UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE ENERGIA E AMBIENTE (IEE)
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENERGIA (PPGE)

DIEGO BONFIM DE SOUZA

Análise de metodologias para determinação do potencial de biogás proveniente da suinocultura no Brasil e seu aproveitamento energético

SÃO PAULO
2021

DIEGO BONFIM DE SOUZA

Análise de metodologias para determinação do potencial de biogás proveniente da suinocultura no Brasil e seu aproveitamento energético

Versão Corrigida

Dissertação apresentada ao Instituto de Energia e Ambiente da Universidade de São Paulo para obtenção do título de Mestre em Ciências.

Área de Concentração: Análise e Planejamento Energético

Orientadora: Profa. Dra. Patrícia Helena Lara dos Santos Matai

Coorientadora: Profa. Dra. Vanessa Pecora Garcilasso

SÃO PAULO

2021

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

FICHA CATALOGRÁFICA

Souza, Diego Bonfim.
Análise de metodologias para determinação do potencial de biogás proveniente da suinocultura Brasil e seu aproveitamento energético. /Diego Bonfim Souza; orientadora: Patrícia Helena Lara dos Santos Matai; Co-orientadora : Vanessa Pecora Garcilasso. – São Paulo, 2021.
113 f.: il; 30 cm.

Dissertação (Mestrado em Ciências) – Programa de Pós-Graduação em Energia – Instituto de Energia e Ambiente da Universidade de São Paulo.

1. Suínos. 2. Biogás. 3. Resíduos para animais – aproveitamento. 4. Digestão anaeróbia. I. Título.

Elaborado por Maria Penha da Silva Oliveira CRB-8/6961

Nome: SOUZA, Diego Bonfim de

Título: Análise de metodologias para determinação do potencial de biogás proveniente da suinocultura no Brasil e seu aproveitamento energético

Dissertação apresentada ao Programa de Pós Graduação em Energia do Instituto de Energia e Ambiente da Universidade de São Paulo para obtenção do título de Mestre em Ciências.

Aprovado em:

Banca Examinadora

Prof. Dr. _____

Instituição: _____

Julgamento: _____

Prof. Dr. _____

Instituição: _____

Julgamento: _____

Prof. Dr. _____

Instituição: _____

Julgamento: _____

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho aos meus queridos pais, Valdi e Lucimar, que sempre acreditaram em mim e me incentivaram a buscar meus sonhos, e às minhas irmãs Fernanda e Bruna, pela parceria incondicional e todos os momentos inesquecíveis.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, agradeço a Deus pelo caminho e por tornar tudo capaz. Agradeço especialmente aos meus pais, Valdi e Lucimar, por toda a educação e valores, sempre me incentivando a buscar conhecimento e não desistir nas adversidades, e por todo o carinho, amor e compreensão imensuráveis. Agradecimento especial para minhas duas irmãs, Fernanda e Bruna, e minha prima-irmã Camila, companheiras e confidentes, que sempre aquecem meu coração e me fazem uma pessoa melhor. Vocês são minha base e meus amores, e sempre será tudo por e para vocês.

Agradeço também ao meu parceiro de todas as horas, Lucas Reis, pelo apoio incondicional, por estar sempre ao meu lado e pelos momentos que fizeram grande parte dessa luta valer a pena. 10^6. Agradeço em especial minha amiga Mônica Anater, merecedora de todos os elogios possíveis, minha mentora pessoal e acadêmica, “florzinha” que me guiou e me tranquilizou nessa caminhada louca. Vocês dois fizeram SP ser muito mais fácil e agradável.

Agradeço a minha orientadora Profa. Dra. Patrícia Matai, sempre tão compreensiva, paciente e conselheira, estando disponível e pronta para me ajudar. Agradeço, em igual tamanho, a minha coorientadora Profa. Dra. Vanessa Garcilasso, pela paciência, disponibilidade e preocupação com meu trabalho. Sou muito grato pela atenção que vocês me deram e gostaria de ter retribuído muito mais. Agradeço também à Profa. Dra. Suani Teixeira, pelo acolhimento e oportunidade para desenvolver meu trabalho. Igualmente, agradeço a todo o Grupo de Pesquisa em Bioenergia (GBio) e seus integrantes, pela ajuda e pelo companheirismo durante minha trajetória acadêmica.

Agradeço em especial minha amiga e companheira de luta, Thais Tarelho, com quem pude dividir minhas frustrações e compartilhar minhas vitórias diárias, tornando essa trajetória mais leve e divertida. Ao meu amigo Hemerson, muito obrigado por ser minha pessoa e por me estender a mão em todos os momentos. Milena, obrigado pelos “bom lias”, pelas doses de razão e compreensão, pois sem isso eu nem estaria aqui. Janaína “core”, agradeço por ser minha cara-metade em todos os sentimentos durante essa caminhada. Fernanda, minha ingratidão não será repetida aqui, então obrigado por sempre estar comigo em tudo e para tudo. Pâmella, te agradeço pela parceria, pelas risadas e séries compartilhadas. Eliseu, obrigado

pelas conversas intermináveis e pelo apoio nessa vida de SP. Helen, minha amiga de infância, obrigado pelo acolhimento e por segurar meus surtos diários. Agradeço também aos amigos que essa cidade me deu: Victor Dallago, Nicolas Kauê, Gustavo Guilherme e demais integrantes do “Voleipocs”, aos integrantes do “6th Harmony”, aos amigos de IEE Caio Joppert, Ariane Finotti e Laize Sampaio e aos meus companheiros de casa e de caminhada Túlio Pedra e Daniel Abelha. Amo todos vocês e sou grato por lutarem comigo.

Agradeço também à empresa Replace Consultoria e seus integrantes, que sempre colaboraram para meu aprendizado e me proporcionaram um ambiente aconchegante e suscetível aos meus estudos. Em especial, agradeço aos meus amigos de vida, Bruna e Caique, por todo o incentivo e pela parceria indiscutível. Vocês foram os maiores presentes que ganhei nos últimos dias dessa caminhada.

Agradeço à Fundação de Apoio a Pesquisa, Ensino e Extensão (FUNEP), por fomentar minha bolsa durante o período acadêmico e à Universidade Virtual do Estado de São Paulo, por viabilizar minha necessidade de aprender e ensinar. Por fim, e não menos importante, agradeço à Universidade de São Paulo e ao Instituto de Energia e Ambiente e seus integrantes, por ajudarem a construir essa experiência inesquecível.

A todos vocês meu muito obrigado e “a gente que lute”.

RESUMO

O Brasil é o quarto maior produtor de carne suína do mundo, contando com uma cadeia consolidada. Devido à grande quantidade de resíduos gerados com alto potencial poluidor na criação e abate de suínos, e à sua má disposição, a digestão anaeróbia é indicada para mitigar os impactos ambientais e proporcionar o aproveitamento energético. Algumas metodologias são utilizadas para a quantificação dos resíduos gerados tanto na criação como no abate, assim como para obtenção do potencial de biogás destes e da sua conversão para energia elétrica e biometano. Neste sentido, essa dissertação buscou analisar as metodologias aplicadas para cada uma das etapas, utilizando dados reais para o Brasil e Regiões, destacando as variáveis presentes e sua relação com os resultados obtidos. Foram analisados diversos trabalhos a fim de identificar os fatores de produção de resíduos com o intuito de quantificá-los segundo sua etapa de produção na criação e durante o abate, no qual foi obtido uma faixa de produção de resíduos para o período. Para a produção de biogás a partir dos resíduos da criação de suínos, foram analisadas 5 metodologias, aplicando-as para dados de 2018 do Brasil e regiões, apresentando um intervalo de geração de biogás e levando em consideração diferentes variáveis e abordagens técnicas. Já para o potencial de biogás a partir dos resíduos do abate, foram estudadas 3 metodologias, com diferentes variáveis, como a utilização da Demanda Química de Oxigênio (DQO) ou Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO). A partir dessas análises, foram obtidas curvas de geração de biogás para o Brasil por meio de valores definidos pelos equacionamentos das metodologias. Como resultados para o potencial de biogás proveniente dos resíduos, estimou-se intervalos de 713 – 1.280 milhões de m³ por ano para criação e 19 – 66 milhões de m³ por ano para o abate. Para esses casos, foram avaliadas a conversão do biogás para energia elétrica, ficando entre 1,6 - 2,9 milhões de MWh por ano para a criação e 44 – 152 mil de MWh por ano para o abate de suínos. Além disso, o potencial de biometano foi estimado para ambos os casos, apresentando intervalos de 436 – 1.178 milhões de m³ por ano para criação e 12 – 41 milhões de m³ por ano para o abate. Conclui-se que existem diversas metodologias que possuem parâmetros e análises individuais, podendo estabelecer um intervalo real de produção de resíduos e seu potencial de biogás, além do aproveitamento energético na eletricidade e biometano. Ainda, foram apontadas as metodologias que mais se aproximaram dos valores médios entre todas analisadas.

Palavras-chave: suínos, biodigestão, biogás, aproveitamento de resíduos animais.

ABSTRACT

Brazil is the fourth largest pork producer in the world, with a consolidated chain. Due to the large amount of waste generated with high polluting potential in the creation and slaughter of pigs, and due to its poor disposition, anaerobic digestion is indicated to mitigate environmental impacts and provide energy use. Some methodologies are used to quantify the waste generated both in creation and in slaughter, as well as to obtain their biogas potential and its conversion to electric energy and biomethane. In this sense, this dissertation sought to analyze the methodologies applied to each of the stages, using real data for Brazil and regions, highlighting the variables present and their relationship with the results obtained. Several studies were analyzed in order to identify the waste production factors in order to quantify them according to their production stage at creation and during slaughter, in which a range of waste production for the period was obtained. For the production of biogas from swine waste, 5 methodologies were analyzed, applying them to 2018 data from Brazil and Regions, presenting a biogas generation interval and taking into account different variables and technical approaches. As for the potential for biogas from slaughter waste, 3 methodologies were studied, with different variables, such as the use of Chemical Oxygen Demand (COD) or Biochemical Oxygen Demand (DBO). From these analyses, biogas generation curves for Brazil were obtained using values defined by the methodologies equations. As a result of the potential for biogas from the residues, intervals of 713 - 1.280 million m³ per year for breeding and 19 - 66 million m³ per year for slaughter were estimated. For these cases, the conversion of biogas to electric energy was evaluated, staying between 1.6 - 2.9 million MWh per year for breeding and 44 - 152 thousand MWh per year for slaughtering pigs. In addition, the biomethane potential was estimated for both cases, with intervals of 436 - 1,178 million m³ per year for breeding and 12 - 41 million m³ per year for slaughter. It is concluded that there are several methodologies that have individual parameters and analyses, being able to establish a real interval of waste production and its biogas potential, in addition to the energy use in electricity and biomethane. Still, the methodologies that came closest to the average values among all analyzed were pointed out.

