <http://www.ascr.usda.gov/complaint_filing_file.html>.

KIM, S.; DALE, B. E. Global potential bioethanol production from wasted crops and crop residues. **Biomass and Bioenergy**, v. 26, n. 4, p. 361–375, abr. 2004.

KOUGIAS, P. G.; ANGELIDAKI, I. Biogas and its opportunities—A review. **Frontiers of Environmental Science & Engineering**, v. 12, n. 3, p. 14, 30 jun. 2018.

LA PICIRELLI DE SOUZA, L. et al. Theoretical and technical assessment of agroforestry residue potential for electricity generation in Brazil towards 2050. **Energy Reports**, v. 7, p. 2574–2587, nov. 2021.

LAIRD, D. A. et al. Review of the pyrolysis platform for coproducing bio-oil and biochar. **Biofuels, Bioproducts and Biorefining**, v. 3, n. 5, p. 547–562, set. 2009.

LAL, R. World crop residues production and implications of its use as a biofuel. **Environment International**, v. 31, n. 4, p. 575–584, maio 2005.

LEITE, F. F. DE O. et al. Evaluation of technological alternatives for the treatment of urban solid waste: A case study of Minas Gerais, Brazil. **Journal of Cleaner Production**, v. 330, p. 129618, jan. 2022.

LEME, M. M. V. et al. Electricity generation from pyrolysis gas produced in charcoal manufacture: Technical and economic analysis. **Journal of Cleaner Production**, v. 194, p. 219–242, set. 2018.

LEME, M. M. V. et al. Life cycle assessment of charcoal production and electricity generation from eucalyptus in an industrial batch kiln. **Renewable Energy**, v. 180, p. 232–244, dez. 2021.

LINO, F. A. M.; ISMAIL, K. A. R. Evaluation of the treatment of municipal solid waste as renewable energy resource in Campinas, Brazil. **Sustainable Energy Technologies and Assessments**, v. 29, p. 19–25, 1 out. 2018.

LOBATO, L. C. S. **APROVEITAMENTO ENERGÉTICO DE BIOGÁS GERADO EM REATORES UASB TRATANDO ESGOTO DOMÉSTICO**. 2011.

LOPES, M.; SILVA, D. A. **DESAFIOS DO PROCESSO DE TRANSIÇÃO ENERGÉTICA NO BRASIL: O Papel do Governo Brasileiro na expansão da oferta de energia elétrica e o potencial das fontes renováveis**. [s.l.: s.n.].

LORA, E. E. S. Metodología para la selección de tecnologías de generación de electricidad basadas en la conversión termoquímica de biomasa en pequeña, mediana y escala industrial Methodology for the selection of technologies for electricity generation based on biomass. **25th Int. Congr. Mech. Eng.**, p. 1–10, 2019.

LOVRAK, A. et al. An integrated Geographical Information System (GIS) approach for assessing seasonal variation and spatial distribution of biogas potential from industrial residues and by-products. **Energy**, v. 239, p. 122016, jan. 2022.

LOVRAK, A.; PUKŠEC, T.; DUIĆ, N. A Geographical Information System (GIS) based approach for assessing the spatial distribution and seasonal variation of biogas production potential from agricultural residues and municipal biowaste. **Applied Energy**, v. 267, p. 115010, jun. 2020.

LOZANO-GARCÍA, D. F. et al. GIS-based modeling of residual biomass availability for energy and production in Mexico. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 120, p. 109610, mar. 2020.

MAGNANO, E. **Biogas da discarica. Manuale di progettazione, gestione, e monitoraggio degli impianti**. [s.l.] EPC, 2010.

MANA, A. A. et al. Feasibility of agriculture biomass power generation in Morocco: Techno-economic analysis. **Journal of Cleaner Production**, v. 295, p. 126293, maio 2021.

MEYER, A. K. P.; EHIMEN, E. A.; HOLM-NIELSEN, J. B. Future European biogas: Animal manure, straw and grass potentials for a sustainable European biogas production. **Biomass and Bioenergy**, v. 111, p. 154–164, abr. 2018.

MORAN, M. J. et al. **Fundamentals of Engineering Thermodynamics**. 9th edition ed. [s.l.] Wiley, 2018.

MURDOCK, H. E. **Renewables 2021: Global Status Report**. Paris: [s.n.].

MURGIA, S. et al. Experimental investigation into an ORC-based low-grade energy recovery system equipped with sliding-vane expander using hot oil from an air compressor as thermal source. **Energy Procedia**, v. 129, p. 339–346, set. 2017.

NADALETI, W. C. et al. National potential production of methane and electrical energy from sugarcane vinasse in Brazil: A thermo-economic analysis. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, v. 8, n. 2, p. 103422, abr. 2020.