Keywords: swine, biodigestion, biogás, use of animal waste

LISTA DE ABREVIAÇÕES E SIGLAS

ABPA – Associação Brasileira de Proteína Animal

ASAE – American Society of Agricultural Engineers

Cab – Cabeça de animais

CC – Ciclo Completo

CIBiogás - Centro Internacional de Energias Renováveis

COP21 – Conferência das Partes de Paris

CPA – Cadeia Produtiva Agroindustrial

DBO – Demanda Bioquímica de Oxigênio

DEPA – Danish Environmental Protection Agency

DQO – Demanda Química de Oxigênio

GEE – Gases de Efeito Estufa

GLP – Gás Liquefeito de Petróleo

GN – Gás Natural

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change

IPEA – Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada

MAPA – Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento

OECD – Organisation for Economic Co-operation and Development

PCI – Poder Calorífico Inferior

SAG – Sistema Agroindustrial

SISCAL – Sistema Intensivo de Suínos Criados ao Ar Livre

SISCON – Sistema Intensivo de Suínos Confinados

ST – Sólidos Totais

SV – Sólidos Voláteis

UCT – Unidade de Crescimento e Terminação

UNEP – United Nations Environment Programme

UPL – Unidade Produtora de Leitões

UASB – *Upflow Anaerobic Sludge Blanket* (Reator Anaeróbio de Fluxo Ascendente e Manta de Lodo)

USDA – U. S. Department of Agriculture

USDE – U. S. Department of Energy

UT – Unidade de Terminação

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Produção Mundial de carne suína em 2018 6
Figura 2 - Evolução da produção brasileira de carne suína (2006-2018) 7
Figura 3 - Abate de suínos por estado brasileiro em 2018 8
Figura 4 - Fluxograma da cadeia produtiva de suínos 10
Figura 5 - Categorias e sistema de produção de suínos 12
Figura 6 - Etapas do processo de abate de suínos 16
Figura 7- Representação das principais formas de poluição do ambiente pelos dejetos da suinocultura 23
Figura 8 - Processamento de suínos nos abatedouros 26
Figura 9 - Fases e produtos do processo de digestão anaeróbia 30
Figura 10 - Usos finais e tecnologias para aproveitamento energético do biogás e biometano 32
Figura 11 - Produção unitária diária de efluentes (dejetos e urina) de suínos por ciclo de produção 50
Figura 12 - Produção de dejetos totais de suínos (esterco + urina) no Brasil e regiões em 2018 51
Figura 13 - Potencial de geração de biogás na criação de suínos no Brasil em 2018 - Metodologia de Chen (1983) 53
Figura 14 - Potencial de geração de biogás na criação de suínos no Brasil em 2018 - Metodologia de Kunz e Oliveira (2006) 54
Figura 15 - Potencial de geração de biogás na criação de suínos no Brasil em 2018 - Metodologia de IPCC (2006) 55
Figura 16 - Potencial de geração de biogás na criação de suínos no Brasil em 2018 - Metodologia de CIBIOGAS (2009) 57
Figura 17 - Potencial de geração de biogás na criação de suínos no Brasil em 2018 - Metodologia de Coelho et al. (2012) 58
Figura 18 - Potencial de produção de biogás na criação de suínos no Brasil em 2018 – resumo das metodologias 59
Figura 19 - Intervalos e curva do potencial de biogás da criação de suínos no Brasil em 2018 60

Figura 20 - Produção total de efluentes nos abatedouros de suínos em 2018 - Brasil e regiões.....62
Figura 21 - Potencial de geração de biogás no abate de suínos no Brasil em 2018 - Metodologia de IPCC (2006).....64
Figura 22 - Potencial de geração de biogás no abate de suínos no Brasil em 2018 - Metodologia de CETESB (2006).....65
Figura 23 - Potencial de geração de biogás no abate de suínos no Brasil em 2018 - Metodologia de Coelho et al. (2020).....66
Figura 24 - Potencial de produção de biogás no abate de suínos no Brasil em 2018 – resumo das metodologias.....67
Figura 25 - Intervalos e curva do potencial de biogás do abate de suínos no Brasil em 2018.....68
Figura 26 - Potencial elétrico do biogás proveniente da criação de suínos no Brasil em 2018.....69
Figura 27 - Potencial elétrico do biogás proveniente do abate de suínos no Brasil em 2018.....70
Figura 28 - Potencial de biometano proveniente da criação de suínos no Brasil em 2018.....71
Figura 29 - Potencial de biometano proveniente do abate de suínos no Brasil em 2018.....72
Figura 30 - Emissões por manejo de dejetos de animais entre 1990 e 2018.....77

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Rebanho efetivo de suínos no Brasil 6
Tabela 2 - Classificação de alimentos para nutrição suína.....18
Tabela 3 - Características dos dejetos de suínos 20
Tabela 4 - Produção diária de resíduos líquidos e sólidos de diversos animais 20
Tabela 5 - Quantidade média diária de dejetos por categoria de suínos 21
Tabela 6 - Valores de DBO diárias para suínos em função do peso do animal e do ciclo produtivo 22
Tabela 7 - Valores médios de produção diária de dejetos suínos.....22
Tabela 8 - Produtos e subprodutos do abate de um suíno de 90 kg.....27
Tabela 9 - Carga Poluidora por animal abatido e concentração de DBO no efluente líquido nos abatedouros suínos.....27
Tabela 10 - Quantidades médias dos resíduos produzidos em abatedouros de suínos - média para animal de 90kg de peso vivo 28
Tabela 11 - Composição química e concentração média de poluentes nos efluentes de abatedouros suínos.....28
Tabela 12 – Quantidade média de resíduos produzidos por suíno por categoria de criação.....35
Tabela 13 - Quantidade de efluentes produzidos por suíno classificados por ciclos de produção 36
Tabela 14 - Composição química dos resíduos de abatedouros suínos.....44
Tabela 15 - Número efetivo de rebanho de suínos em 2018 49
Tabela 16 - Parâmetros e variáveis aplicados às metodologias para potencial de biogás na criação de suínos.....52
Tabela 17 - Número de cabeças de suínos abatidos em 2018 61
Tabela 18 - Parâmetros e variáveis aplicados às metodologias para potencial de biogás no abate de suínos 63
Tabela 19 - Síntese dos potenciais de biogás, biometano e energia elétrica para o Brasil e Regiões para criação de suínos - Metodologia de Chen (1983).....98
Tabela 20 - Síntese dos potenciais de biogás, biometano e energia elétrica para o Brasil e Regiões para criação de suínos - Metodologia de Kunz e Oliveira (2006)...98

Tabela 21 - Síntese dos potenciais de biogás, biometano e energia elétrica para o Brasil e Regiões para criação de suínos - Metodologia de IPCC (2006).....98
Tabela 22 - Síntese dos potenciais de biogás, biometano e energia elétrica para o Brasil e Regiões para criação de suínos - Metodologia de CIBIOGAS (2009).....99
Tabela 23 - Síntese dos potenciais de biogás, biometano e energia elétrica para o Brasil e Regiões para criação de suínos - Metodologia de Coelho et al. (2012).....99
Tabela 24 - Síntese dos potenciais de biogás, biometano e energia elétrica para o Brasil e Regiões para abate de suínos - Metodologia de IPCC (2006).....99
Tabela 25 - Síntese dos potenciais de biogás, biometano e energia elétrica para o Brasil e Regiões para abate de suínos - Metodologia de CETESB (2006) 100
Tabela 26 - Síntese dos potenciais de biogás, biometano e energia elétrica para o Brasil e Regiões para abate de suínos - Metodologia de Coelho et al. (2020).....100

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO E OBJETIVOS 1

1.1 Objetivos 4

2. ESTADO DA ARTE 5

2.1 Suinocultura no Brasil 5

2.2 Cadeia produtiva de suínos no Brasil 8

2.2.1 Criação de Suínos 11

2.2.2 Abate de Suínos 13

2.3 Dejetos da suinocultura 17

2.3.1 Alimentos utilizados para a nutrição dos suínos 17

2.3.2 Composição dos dejetos suínos 19

2.3.3 Potencial de Poluição dos dejetos suínos 23

2.4 Resíduos do abate de suínos 24

2.4.1 Composição dos resíduos de abate 26

2.5 Aproveitamento energético de resíduos provenientes da criação e abate de suínos 28

2.5.1 Tratamento anaeróbio 29

2.5.2 Tecnologias disponíveis para aproveitamento energético 32

3. METODOLOGIAS 33

3.1 Dados e procedimentos de pesquisa 33

3.2 Metodologia para quantificação de dejetos de criação de suínos e seu aproveitamento energético 34

3.2.1 Quantificação de dejetos gerados na suinocultura 34

3.2.2 Produção de biogás a partir dos dejetos suínos 37

a. Metodologia de Chen (1983) 37

b. Metodologia de Kunz e Oliveira (2006) 39

c. Metodologia de IPCC (2006) 39

d. Metodologia de CIBIOGÁS (2009)....41

e. Metodologia de Coelho et al. (2012)....42

3.3 Metodologia para a quantificação de resíduos do abate de suínos e seu aproveitamento energético....43

3.3.1 Quantificação de resíduos gerados no abate de suínos....43

3.3.2 Produção de biogás a partir dos resíduos de abate de suínos....44

a. Metodologia de IPCC (2006)....45

b. Metodologia de CETESB (2006)....46

c. Metodologia de Coelho et al. (2020)....47

3.4 Metodologia para aproveitamento energético do biogás de dejetos suínos e resíduos de abatedouros....47

3.4.1 Aproveitamento do biogás para geração de Energia Elétrica....47

3.4.2 Conversão do biogás em biometano....48

4. ANÁLISE DAS METODOLOGIAS PARA O POTENCIAL DE PRODUÇÃO DE BIOGÁS NA CRIAÇÃO E ABATE DE SUÍNOS NO BRASIL....49

4.1 Geração de resíduos na criação de suínos....50

4.2 Potencial de produção do biogás na suinocultura....52

4.3 Geração de resíduos no abate de suínos....61

4.4 Potencial de produção de biogás nos abatedouros de suínos....62

5. APROVEITAMENTO ENERGÉTICO DO BIOGÁS GERADO....68

5.1 Aproveitamento do biogás para geração de Energia Elétrica....68

5.2 Aproveitamento do biogás para produção de Biometano....71

6. ASPECTOS AMBIENTAIS E SOCIAIS DO TRATAMENTO DOS RESÍDUOS DE CRIAÇÃO E ABATE DE SUÍNOS E DO SEU APROVEITAMENTO ENERGÉTICO 72

6.1 Aspectos do tratamento de resíduos de criação e abate de suínos....73

6.2 Emissões, Suinocultura de Baixo Carbono e aproveitamento energético do biogás de dejetos suínos no Brasil....76

7. CONCLUSÕES....81

8. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS 83
9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....85
10. ANEXOS 98

1. INTRODUÇÃO E OBJETIVOS

A carne suína está em terceiro lugar na classificação de maior produção do setor de pecuária e aves a nível mundial, tendo apresentado produção de cerca de 102 milhões de toneladas em 2019, ficando atrás apenas dos bovinos e frangos (USDA, 2020). Segundo a Associação Brasileira de Proteína Animal (ABPA, 2019), o Brasil ocupa o quarto lugar no ranking de maiores produtores com cerca de 4 milhões de toneladas (sendo 84% destinados ao mercado interno e 16% para a exportação), ficando atrás apenas da China, com 54 milhões de toneladas, da União Europeia, com participação de 24,3 milhões de toneladas e dos Estados Unidos, este com 11,9 milhões de toneladas produzidas.

Para melhor entendimento da suinocultura, deve-se conceituar a Cadeia Produtiva Agroindustrial (CPA), sendo o conjunto de processos e atividades envolvidas desde os insumos até a comercialização, subdivididas em produção de matérias-primas, industrialização e distribuição (BATALHA; SILVA, 2007). De acordo com Melz e Gastardelo (2014), a Cadeia Produtiva de Suínos compreende os setores de insumo e produção pecuária no segmento de matérias-primas; abate e processamento no segmento de industrialização e comercialização no segmento de distribuição. Para esse estudo, o foco será o setor de produção pecuária nacional e regional de suínos.

No que diz respeito aos aspectos ambientais, uma das problemáticas relacionadas à suinocultura é quanto à destinação dos resíduos tanto da criação como do abate, já que é considerada uma atividade de grande potencial poluidor, devido à alta concentração de nutrientes, matéria orgânica, sólidos, patógenos e metais pesados (USDA; EPA, 1999). Segundo Kunz, Higarashi e Oliveira (2005), a configuração atual da indústria da suinocultura, caracterizada pela criação intensiva em regime de confinamento, além do manejo inadequado dos resíduos, eleva o risco de contaminação de águas superficiais e subterrâneas, do solo e do ar.

Já de acordo com Kunz et al. (2004), a destinação dos dejetos da suinocultura é realizada nas chamadas esterqueiras ou lagoas, para posteriormente serem aplicadas ao solo como fertilizantes. Essa tem sido a opção de menor custo para os produtores. Porém, para a utilização na fertilização dos solos, deve haver um

planejamento e controle minucioso de nutrientes para minimizar os impactos ambientais (GUIMARÃES et al., 2017).

Visando o aproveitamento energético e a diminuição dos impactos ambientais, a digestão anaeróbia dos resíduos de criação e abate de suínos é apresentada como alternativa frente à cultura atual, viabilizando a produção de biogás e seu aproveitamento energético.

O biogás é o gás obtido por meio da digestão anaeróbia de materiais orgânicos em biodigestores. Segundo o U. S. DEPARTMENT OF ENERGY (1996), o biogás consiste numa mistura de metano (CH_4) e dióxido de carbono (CO_2), somando estes 90% do seu volume. A parcela restante é formada por gás sulfídrico (H_2S), nitrogênio molecular (N_2), água (H_2O), amônia (NH_3), entre outros. Coelho et al. (2006) apresentam que o biogás pode conter entre 40% e 80% de metano, dependendo da fonte pelo qual é obtido, com base em diversos fatores como carga orgânica, temperatura, pressão, etc. Considerando uma porcentagem média de 60% de metano no biogás, o poder calorífico inferior (PCI) apresenta valores de 5.500 kcal/m³ (CASSINI; VOZOLLER; PINTO, 2003).

O aproveitamento energético do biogás pode ocorrer por diversas formas e tecnologias. Segundo Coelho et al. (2018), os usos finais envolvem a produção de eletricidade, energia térmica, substituição de combustíveis convencionais e injeção na rede de gás natural; alguns deles exigindo purificação do biogás.

Diversos trabalhos foram publicados com o intuito de quantificar a produção de dejetos da suinocultura e a produção de biogás a partir desses resíduos. Trabalhos como o Relatório de Pesquisa: Diagnóstico dos Resíduos Orgânicos do Setor Agrossilvopastoril e Agroindústrias Associadas, desenvolvido por Schneider et al. (2012), do Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (IPEA), apresentam metodologia para determinação de resíduos com base naquela desenvolvida por Amaral et al. (2006) e pela *American Society of Agriculture Engineers* (ASAE, 2003) que considera um fator de produção média de dejetos de animais vivos, além de definir um peso médio para o peso dos animais. Além disso, a metodologia do IPEA considera um peso inicial, final e variações do peso dia a dia.

Zanato (2014) avaliou o processo de biodigestão anaeróbia de diversos dejetos animais, incluindo da suinocultura, por meio de gasômetros e utilizando a metodologia empregada por Caetano (1991) para estimativa da produção contínua de biogás em biodigestores indianos. Miranda (2009), por sua vez, desenvolveu um

trabalho no qual avaliou a produção e qualidade do biogás proveniente de suínos em diferentes fases de criação e sob manejos alimentares diferenciados, baseando-se em equações de desempenho, digestabilidade dos nutrientes e produção de fezes.

A Rede BiogásFert, por meio de um trabalho desenvolvido por Mito et al. (2018), abordou uma metodologia para o potencial de biogás e biometano para planteis suínos e bovinos brasileiros, baseada na proposta pelo Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC, 2006) e pelo Centro Internacional de Energias Renováveis (CIBIOGÁS, 2009), utilizando fatores de conversão e produção diária de dejetos, considerando números pré-estabelecidos para a fração anual de permanência de suínos, além dos pesos inicial e final dos animais.

Diversos outros trabalhos apresentam distintas metodologias referentes ao levantamento de dados de cada etapa da suinocultura no Brasil, obtendo-se assim faixas de produção de biogás para essa indústria. Além disso, os diferentes resultados são consequências de algumas considerações realizadas em cada metodologia com base em fatores pré-determinados, sem prévio estudo sobre a cadeia produtiva dos suínos. Ainda, as informações sobre o potencial brasileiro e regional do aproveitamento energético da suinocultura são escassas e necessitam de análise minuciosa.

No âmbito industrial, os resíduos de abatedouros já são empregados em processos para obtenção de subprodutos, como ração animal, por exemplo. Portanto, esses resíduos não são considerados para outros fins, incluindo seu aproveitamento energético. Além disso, as metodologias para obtenção do potencial de biogás para esses resíduos são generalistas e carecem de especificações adaptadas para essa análise.

Portanto, busca-se apresentar um estudo contendo análise das metodologias para quantificar os resíduos e estimar o potencial de produção de biogás proveniente da suinocultura e do abate de suínos no Brasil e regiões, evidenciando particularidades na análise de cada uma delas. Com isso, busca-se comparar os resultados obtidos levando em consideração os parâmetros existentes em cada análise. Além disso, como resultado esperado, busca-se o esboço de curvas do potencial e faixas de produção do biogás proveniente da criação e abate de suínos, dividindo-as nacionalmente e por regiões. Também será apresentado o aproveitamento energético do biogás nas formas de energia elétrica e como combustível, abordando os impactos ambientais e sociais relacionados ao tratamento

dos resíduos da suinocultura brasileira, assim como do abate, e a produção e uso do biogás nesse setor.

Este trabalho está estruturado da seguinte forma: o capítulo 2 apresenta o Estado da Arte abordando desde a suinocultura no Brasil e os setores de criação e abate, a caracterização e composição dos seus resíduos e as tecnologias disponíveis para seu aproveitamento energético; no capítulo 3, são abordadas as metodologias utilizadas para quantificação de resíduos do setor e para a determinação do potencial de produção de biogás a partir destes resíduos, além dos dados utilizados para essa avaliação; no capítulo 4, é apresentada uma análise das metodologias utilizadas e discussão dos resultados obtidos. O capítulo 5 apresenta uma discussão acerca do aproveitamento energético do biogás nas formas de energia elétrica e biometano; o capitulo 6 aborda uma análise dos impactos ambientais, sociais e tecnológicos do tratamento e aproveitamento energético dos resíduos. No capítulo 7, são apresentadas as conclusões do trabalho e, no capítulo 8, sugestões para trabalhos futuros.

1.1 Objetivos

O objetivo geral deste trabalho é analisar as metodologias existentes para determinação da produção de resíduos e do potencial de biogás proveniente da suinocultura e do abate de suínos no Brasil e regiões, bem como seu aproveitamento energético, por meio de revisão bibliográfica de trabalhos já realizados e dados atualizados do setor.

Os objetivos específicos deste trabalho são:

a) Levantar os dados relacionados à identificação, produção e destinação atual dos resíduos da suinocultura e do abate de suínos no Brasil;

b) Obter dados referentes à criação e abate de suínos no Brasil e por região;

c) Apresentar as metodologias e fatores existentes para quantificação de resíduos da criação e abate de suínos;

d) Identificar as metodologias para determinação do potencial de biogás proveniente dos resíduos da criação e abate de suínos;

e) Realizar análise das metodologias apresentadas para quantificação de resíduos e potencial de geração de biogás;

f) Analisar o aproveitamento energético (elétrico e biometano) do biogás proveniente dos resíduos da criação e abate de suínos no Brasil;

g) Apontar os impactos ambientais e sociais resultantes do tratamento dos resíduos provenientes da criação e abate de suínos no Brasil e regiões, bem como do aproveitamento energético do biogás obtido no processo de tratamento.

2. ESTADO DA ARTE

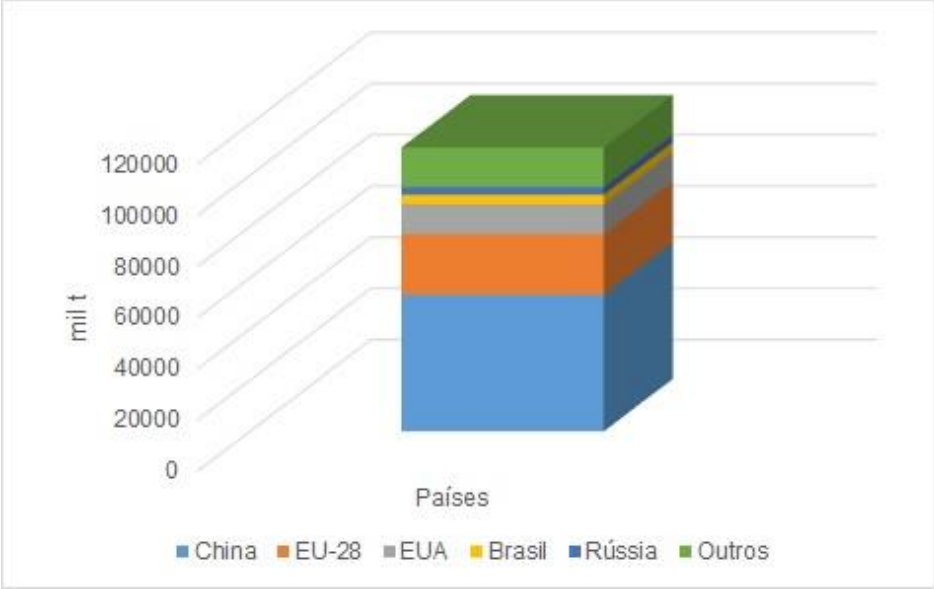
Este capítulo apresenta o setor de suinocultura e suas cadeias por meio de uma revisão da literatura existente, além de documentos de associações do setor, que descreve os processos e funcionamentos, bem como a situação do cenário atual brasileiro. São apresentadas a características e a composição dos resíduos da suinocultura e abatedouros de suínos no Brasil, abordando também os métodos de aproveitamento energético dos resíduos da agroindústria.

2.1 Suinocultura no Brasil

A suinocultura é a segunda fonte de proteína animal mais consumida no mundo, estando atrás apenas dos pescados. O consumo da carne suína apresenta crescimento e rentabilidade no âmbito nacional e internacional (GUIMARÃES et al., 2017; USDA, 2020).

Segundo a U. S. Department of Agriculture (2020) e a Associação Brasileira de Proteína Animal (2019), o Brasil apresenta-se como o quarto maior produtor mundial de carne suína com 3,98 milhões de toneladas em 2018, representando 3,6% do total. O mercado de produção é dominado pela China, com parcela de 48,7%, seguido pela União Europeia, que detém cerca de 21% e em terceiro os Estados Unidos, com participação de 10,7%. A **Figura *1*** apresenta os cinco maiores produtores mundiais e sua contribuição para o total de carne suína produzida no período de 2018.

Figura 1 - Produção Mundial de carne suína em 2018



Fonte: Elaboração própria a partir de ABPA (2019) e USDA (2020).

Números indicam um constante crescimento da suinocultura no Brasil ao longo dos anos, com exceção do período de 2012-2013, no qual o setor passou por uma crise devido à barreira comercial e embargos impostos pela Argentina e Rússia, obrigando os produtores a disponibilizar o produto no mercado interno, ocasionando aumentos dos custos da produção e diminuição dos lucros dos produtores (ALVEZ, 2012). A **Tabela *1*** apresenta valores efetivos do rebanho brasileiro de suínos dos últimos cinco anos, destacando a diminuição da produção entre 2012 e 2013.

Tabela 1 - Rebanho efetivo de suínos no Brasil

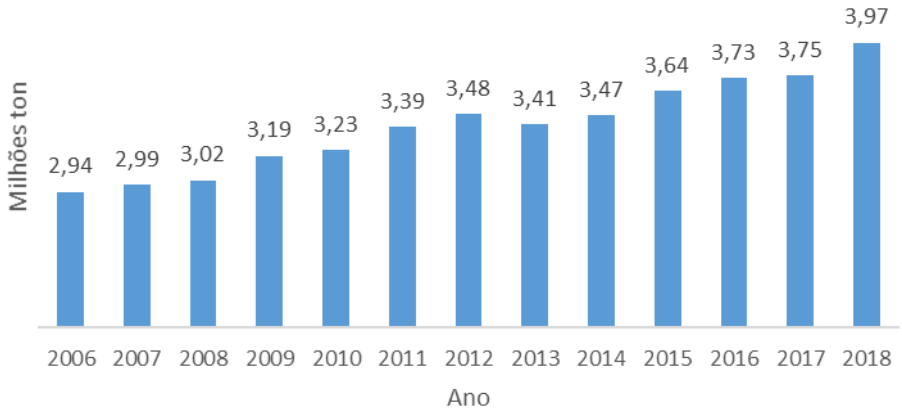
Rebanho (milhões de cabeça/ano)	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018
Suíno – total	38,80	36,74	37,93	39,80	40,05	41,38	41,44

Fonte: Pesquisa Pecuária Municipal (IBGE, 2018).

A **Figura *2*** apresenta a evolução da produção brasileira de carne suína dos últimos 13 anos, em milhões de toneladas por ano. A partir do decréscimo ocorrido no período de 2012-2013, o setor da suinocultura apresentou crescimento devido ao aumento do consumo da carne a nível mundial. Em 2018, 84% da produção foi destinado ao mercado interno e os 16% restantes foram direcionados à exportação

para diferentes regiões mundiais, com destaque para Ásia, União Europeia e Oriente Médio (ABPA, 2019).