NADEL, S.; SHIPLEY, A.; ELLIOTT, R. N. **The Technical, Economic and Achievable Potential for Energy-Efficiency in the U.S.-A Meta-Analysis of Recent Studies**. [s.l: s.n.].

NKUNA, S. G.; OLWAL, T. O.; CHOWDHURY, S. D. Assessment of thermochemical technologies for wastewater sludge-to-energy: An advance MCDM model. **Cleaner Engineering and Technology**, v. 9, p. 100519, ago. 2022.

NOGUEIRA, L. A. H.; CAPAZ, R. S.; LORA, E. S. Bioenergia no Brasil: onde estamos e quais nossos horizontes. **Revista Brasileira de Energia**, v. 27, n. 3, 17 ago. 2021.

NOVAES, W. Eco-92: avanços e interrogações. **Estudos Avançados**, v. 6, n. 15, p. 79–93, ago. 1992.

OLIVEIRA, G. M. **Potencial de Geração de Eletricidade Proveniente dos Gases Efluentes da Produção de Carvão Vegetal em Minas Gerais**. [s.l: s.n.].

ORO, D. **ANÁLISE TÉCNICA DE UM CAVAQUEADOR E CARACTERIZAÇÃO ENERGÉTICA DE CAVACOS DE BIOMASSA DA COLHEITA DE MADEIRA**. [s.l: s.n.].

OSTREM, K. Biogas production in organic agriculture-a literature review. **Livestock Research for Rural Development**, 2004.

PADILHA, J. L.; MESQUITA, A. L. A. Waste-to-energy effect in municipal solid waste treatment for small cities in Brazil. **Energy Conversion and Management**, v. 265, p. 115743, ago. 2022.

PANICHELLI, L.; GNANSOUNOU, E. GIS-based approach for defining bioenergy facilities location: A case study in Northern Spain based on marginal delivery costs and resources competition between facilities. **Biomass and Bioenergy**, v. 32, n. 4, p. 289–300, abr. 2008.

PARK, J. et al. Slow pyrolysis of rice straw: Analysis of products properties, carbon and energy yields. **Bioresource Technology**, v. 155, p. 63–70, mar. 2014.

PARSAEE, M.; KIANI DEH KIANI, M.; KARIMI, K. A review of biogas production from sugarcane vinasse. **Biomass and Bioenergy**, v. 122, p. 117–125, mar. 2019.

PEREIRA, I. Z. et al. Vinasse biogas energy and economic analysis in the state of São Paulo, Brazil. **Journal of Cleaner Production**, v. 260, p. 121018, jul. 2020.

PINTO, Jucimar Augusto et al. Estudo da codigestão anaeróbia de dejetos bovinos e suínos: análise da viabilidade técnica e econômica. 2021.

POLA, L. et al. Kraft black liquor as a renewable source of value-added chemicals. **Chemical Engineering Journal**, v. 448, p. 137728, nov. 2022.

PÖRTNER, H.-O. Climate change 2022: Impacts, adaptation and vulnerability. 2022.

PORTUGAL-PEREIRA, J. et al. Agricultural and agro-industrial residues-to-energy: Techno-economic and environmental assessment in Brazil. **Biomass and Bioenergy**, v. 81, p. 521–533, out. 2015.

PPM. **Rebanho bovino bate recorde em 2021 e chega a 224,6 milhões de cabeças**. Disponível em: <<https://www.gov.br/pt-br/noticias/agricultura-e-pecuaria/2022/09/rebanho-bovino-bate-recorde-em-2021-e-chega-a-224-6-milhoes-de-cabecas>>. Acesso em: 1 abr. 2023.

RITCHIE, H.; ROSER, M. **Home CO₂ and GHG Emissions By sector**. [s.l.: s.n.]. Disponível em: <<https://ourworldindata.org/emissions-by-sector>>.

RODRIGUES, L. F. et al. Energy and economic evaluation of MSW incineration and gasification in Brazil. **Renewable Energy**, v. 188, p. 933–944, abr. 2022.

ROSSATO, F. G. F. DA S. **Bioeletricidade como alternativa energética sustentável na indústria de celulose**. Campinas: UNICAMP, 2019.

SALOMON, K. R.; SILVA LORA, E. E. **Estimate of the electric energy generating potential for different sources of biogas in Brazil**. **Biomass and Bioenergy**, set. 2009.

SAMORAJ, M. et al. Biochar in environmental friendly fertilizers - Prospects of development products and technologies. **Chemosphere**, v. 296, p. 133975, jun. 2022.