Figura 2 - Evolução da produção brasileira de carne suína (2006-2018)

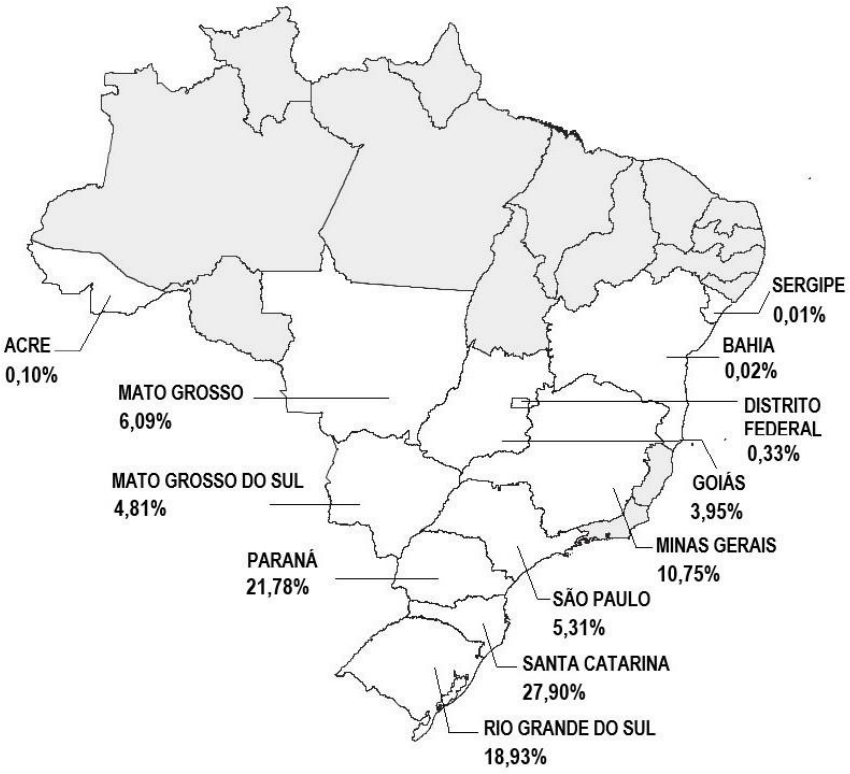


Fonte: Adaptado de ABPA (2019)ABPA e USDA (2020).

Quanto à importação, devido à sua autossuficiência, o Brasil não apresenta valores considerados, sendo os maiores importadores a China, Japão, México, Coreia do Sul e Estados Unidos. Já pela exportação, o país ocupa o quarto lugar entre os maiores exportadores mundiais de carne suína, representando 7,7% das movimentações do setor (USDA, 2020). De acordo com a Associação Brasileira de Proteína Animal (ABPA, 2019), os cortes consistem na predominância das exportações, além dos miúdos, carcaça, embutidos, etc., que juntos proporcionaram receita de quase US$ 1,2 bilhões em 2018.

O processo de criação e abate de suínos, parte da cadeia de processamento da suinocultura, compõe parte significativa quanto à geração de resíduos deste setor, parte fundamental do presente trabalho. Visto isso, a **Figura *3*** apresenta as parcelas de contribuição dos estados no setor de abate no Brasil, com destaque para a região Sul do país, que concentra mais de 68% de toda a indústria.

Figura 3 - Abate de suínos por estado brasileiro em 2018



Fonte: Adaptado de ABPA (2019).

Ao apresentar o cenário atual da suinocultura no Brasil e no mundo, levando em consideração o desenvolvimento do setor e os números crescentes, faz-se necessário o conhecimento acerca da indústria. A seguir, será apresentada a indústria da suinocultura no Brasil, identificando o Sistema Agroindustrial de Suínos e destacando os setores de criação e abate.

2.2 Cadeia produtiva de suínos no Brasil

Para conhecimento da indústria da suinocultura, deve-se introduzir os conceitos referentes aos sistemas agroindustriais. De acordo com Santini e Filho (2004), entende-se por Sistema Agroindustrial (SAG) o conjunto de cadeias produtivas integradas e interdependentes à agroindústria, como a pecuária, avicultura e suinocultura.

A cadeia de produção agroindustrial, por sua vez, divide-se em macrossegmentos ou elos, sendo estes: produção de matérias-primas,

industrialização e comercialização. O elo de produção de matérias-primas relaciona as empresas fornecedoras dos insumos e matérias-primas iniciais; o elo da industrialização representa as empresas responsáveis pela transformação da matéria-prima em produto final para o consumidor; e o segmento de comercialização inclui as empresas que viabilizam o consumo através do contato direto com o cliente (BATALHA; SILVA, 2007).

Segundo Santini e Filho (2004), essa configuração permite encadear as operações de jusante a montante, definindo a estrutura da cadeia e inovações tecnológicas de acordo com as necessidades do consumidor final. Os macrossegmentos são articulados para trabalharem de modo eficiente para suprir as exigências do setor agroindustrial.

Guimarães et al. (2017) apresentam a composição da cadeia agroindustrial da suinocultura composta por: (i) produtores de insumos, sendo a ração, vacinas, medicamentos, equipamentos e genética; (ii) granjas, relacionadas ao processo de criação de animais; (iii) agroindústria, englobando os abatedouros e frigoríficos; (iv) indústria de alimentos; (v) distribuidores, tanto atacado como varejo; e (vi) consumidores finais.

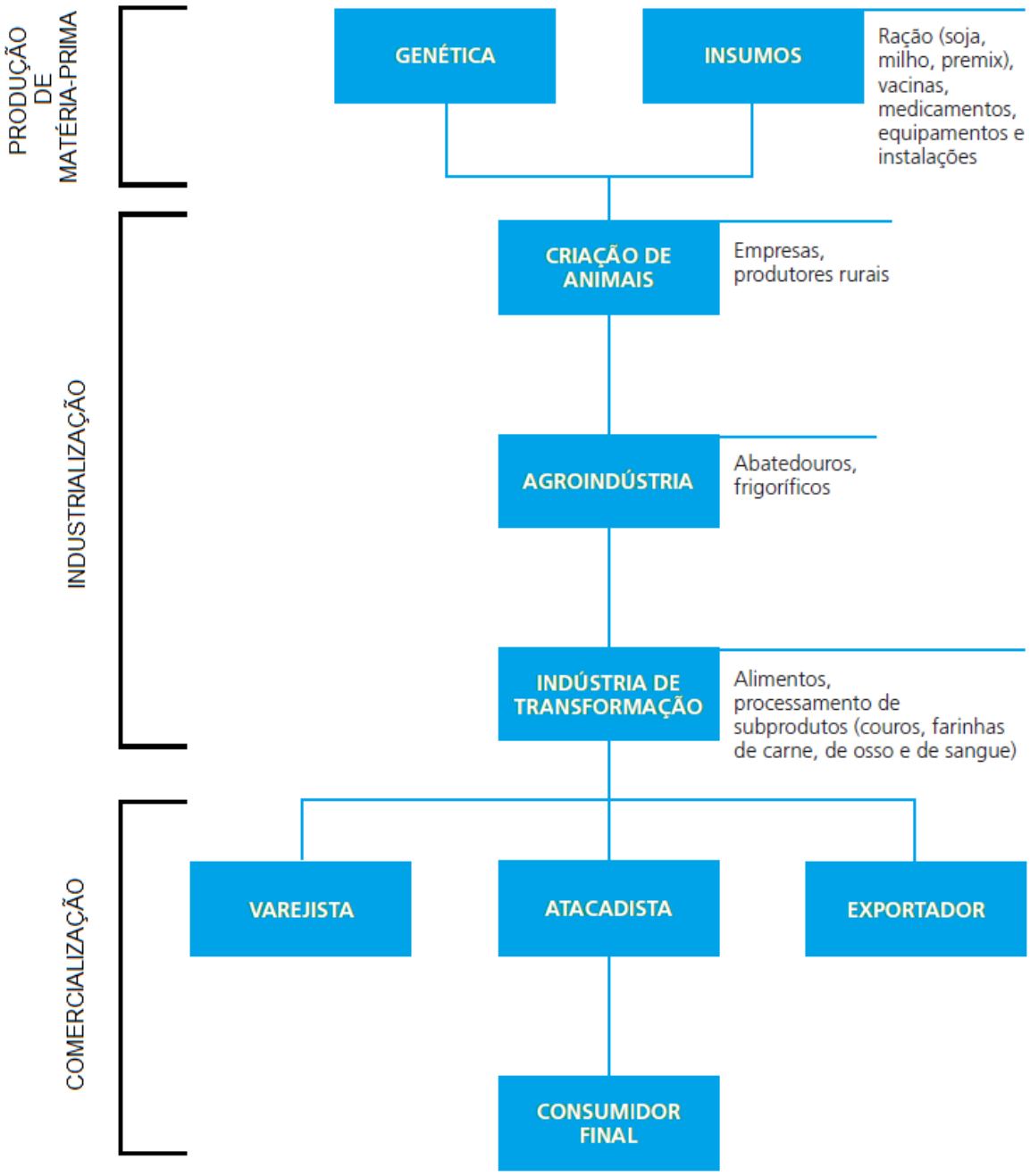
O primeiro elo da cadeia produtiva de suínos diz respeito a primeira etapa do setor, sendo anterior à propriedade, que englobam pesquisas e melhoramento genético dos suínos visando otimização da produção. As empresas responsáveis por esse segmento são em sua maioria estrangeiras, sendo localizadas em países desenvolvidos (TRICHES et al., 2006). Além destas, estão inclusas nesse elo as indústrias de medicamentos, fornecedores de energia, combustíveis, etc.

No segundo elo, são consideradas as atividades desenvolvidas dentro das propriedades, englobando as indústrias de ração e as unidades de produção dos suínos, incluindo matrizes, reprodução, engorda, entre outros. Além dessas, os processos de armazenamento e tratamento de dejetos gerados nessas unidades são incluídos nesse segmento (TRICHES et al., 2006).

Ainda segundo Triches et al. (2006), no terceiro e último macrossegmento são incluídos os processos posteriores às propriedades, sendo eles os atacadistas, varejistas e exportadores, além da agroindústria, indústrias dos subprodutos (couro, farinha de carne, osso e sangue) e agentes consumidores internos e externos.

A **Figura *4*** ilustra a cadeia produtiva da suinocultura por meio de um fluxograma, identificando os macrossegmentos de produção da matéria-prima, industrialização e comercialização, conforme citados anteriormente.

Figura 4 - Fluxograma da cadeia produtiva de suínos



Fonte: Adaptado de Guimarães et al. (2017).

Com o intuito de quantificar a geração de dejetos por meio da metodologia a ser proposta, o macrossegmento de industrialização será estudado com maior

profundidade por meio dos setores de criação de animais e agroindústrias (abate de suínos), sendo estes o de grande concentração de resíduos da suinocultura.

2.2.1 Criação de Suínos

O sistema de criação de suínos contempla desde o nascimento até o pré-abate do animal. A classificação do processo de criação é segmentada de acordo com os seguintes fatores: fases da categoria de produção baseadas na trajetória do suíno e sistemas de produção da suinocultura.

Segundo Amaral et al. (2016), as categorias de produção dividem-se em quatro fases, baseadas na vida do animal, apresentando parâmetros essenciais, sendo eles o peso do suíno em cada fase, seu tempo de confinamento e alimentação:

- Gestação: contempla as matrizes fêmeas durante o período de gestação, que pesam cerca de 250 kg e são destinadas exclusivamente para gestação e são alimentadas com ração e água. Este período pode levar cerca de 114 dias;
- Parto ou Maternidade: fase desde o nascimento dos leitões até o desmame, iniciando a vida pesando entre 2 a 3 kg e encerram esse ciclo com aproximadamente 7 kg, com tempo de confinamento de 21 a 28 dias. A alimentação é majoritariamente do leite das fêmeas. Além dos leitões, nessa fase também estão presentes as matrizes fêmeas, que possuem alimentação composta por ração e água;
- Creche: realocação dos suínos imediatamente após o desmame até atingirem 25 kg, período de 35 a 42 dias. Sua alimentação nessa fase é composta por ração e água;
- Terminação: processo de engorda do suíno para envio para o abate e abastecimento do mercado consumidor, na qual evolui de 25 kg até 120 kg, tendo duração de 90 a 105 dias. Os suínos consomem água e ração durante toda essa fase.

Além dos animais envolvidos nesses processos descritos, Mito et al. (2018) descrevem as matrizes machos, animais cujo propósito é apenas o de reprodução, cujo peso e alimentação assemelham-se ao das matrizes fêmeas. É importante

salientar que não é possível definir um ciclo para as matrizes, visto que elas permanecem na propriedade até serem consideradas inaptas para reprodução.

Os resíduos dessas fases, a serem apresentados posteriormente, são removidos por meio de lavagem com água ou raspagem, e então encaminhados para os reservatórios e/ou tratamentos presentes na propriedade, como esterqueiras, lagoas anaeróbias e biodigestores (MITO et al., 2018).

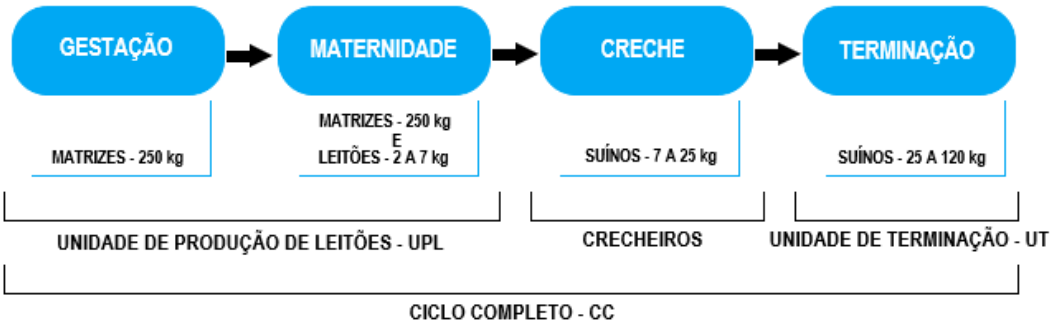
De acordo com Miele e Waquil (2007), quanto aos sistemas de produção a nomenclatura diz respeito às atividades desenvolvidas na propriedade, sendo divididas em:

- Ciclo completo (CC): todas as atividades estão reunidas em uma única propriedade, englobando desde a gestação até a terminação;
- Unidade Produtora de Leitões (UPL): concentra apenas as fases de gestação e maternidade;
- Crecheiros: dedicados exclusivamente às creches;
- Unidade de Terminação (UT): dedicadas exclusivamente à fase de terminação ou engorda.

As configurações de Ciclo Completo dominavam o Brasil até meados de 1990. A partir daí, buscando melhorar a eficiência dos processos e especialização nas etapas do sistema produtivo, houve uma mudança desses estabelecimentos para Unidades Produtoras de Leitões e Unidades de Terminação, alavancadas pela Região Sul do país (MIELE; WAQUIL, 2007).

A **Figura *5*** apresenta em resumo as categorias e os sistemas de produção, além dos animais presentes em cada uma delas e seu peso, como abordados acima.

Figura 5 - Categorias e sistema de produção de suínos



Fonte: Elaboração própria.

No que diz respeito ao sistema de exploração, a criação de suínos no Brasil corresponde às características das regiões e dos produtores. Portanto, são denominados de acordo com o manejo e classificados em (CARVALHO, P.L.C; VIANA, 2011):

- Sistema Extensivo ou à Solta: voltadas ao autoconsumo e com baixo nível tecnológico, os suínos são criados em coexistência com florestas e pomares de árvores, com alimentação sem controle nutricional a base de restos de comida e desperdícios agrícolas;
- Sistema Semi-Extensivo: devido ao maior conhecimento do produtor, os suínos são criados em abrigos e contenções, com melhorias na esfera nutricional e sanitária, garantindo melhor qualidade ao produto final;
- Sistema Intensivo de Suínos Criados ao Ar Livre – SISCAL: com baixo custo de implantação e manutenção para os produtores, os suínos são criados até a fase de creche com alimentação a base de rações e pastagem;
- Sistema Intensivo de Suínos Confinados – SISCON: configurado para que o suíno atinja o máximo de peso em menor espaço possível, com alimentação específica e melhoramento genético. Possui custos elevados e são previamente planejadas e definidas.

Visando o aumento da produção e lucros no setor, o Sistema Intensivo de Suínos Confinados caracteriza-se como o sistema de criação predominante na suinocultura brasileira (SAMWAYS; MICHALOSKI, 2017). Portanto, esse trabalho direciona-se a este sistema de criação, além do fato de que é possível realizar a captação de dejetos, diferentemente dos sistemas extensivos.

2.2.2 Abate de Suínos

Após todas as etapas descritas relacionadas à criação, os suínos são então encaminhados para o processo de abate. Segundo Santos (2014), os animais são transportados para os frigoríficos onde serão abatidos, geralmente no começo da noite, permanecendo em descanso em uma área isolada apenas com água para a hidratação. O abate é iniciado na manhã do dia seguinte, sendo dividido em turnos de aproximadamente 3 horas cada.

De acordo com o Guia Técnico Ambiental de Abate (PACHECO; YAMANAKA, 2006), existem diversas etapas envolvidas no abate de suínos no Brasil, desde a recepção dos animais até a estocagem e expedição da carne suína. Os processos serão descritos, assim como os insumos utilizados por cada um deles e seus resíduos.

Na etapa de Recepção, os animais são descarregados nas pocilgas ou mangueiras por meio de rampas, inspecionados, selecionados e separados por lotes, permanecendo confinados nesse espaço por 16 a 24 horas, sem alimentação, garantindo a diminuição dos alimentos ingeridos e digeridos. O descanso dos suínos diminui o estresse causado pela viagem e melhora as condições da carne, diminuindo a carga hormonal do animal. Nessa etapa, água é utilizada para aspersão nos animais, como forma de pré-limpeza, e higienização dos caminhões e das mangueiras, sendo também utilizados desinfetantes. Esses efluentes líquidos, juntamente com as fezes e urina dos animais, constituem os resíduos dessa etapa.

Na manhã do dia seguinte, os suínos são encaminhados para um corredor com divisões entre as saídas, para melhor controle da etapa de abate, andando em fila única. Nessa etapa, denominada Condução e Lavagem dos Animais, os suínos recebem jatos de água clorada, em sua maioria por meio de chuveiros com pressão controlada, de cima para baixo e também dos lados, permitindo a retirada eficiente de resíduos como esterco e urina.

Após a limpeza, os animais entram individualmente em um recinto imobilizador para a fase do Atordoamento, podendo ser ou não de forma contínua. Os animais ficam imobilizados por meio de esteiras ou cilindros rolantes em formato de V, impossibilitando que eles tenham apoio para as patas. Então, são posicionados dois eletrodos nas laterais da cabeça e um na altura do coração, sendo por eles liberada uma descarga elétrica para atordoamento dos animais. Esse processo também pode ser realizado em câmaras com excesso de gás carbônico. Os resíduos dessa fase são predominantemente líquidos, como urina, vômito e água de higienização.

A sangria diz respeito à fase de drenagem do sangue dos animais, sendo estes pendurados em trilho aéreo ou em mesas e bancadas apropriadas. Estima-se que a média de sangue drenada de cada suíno é de 3 litros (PACHECO; YAMANAKA, 2006). O sangue drenado nesta fase pode ser direcionado para indústria farmacêutica, ser enviado em bombonas para posterior processamento de separação de componentes para utilização em indústrias de beneficiamento (obtenção da albumina,

fibrina e plasma) ou ainda ser utilizado para a fabricação de ração animal. Nessa etapa também são utilizados produtos de limpeza e água para higienização do local e recebimento de novo lote.

Posterior ao processo de sangria, os animais são mergulhados em tanques com água em torno de 65ºC para remoção de pelos e unhas ou cascos. Essa etapa dura cerca de um minuto e retira a maior parte da sujeira presente no couro do suíno. Então, os animais são submetidos à Depilação, na qual remove boa parte dos pelos por meio de uma máquina, ocasionando também na remoção de pequenas quantidades de couro. O restante dos pelos e unhas são removidos manualmente com o auxílio de facas. Os pelos residuais dessa fase são enviados para graxarias[1] ou indústrias de pinceis, tapetes, compostagens, entre outras.

A Evisceração consiste na etapa de retirada das vísceras do animal, removendo coração, pulmões e fígado. As vísceras são separadas e direcionadas para a produção de embutidos ou indústrias farmacêuticas. Pode ocorrer a remoção da cabeça do animal. E por fim, o Corte da Carcaça é o processo no qual remove-se a medula, o cérebro e a carcaça do animal, sendo esta lavada com água pressurizada e enviadas para a etapa de refrigeração para sua conservação.

A Refrigeração visa diminuir o crescimento microbiano da carne, diminuindo sua temperatura para 7ºC em cerca de 24 a 48 horas. Após o período de refrigeração, a etapa de Cortes e Desossa divide as carcaças em porções menores para comercialização, realizada manualmente e com auxílio de facas. Os resíduos de ossos e partes não comestíveis são enviados para graxarias. E na Estocagem / Expedição os cortes e vísceras são separados, embalados e estocados, prontos para encaminhamento para os mercados consumidores.

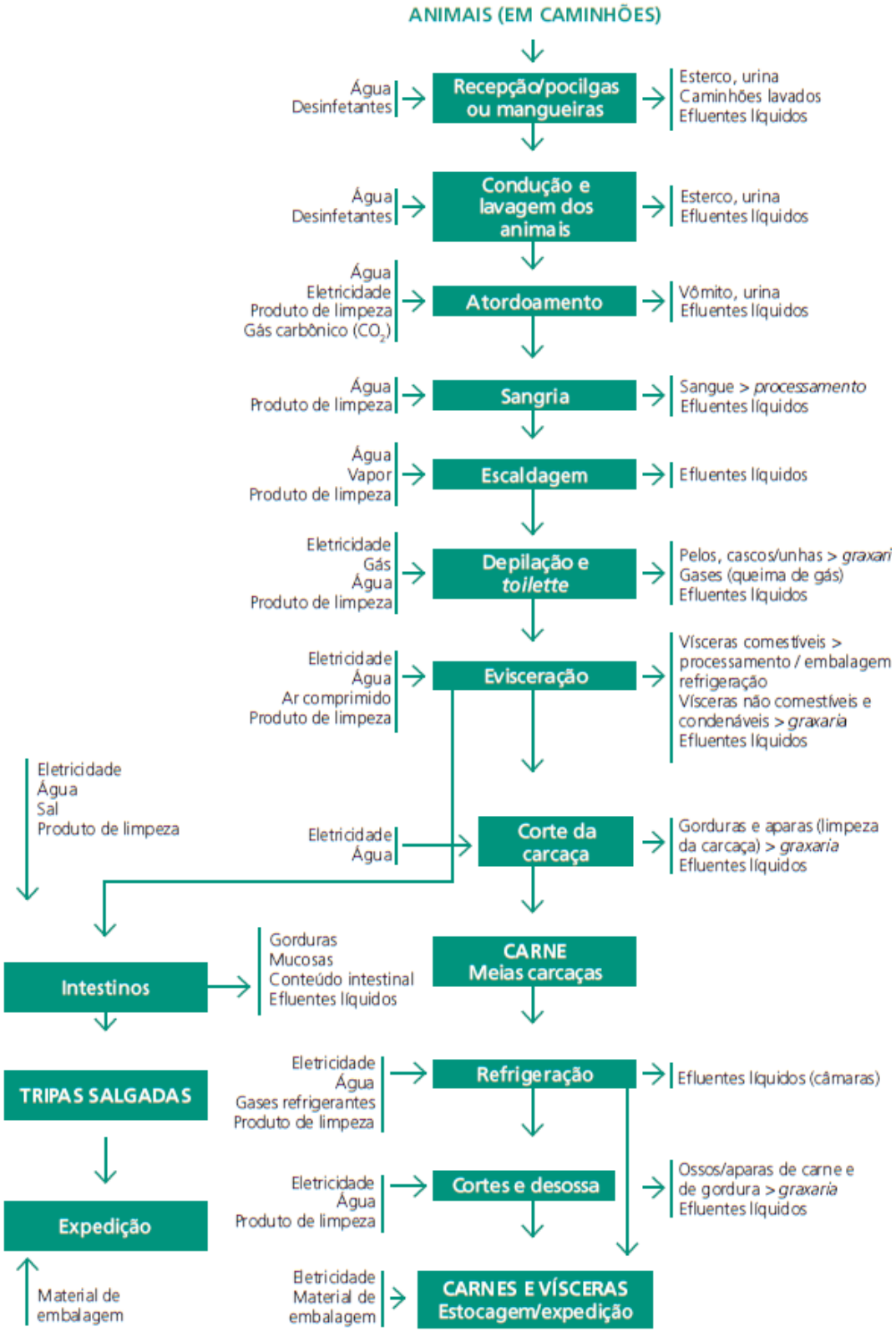
A **Figura *6*** apresenta um fluxograma com todas as etapas do abate de suínos, incluindo as demandas de cada operação e seus rejeitos, como apresentado acima.