SANTANA, K. V. R.; APOLÔNIO, F. C. S. O.; WISNIEWSKI, A. Valorization of cattle manure by thermoconversion process in a rotary kiln reactor to produce environmentally friendly products. **BioEnergy Research**, v. 13, n. 2, p. 605–617, 25 jun. 2020.

SANTOS, R. E. DOS et al. Generating electrical energy through urban solid waste in Brazil: An economic and energy comparative analysis. **Journal of Environmental Management**, v. 231, p. 198–206, fev. 2019.

SCHETTINI, B. L. S. et al. Furnace-kiln system: How does the use of new technologies in charcoal production affect the carbon balance? **Industrial Crops and Products**, v. 187, p. 115330, nov. 2022.

SILVA, D. A. et al. Propriedades da madeira de *Eucalyptus benthamii* para produção de energia. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 35, n. 84, p. 481, 31 dez. 2015.

SILVA, L. A. et al. Rice husk energy production in Brazil: An economic and energy extensive analysis. **Journal of Cleaner Production**, v. 290, p. 125188, mar. 2021.

SILVA NETO, J. V.; GALLO, W. L. R. Potential impacts of vinasse biogas replacing fossil oil for power generation, natural gas, and increasing sugarcane energy in Brazil. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 135, p. 110281, jan. 2021.

SILVEIRA, E. DA. Vinhaça para gerar energia. **Revista Pesquisa FAPESP**, 2015.

SINIGAGLIA, T. et al. Current scenario and outlook for biogas and natural gas businesses in the mobility sector in Brazil. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 47, n. 24, p. 12074–12095, mar. 2022.

SIRGAS. **SIRGAS: Sistema de Referência Geodésico para as Américas**. Disponível em: <<https://sirgas.ipgh.org/pt/realizacoes/sirgas2000/>>. Acesso em: 11 jun. 2023.

SNIS. **Diagnóstico Temático Serviços de Água e Esgoto**. [s.l.: s.n.]. Disponível em: <www.snis.gov.br>.

SVENSKT GASTEKNISKT CENTER. **Basic data on biogas**. [s.l.] Svenskt gastekniskt center, 2012.

THOMAZ, D. T. et al. **PODER CALORÍFICO DA MADEIRA E DO CARVÃO VEGETAL: LIGNINA E CARBONO FIXO COMO DETERMINANTES 1.** [s.l: s.n.].

TOLMASQUIM, M. T. **Energia Renovável: Hidráulica, Biomassa, Eólica, Solar, Oceânica.** Rio de Janeiro: EPE, 2016.

UKOBA, M. O. et al. Geographic information systems (GIS) approach for assessing the biomass energy potential and identification of appropriate biomass conversion technologies in Nigeria. **Biomass and Bioenergy**, v. 170, p. 106726, mar. 2023.

USMAN, Z. **As Financial Pledges Trickle In, Did COP27 Meet Its Goal of Implementation?** [s.l: s.n.]. Disponível em: <<https://carnegieendowment.org/2022/11/21/as-financial-pledges-trickle-in-did-cop27-meet-its-goal-of-implementation-pub-88452>>.

USP. Vinhaça: o futuro da fertilização. **Pró-Reitoria de Pesquisa**, 2023.

VALENTI, F. et al. Enhancement of sustainable bioenergy production by valorising tomato residues: A GIS-based model. **Science of The Total Environment**, v. 869, p. 161766, abr. 2023.

VICENTE LEME, M. M. et al. Life cycle assessment of charcoal production and electricity generation from eucalyptus in an industrial batch kiln. **Renewable Energy**, v. 180, p. 232–244, 1 dez. 2021.

VOIVONTAS, D.; ASSIMACOPOULOS, D.; KOUKIOS, E. G. Assessment of biomass potential for power production: a GIS based method. **Biomass and Bioenergy**, v. 20, n. 2, p. 101–112, fev. 2001.

VUKAŠINOVIĆ, V.; GORDIĆ, D. Optimization and GIS-based combined approach for the determination of the most cost-effective investments in biomass sector. **Applied Energy**, v. 178, p. 250–259, set. 2016.

WITTMAN, H.; POWELL, L. J.; CORBERA, E. Financing the agrarian transition? The Clean Development Mechanism and agricultural change in Latin America. **Environment and Planning A: Economy and Space**, v. 47, n. 10, p. 2031–2046, 1 out. 2015.

WORLD STEEL ASSOCIATION. Sustainability Indicators. **Sustainability Indicators**, 2022.

ZHAN, F. et al. A GIS-enabled comparison of fixed and discriminatory pricing strategies for potential switchgrass-to-ethanol conversion facilities in Alabama. **Biomass and Bioenergy**, v. 28, n. 3, p. 295–306, mar. 2005.

Anexos