Tendo apresentado os processos de criação e abate do setor da suinocultura, se faz necessário conhecer os resíduos da suinocultura em sua composição, sendo estes importantes para a análise do aproveitamento energético.

---

[1] Graxarias processam resíduos da indústria de abate como sangue, ossos, carne, chifres, dentre outros, visando o tratamento e obtenção de sebo ou gordura animal, amplamente utilizados, nas industrias químicas e cosméticas (PACHECO; YAMANAKA, 2006).

Figura 6 - Etapas do processo de abate de suínos



Fonte: Pacheco e Yamanaka (2006).

2.3 Dejetos da suinocultura

Para a caracterização dos dejetos da suinocultura utilizados para fins energéticos, faz-se necessário conhecer a dieta dos animais e os dejetos para o detalhamento de sua composição e até mesmo a quantidade gerada.

2.3.1 Alimentos utilizados para a nutrição dos suínos

De acordo com Ferreira et al. (2014), ao estabelecer um plano nutricional para qualquer animal, é necessário levar em consideração as exigências nutricionais diárias e o consumo diário de ração. Além disso, a quantidade e qualidade da alimentação dos animais respeita algumas variáveis, como a taxa de crescimento desejada, o nível de energia da dieta, a etapa do sistema de produção de cada animal, entre outros.

Rohr, Costa e Costa (2016) ainda destacam algumas boas práticas para o bem-estar dos suínos, evidenciando o fato de que os animais não devem ficar sem ração por tempo maior que o estabelecido entre os intervalos de alimentação, apresentando projetos de comedouros e métodos de nutrição destes. A ração deve ser balanceada e as grandes fábricas devem seguir os conceitos de boas práticas de fabricação (BPF), estabelecidos pela Instrução Normativa n° 4 de 23 de fevereiro de 2007 do Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA).

Segundo Miranda (2009), os principais alimentos utilizados na dieta dos suínos são denominados alimentos energéticos, sendo aqueles que apresentam em sua composição menos de 20% de proteína bruta e 18% de fibra bruta. Grãos de cereais e seus subprodutos, frutos, raízes e tubérculos constituem esses alimentos em sua grande maioria.

Considerando essa classificação baseada na concentração de nutrientes, Fávero et al. (2003) apresentam diversas classes de alimentos utilizadas no manejo suíno. Além dos alimentos energéticos citados, são apresentados os alimentos fibrosos com variações na concentração proteica e alimentos proteicos com variações no teor de minerais. A **Tabela *2*** traz exemplos de ingredientes para cada nível de classificação, diferenciando-os quanto ao teor energético, proteico e de fibra.

Tabela 2 - Classificação de alimentos para nutrição suína

Classe de Alimentos	Exemplo
Essencialmente energéticos	Açúcar, Gordura de aves/bovina, Melaço em pó, Óleo de soja, Raiz de mandioca integral seca
Energéticos fornecedores de proteína	Cevada em grão, Soro de leite seco, Grão de milho moído, Sorgo, Trigo integral
Energéticos com médio a alto teor de fibra	Farelo de amendoim, Farelo de arroz integral, Farelo de coco, Cevada em grão
Fibrosos com baixo teor energético e médio teor proteico	Feno moído de alfafa, Farelo de canola, Farelo de girassol, Farelo de algodão
Fibrosos com baixo teor proteico	Farelo de algaroba, Farelo de trigo, Casca de soja, Farelo de polpa de caju
Proteicos com alto teor energético	Leite desnatado em pó, Levedura seca, Farelo de soja, Soja integral tostada
Proteicos com alto teor de minerais	Farinhas de carne e ossos, Farinha de peixe
Exclusivamente fornecedores de minerais	Calcário calcítico, Fosfato monoamônico, Farinha de ossos calcinada, Sal comum

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

Os principais constituintes das rações de suínos são o milho e o farelo de soja, sendo responsáveis por cerca de 80 a 90% dos ingredientes utilizados como alimento. Também, são consideradas as principais fontes proteicas e energéticas para a cadeia da suinocultura, estando passíveis de modificações e adaptações com o intuito de minimizar custos e/ou obedecer à disponibilidade destes (RUIZ, 2006).

Algumas alternativas de desenvolvimento nutricional são empregadas em diversos casos com o intuito de adequar a alimentação à disponibilidade de ingredientes e necessidades relacionadas à dieta.

Miranda (2009) apresenta a utilização do sorgo como substituinte ao milho, tendo em vista o direcionamento deste grão para outros fins no mercado, destacando o bom valor nutricional e a alta disponibilidade. Já Silva et al. (2018) analisaram a utilização de farelo de biscoito, farelo de coco e farelo de macarrão, evidenciando utilização de tais ingredientes como forma de economia com alimentação dos animais.

Arouca et al. (2012) conduziram um estudo no qual avaliavam a utilização da cana-de-açúcar em substituição ao milho em suínos na fase de terminação tardia, obtendo percentuais ideais de mistura desse alimento na ração utilizada objetivando melhor eficiência econômica. Já Zanotto et al. (2019) consideraram a utilização da farinha de carne e osso suína produzida com a inclusão de 10% de flotado industrial

de frigorifico, um composto orgânico obtido por meio da separação da matéria orgânica dos efluentes, para alimentação de suínos nas fases de crescimento e terminação.

Portanto, a nutrição dos suínos é fator determinante para o cumprimento das necessidades dos animais e também da indústria dessa cadeia. Diversos trabalhos destacam a variabilidade dos alimentos utilizados para a alimentação dos animais.

2.3.2 Composição dos dejetos suínos

Para a análise proposta, deve-se levar em consideração algumas informações relevantes para a quantificação dos dejetos de animais, como a composição físico-química destes e o sistema de manejo adotado. Por dependerem da diluição e da modalidade de armazenamento e manuseio, os dejetos podem apresentar variabilidades na concentração de seus nutrientes (OLIVEIRA, 1993).

Segundo Konzen (1983), os dejetos são formados por matéria orgânica, nitrogênio (N), fósforo (P), potássio (K), cálcio (Ca), sódio (Na), magnésio (Mg), manganês (Mn), ferro (Fe), Zinco (Zn), Cobre (Cu) e diversos elementos incluídos na alimentação dos animais. A **Tabela *3*** apresenta características quantitativas e qualitativas dos dejetos de suíno em fossas de retenção de suínos em crescimento e terminação. A composição dos dejetos varia significativamente em função do tipo de alimentação, idade dos animais e quantidade de água.

Tabela 3 - Características dos dejetos de suínos

Elementos / Componentes	Unidade	Média	Variação %
pH	-	6,94	2,45
Umidade	%	90,38	1,42
Matéria seca	%	8,99	13,68
Sólidos totais	%	9,00	27,33
Sólidos voláteis/sólidos totais	%	75,05	5,86
Fibra bruta	%	1,21	24,79
Energia Bruta	kcal/kg	391,26	13,24
Proteína Bruta	%	3,78	8,73
Nitrogênio total	%	0,60	8,33
Fósforo	%	0,25	28,00
Potássio	%	0,12	33,33
Cálcio	%	0,57	24,56
Magnésio	%	0,096	23,96
Sódio	%	0,04	25,00
Cobre	mg/l	11,79	26,80
Zinco	mg/l	72,36	39,34
Manganês	mg/l	49,23	18,28
Ferro	mg/l	216,41	46,41

Fonte: Adaptado de Konzen (1983).

Já a **Tabela *4*** traz uma comparação entre a produção diária de resíduos de diversos animais, considerando uma metodologia prévia, evidenciando a produção considerável de resíduos sólidos para suínos, estando atrás apenas dos bovinos de corte e de leite.

Tabela 4 - Produção diária de resíduos líquidos e sólidos de diversos animais

Tipo de resíduo	Unidade	Suínos	Frango Corte	Gado Corte	Ovinos	Gado Leite
Líquidos	l/dia em função do peso vivo	5,1	6,6	4,6	3,6	9,4
Sólidos	Kg/animal/dia	2,3-2,5	0,12-0,18	10-15	0,5-0,9	10-15

Fonte: National Academy of Sciences (1977) e Konzen (1980).

A quantidade de dejetos produzida é diferente para cada categoria de suínos. A **Tabela *5*** apresenta a quantidade de esterco, de esterco e urina e de dejetos líquidos para cinco categorias: de 25-100 kg, porcas reposição cobrição e gestantes, porcas em lactação com leitões, macho e leitões. Sendo assim, evidencia-se o fato de que as

porcas em lactação e gestantes produzem a maior quantidade de dejetos na cadeia dos suínos.

Tabela 5 - Quantidade média diária de dejetos por categoria de suínos

Categoria	Esterco kg/dia	Esterco + Urina kg/dia	Dejetos Líquidos l/dia
25 – 100 kg	2,30	4,90	7,00
Porcas reposição cobrição e gestante	3,60	11,00	16,00
Porcas em lactação com leitões	6,40	18,00	27,00
Macho	3,00	6,00	9,00
Leitões	0,35	0,95	1,40

Fonte: Adaptado de Oliveira (1993).

Ao abordar os aspectos químicos, devem ser apresentados os conceitos relacionados a Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO) e Demanda Química de Oxigênio (DQO), responsáveis por determinar a concentração de material orgânico nos efluentes e consequente produção de biogás (OLIVEIRA, 1993).

A DBO é um indicador indireto da concentração de matéria orgânica biodegradável tendo como base a demanda de oxigênio consumida pelos microrganismos. Já a Demanda Química de Oxigênio passa a determinar a matéria orgânica a partir da concentração de oxigênio consumida para oxidação do material orgânico, sendo biodegradável ou não, por meio de um agente oxidante (COLUNA, 2016; MEES, 2006; OLIVEIRA, 1993).

A **Tabela *6*** apresenta os valores de DBO diária para a cadeia de suínos, em função do peso médio e do ciclo produtivo dos animais. Observa-se valores maiores de DBO diária em kg/cabeça em porcas com leitões, seguido por suínos reprodutores (varrão) e porcas em gestação. Animais em terminação também possuem valores de DBO relativamente altos. Ainda, outros trabalhos indicam certa variabilidade nos pesos apresentados.

Segundo Moller, Sommer e Ahring (2004), além dos conceitos químicos apresentados, a qualidade e quantidade dos sólidos voláteis (SV) presentes nos dejetos são os principais fatores que interferem na produção de metano durante seu tratamento. O valor dos SV geralmente não está disponível por ser dependente dos níveis de ingestão animal, qualidade do alimento e outros fatores. Sendo assim, a

melhor estimativa de SV se faz analisando a ingestão dos alimentos e a digestabilidade destes pelos animais.

Tabela 6 - Valores de DBO diárias para suínos em função do peso do animal e do ciclo produtivo

Categoria	Peso (kg/cabeça)	DBO diária (kg/cabeça)
Varrão	160	0,182
Porca em gestação	125	0,182
Porca com leitão	170	0,340
Leitões desmamados	16	0,032
Suínos em crescimento	30	0,059
Suínos em terminação	68	0,136

Fonte: Freire (1985) e Oliveira (1993).

Cotez, Lora e Gómez (2008) definem que o conteúdo de sólidos totais (ST) e sólidos voláteis são importantes pois evidenciam a necessidade ou não de diluição dos dejetos, além da determinação do maior ou menor potencial de geração de biogás. Isso ocorre pois a bioconversão acontece somente na fração orgânica do substrato, sendo indicado pela concentração de SV, onde quanto maior o teor de SV, maior o potencial de produção do biogás (LEITE; POVINELLI, 1999).

Na **Tabela *7***, Oliveira (1993) apresenta informações calculadas e obtidas por Merkel (1981) para quantificar valores médios de DBO, sólidos totais e sólidos voláteis, tendo como base dos cálculos o peso de 100 kg.

Tabela 7 - Valores médios de produção diária de dejetos suínos

	Kg/dia/100 kg
Quantidade de dejetos produzidos	6,7
Umidade (%)	75 - 85
DBO_5	0,20 – 0,25
Sólidos Totais (ST)	0,50 – 0,97
Sólidos Voláteis (SV)	0,35 – 0,80

Fonte: Adaptado de Merkel (1981) e Oliveira (1993).

Levando em consideração a apresentação da composição química dos dejetos da suinocultura brasileira, faz-se necessária uma análise do potencial poluidor desses resíduos, tendo em vista todas as variáveis analisadas e os impactos decorrentes da má disposição e/ou utilização destes.

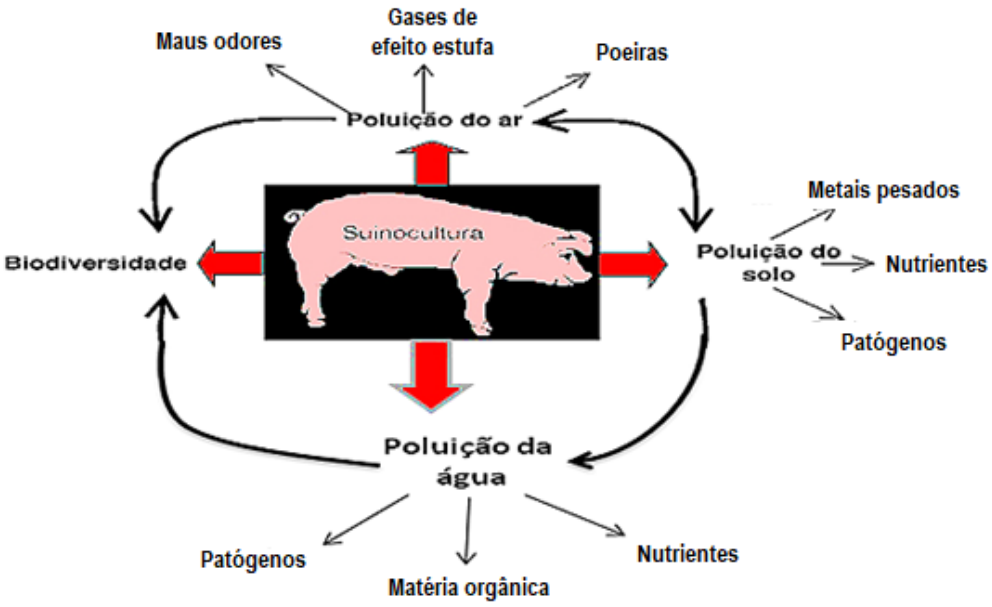
2.3.3 Potencial de Poluição dos dejetos suínos

Como apresentado em sua composição química, a suinocultura é avaliada como uma atividade com alto potencial poluidor do ambiente. Os resíduos deste setor apresentam elevados níveis de matéria orgânica, nitrogênio, fósforo, patógenos e sais, constituindo um risco à saúde e ao ecossistema (PERDOMO; LIMA; NONES, 2001). Segundo a *American Society of Agricultural Engineers* (ASAE, 2005), os dejetos suínos possuem potencial de poluição superior ao de outras espécies, a exemplo da humana, que possui teores de DBO 70% menores do que na suinocultura.

De acordo com Ito, Guimarães e Amaral (2016), os principais componentes químicos poluentes dos dejetos dos suínos são a matéria orgânica, fósforo (P), nitrogênio (N), cobre (Cu), Zinco (Zn) e outros metais pesados e microrganismos fecais patogênicos. A disposição indevida dos resíduos da suinocultura, considerando a alta concentração de animais por área, acarreta em impactos ambientais graves na água, ar e solo.

A **Figura *7*** apresenta as formas de poluição do ambiente mais expressivas quando se trata da suinocultura e seus dejetos, com destaque para os impactos no ar, no solo e na água.

Figura 7- Representação das principais formas de poluição do ambiente pelos dejetos da suinocultura



Fonte: Silva, Bassi e Nascimento (2011) *apud* OECD (2003).

A disposição dos resíduos da suinocultura sobre lagos e outras vias hídricas pode elevar os níveis de nutrientes dos corpos d'água, causando alterações biológicas importantes tanto para o próprio meio (morte e intoxicação de peixes e plantas) e para os animais e seres humanos (leptospirose, verminoses, alergias) (ITO; GUIMARÃES; AMARAL, 2016; OLIVEIRA, 1993).

Segundo Silva, Bassi e Nascimento (2011), quanto a poluição do ar, ocorre a emissão de gases voláteis na urina e fezes dos suínos. Ainda, os dejetos suínos possuem um composto denominado carbanato de amônio, com odor forte e capacidade de dissociar-se de gases de amônia e dióxido de carbono, gases de efeito estufa. Esses gases possuem mau odor, provocam irritação nos olhos, pele e nariz, com potencial de distúrbios neurais (LOPES; FILHO; ALVES, 2013).

Os dejetos da suinocultura são utilizados constantemente para fertilização do solo. Porém, segundo Oliveira e Nunes (2002), esta prática quando não controlada, acarreta em diversos riscos ambientais. Silva, Bassi e Nascimento (2011) destacam o acúmulo de fósforo e nitrogênio, além de metais pesados como cobre e zinco, ocasionando intoxicação das plantas e possível contaminação animal e humana.

2.4 Resíduos do abate de suínos

Nas indústrias de abate de suínos destaca-se o consumo de água em grandes quantidades, compondo a maior parte dos efluentes residuais. Esse efluente possui altos níveis de matéria orgânica devido a presença de dejetos, sangue e gorduras residuais dos processos de abate (UNEP; DEPA; COWI, 2000). Coluna (2016) destaca ainda que, ao utilizar a maioria dos resíduos como subproduto, os abatedouros geram poucos resíduos em sua totalidade.

Além da alta carga orgânica, Pacheco e Yamanaka (2006) evidenciam a presença de alto conteúdo de gordura, esterco, conteúdo estomacal não-digerido e conteúdo intestinal. Outro fator importante é a variação de pH em função dos agentes de limpeza ácidos e básicos utilizados em diversas etapas dessa indústria e flutuações de temperatura. Portanto, esses resíduos possuem altos valores de DBO e DQO, conceitos abordados nesse trabalho.

Um dos resíduos de maior importância, tanto para a criação como para o abate, consiste no esterco produzido pelos suínos. Ao chegarem nos abatedouros, os animais produzem elevada quantidade de dejetos e, nessa etapa, já ocorre lavagens

simultâneas tanto do caminhão utilizado no transporte como no ambiente no qual são mantidos. Esses resíduos, portanto, possuem em sua composição grande quantidade de esterco, urina e outros conteúdos intestinais (UNEP; DEPA; COWI, 2000).

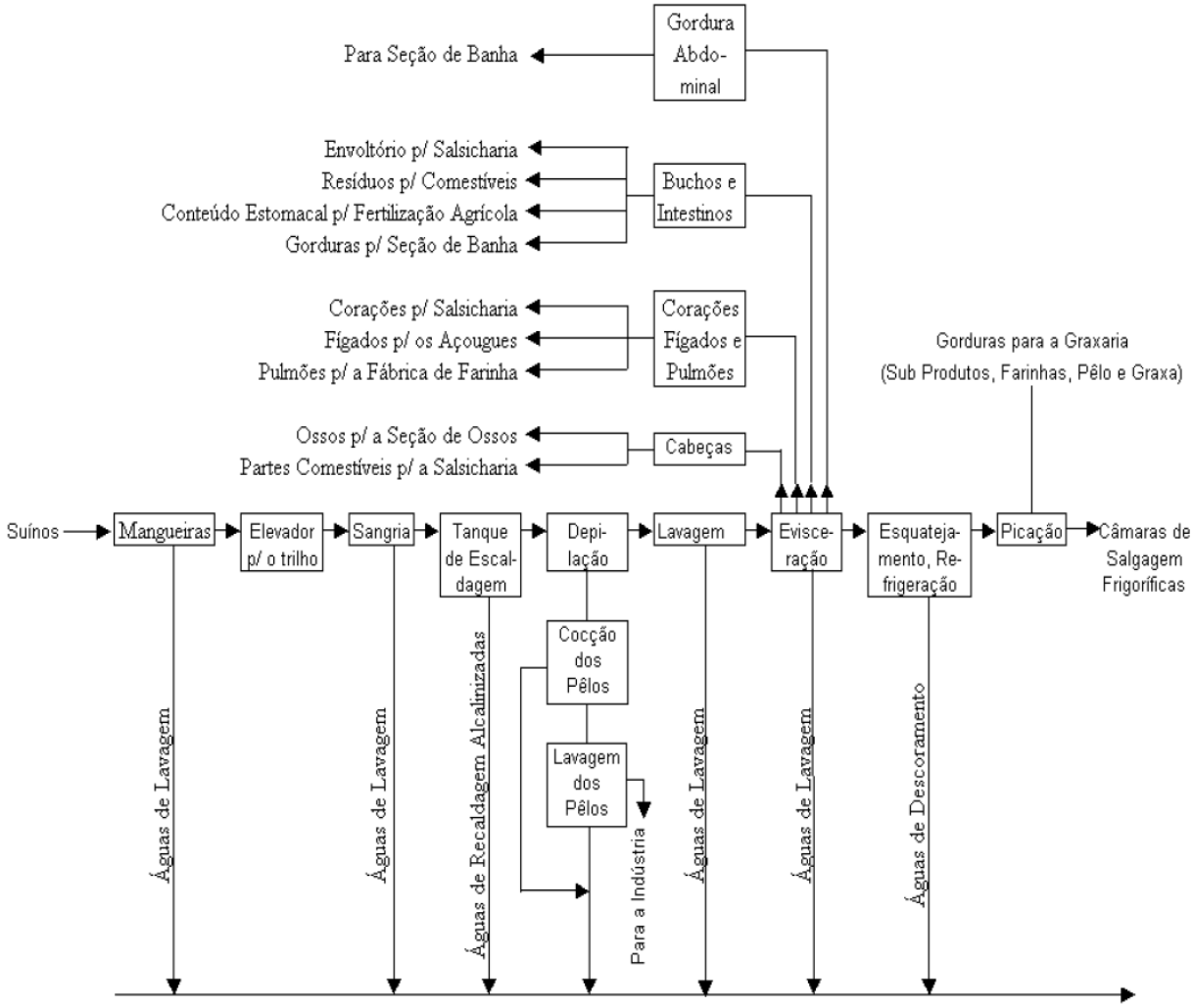
A próxima etapa de obtenção de resíduos é a de sangria, onde ocorre a coleta da maior parte do sangue dos suínos abatidos, sendo direcionado por meio de calhas para tanques de armazenamento, juntamente com a água utilizada para lavagens gerais (SCARASSATI et al., 2003).

Na etapa seguinte, ocorre a retirada dos pelos dos animais, removidos por meio de depilação e água quente. Essa água utilizada para escaldagem mistura-se com uma parcela de pelos e compõe uma parte do resíduo da indústria do abate de suínos (UNEP; DEPA; COWI, 2000).

A evisceração consiste na etapa de maior obtenção de resíduos e subprodutos da indústria do abate. Nesta etapa, as barrigas dos animais são abertas e as vísceras são removidas, obtendo-se quantidades expressivas de gordura, sangue e demais órgãos. Ocorrem vários ciclos de lavagem com água, sendo então o efluente predominantemente líquido nessa etapa (SCARASSATI et al., 2003).

A **Figura *8*** apresenta o processamento de suínos em suas várias etapas, caracterizando seus resíduos, direcionamento para produção de subprodutos e utilização de água.

Figura 8 - Processamento de suínos nos abatedouros



Fonte: Scarassati et al. (2003).

2.4.1 Composição dos resíduos de abate

Os resíduos de abate podem ser variáveis, dependo dos processos industriais utilizados e do consumo total de água por suíno abatido. Ainda, segundo Coluna (2016), o consumo total de água depende de fatores como o tipo do animal, o tamanho, a forma de abate e a tecnologia empregada.

Sendo de suma importância para a análise dos resíduos dessa cadeia, a **Tabela *8*** apresenta os produtos e subprodutos do abate de um suíno de cerca de 90kg, contendo o peso de cada um deles e sua participação percentual.

Tabela 8 - Produtos e subprodutos do abate de um suíno de 90 kg

	Peso (kg)	Porcentagem do Peso vivo (%)
Peso Vivo	90	100
Carne Desossada	57,6	64
Material não-comestível para graxarias	18,0	20
Vísceras comestíveis	9,0	10
Sangue	2,7	3
Outros	2,7	3

Fonte: Coluna (2016); Pacheco e Yamanaka (2006); UNEP; DEPA ; COWI (2000).

Segundo Pacheco e Yamanaka (2006), com intuito de determinar a carga orgânica poluidora média e concentração no efluente líquido gerado, os abatedouros podem ser classificados em dois tipos: com e sem industrialização da carne. A **Tabela *9*** ilustra os valores de DBO por cabeça de animal abatido e a concentração total média da DBO no efluente.

Tabela 9 - Carga Poluidora por animal abatido e concentração de DBO no efluente líquido nos abatedouros suínos

Tipo de Abatedouro	Carga Poluidora (kg DBO/cab)	Concentração Total de DBO no Efluente (mg/L)
Com industrialização da carne	0,94	620 – 1.800
Sem industrialização da carne	0,69	570 – 1.700

Fonte: CETESB (1993); Pacheco e Yamanaka (2006).

Os resíduos sólidos devem ser abordados de maneira diferenciada nas análises envolvendo abatedouros. Segundo Pacheco e Yamanaka (2006), os resíduos sólidos são problemas ambientais graves se não gerenciados de forma adequada, por possuírem organismos patogênicos e serem em sua maior parte putrescíveis.

A **Tabela *10*** expressa as quantidades médias dos principais resíduos produzidos em abatedouros de suínos por animal abatido e suas origens, com destaque para os resíduos sólidos como esterco proveniente das pocilgas, pelos advindos do processo de depilação, materiais não comestíveis e conteúdos estomacais.

Tabela 10 - Quantidades médias dos resíduos produzidos em abatedouros de suínos - média para animal de 90kg de peso vivo

Resíduos (origem)	Quantidade (kg/cab) – suíno 90kg de peso vivo
Esterco (currais/pocilgas)	1,6
Pelos / partículas de couro (depilação)	1,0 / 1,0
Material não-comestível para graxaria (ossos, gordura, cabeça – abate)	18
Conteúdo estomacal e intestinal (bucharia e triparia)	2,7
Sangue (abate)	3,0 litros

Fonte: CETESB (1993); Pacheco e Yamanaka (2006); UNEP, DEPA, COWI (2000).

Além da DBO e DQO dos efluentes de abatedouros suínos, outras características físico-químicas são discutidas por diversos autores. UNEP, DEPA e COWI (2000) discutem o fato de que o nitrogênio presente nos efluentes se dá na forma de amônia, devido a decomposição de proteínas e aminoácidos. Ainda, salientam a variabilidade desses fatores, dependente dos processos utilizados nos abatedouros.

A **Tabela *11*** expressa valores para a composição química média dos efluentes gerados em um abatedouro suíno, evidenciando também a concentração de poluentes nestes resíduos.

Tabela 11 - Composição química e concentração média de poluentes nos efluentes de abatedouros suínos

Elementos / Parâmetros	Unidade	Média
DBO	mg/L	1.250
DQO	mg/L	2.500
Sólidos suspensos	mg/L	700
Nitrogênio total	mg/L	150
Fósforo total	mg/L	25
Óleos e graxas	mg/L	150
pH	-	7,2

Fonte: Pacheco e Yamanaka (2006); UNEP, DEPA e COWI (2000).

2.5 Aproveitamento energético de resíduos provenientes da criação e abate de suínos

O setor agropecuário mostra-se como um dos pilares da economia brasileira, evoluindo sensivelmente ao longo dos últimos anos. De acordo com Coluna (2016),

este setor é representativo também no que diz respeito ao ônus ambiental, devido à poluição dos solos e contaminação da água. Então, o tratamento de resíduos deve ser incluído no processo produtivo, utilizando critérios técnicos para a escolha do nível de tratamento desejado e da melhor tecnologia.

Segundo Barbosa e Langer (2011), a destinação inadequada dos resíduos do setor agropecuário é uma problemática com a qual os agricultores convivem diariamente, pois traz danos ao ambiente e podem acarretar problemas de saúde na população do entorno, além de ocasionar maiores custos administrativos para os produtores, como multas e exigências na esfera ambiental. Por isso, as propriedades rurais estão sendo modernizadas devido a inovações tecnológicas e melhorias na gestão do setor.

As tecnologias mais utilizadas para o aproveitamento dos resíduos agropecuários são: compostagem, tratamento aeróbio e tratamento anaeróbio. A compostagem diz respeito ao processo de decomposição biológica para que a matéria orgânica se torne fertilizante. O tratamento aeróbio é o mais utilizado para o tratamento de dejetos suínos atualmente, sendo dispostos em lagoas sem aproveitamento energético e disposição no solo (COLUNA, 2016; KUNZ et al., 2004).

Tendo apresentado o processo de criação e abate, a composição e caracterização dos resíduos da suinocultura e os impactos ambientais destes, o aproveitamento energético dos resíduos da agroindústria será abordado no próximo item deste trabalho como método de melhorias econômicas, ambientais e sociais. O tratamento anaeróbio, por ser um dos focos do trabalho, será abordado com maiores detalhes a seguir.

2.5.1 Tratamento anaeróbio

O tratamento anaeróbio diz respeito à degradação da matéria orgânica presente nos resíduos, assim como o tratamento aeróbio, porém isento de oxigênio. Devem ser citados os processos de biodigestão e codigestão anaeróbia. Segundo Coluna (2016), os processos anaeróbios superam os aeróbios em termos energéticos pelo fato de que a energia consumida para seu tratamento pode ser recuperada na forma de biogás, podendo apresentar balanço energético favorável.

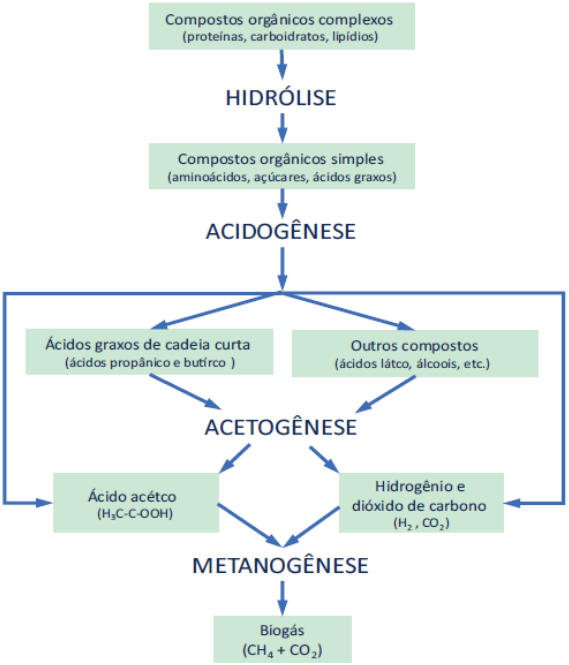
Alguns parâmetros são importantes do ponto de vista da otimização desses processos, como a ausência de oxigênio, a composição do substrato e sua parcela de

matéria orgânica, a temperatura das diferentes fases de biodigestão e o pH do meio no qual será realizada. A biodigestão, ou digestão anaeróbia, ocorre em quatro fases, sendo elas (COELHO et al., 2018):

- Hidrólise: fase na qual as bactérias hidrolíticas liberam enzimas que decompõem a matéria orgânica (em forma de carboidratos, proteínas e lipídios) em aminoácidos, açúcares e ácidos graxos para serem processados;
- Acidogênese: processo no qual as bactérias fermentativas decompõem os compostos obtidos na hidrólise em ácidos graxos voláteis, além de ácidos láticos e álcoois;
- Acetogênese: processo de oxidação dos compostos obtidos na segunda fase, transformando-os em ácido acético, hidrogênio e dióxido de carbono, sendo estes os precursores do biogás;
- Metanogênese: sendo a última fase do processo de biodigestão, é responsável pela produção do principal constituinte do biogás, o metano, por meio da conversão dos produtos obtidos na acetogênese.

A **Figura *9*** apresenta um fluxograma das fases descritas acima, detalhando os compostos obtidos em cada uma delas e sua composição.

Figura 9 - Fases e produtos do processo de digestão anaeróbia



Fonte: Adaptado de Giz (2010).

O biogás resultante desse processo apresenta composição básica de metano (CH_4) e gás carbônico (CO_2), sendo a soma destes dois compostos quase 90% do volume total (USDE, 1996). Segundo Wereko-Brobby e Hagan (1996), outros gases fazem parte do biogás, como nitrogênio, gás sulfídrico, oxigênio, entre outros, mas em menor concentração.

De acordo com Coelho et al. (2018), o processo de codigestão por sua vez consiste na degradação anaeróbia de dois ou mais substratos, que por sua vez reduz alguns fatores passiveis de melhoria da digestão, como o equilíbrio de nutrientes e carga orgânica visando maior biodegradação. Porém, esse processo exige um controle detalhado sobre a relação de insumos diferentes com o intuito de viabilizá-lo, tanto do ponto de vista econômico como do ponto de vista energético.

Segundo o Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC, 2006), o gás metano, sendo este de maior concentração no biogás, possui potencial poluidor 21 vezes maior o de dióxido de carbono, fato este que contribui para o aumento das emissões de gases de efeito estufa (GEE). Este fato evidencia a necessidade de mitigação desses impactos e justifica o aproveitamento energético do biogás, por meio de tecnologias disponíveis, tanto para aproveitamento térmico como geração de energia elétrica.

Para avaliar e quantificar o volume de biogás gerado a partir da digestão dos resíduos orgânicos, faz-se uso do ensaio conhecido como *Biochemical Methane Potential* (BPM) ou Potencial Bioquímico do Metano. Esse experimento avalia a capacidade de biodegradação dos resíduos e/ou efluentes por meio da produção total de metano sob ambientes controlados, com medições constantes de temperaturas e pressões internas e externas, utilizando amostras contendo uma fração do resíduo, meio de cultura e inóculo (SILVA; MORAES JR., ROCHA, 2016).

Segundo Hamilton (2012), o objetivo principal do ensaio BPM é a obtenção da variável quantitativa denominada produção específica do metano, capaz de mensurar o volume total de metano produzido a partir de determinada quantidade de sólidos voláteis reduzidos do substrato analisado. Porém, apesar de sua assertividade, esses testes não se mostram triviais.

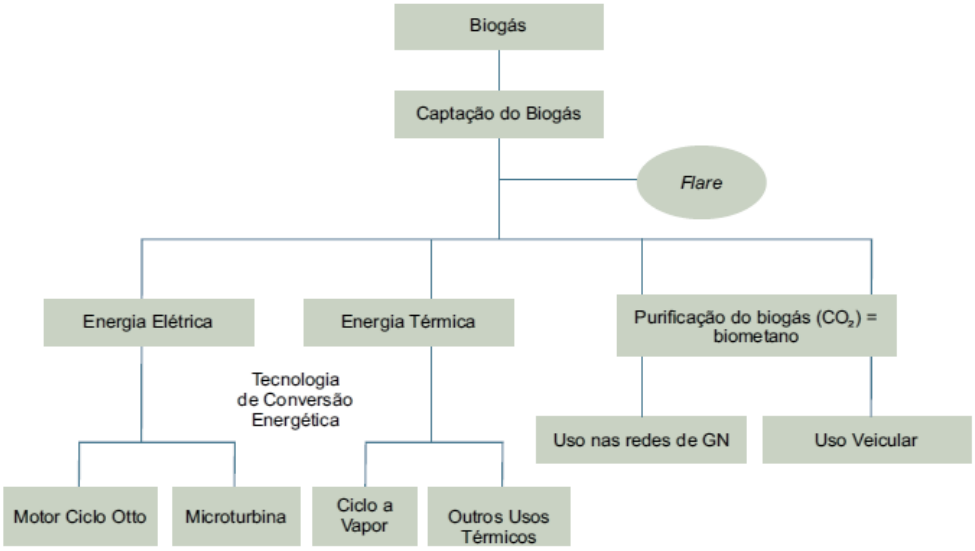
Holliger et al. (2016), embora sejam rotineiramente aplicados para medição da capacidade máxima de produção de metano, os métodos laboratoriais necessitam de maior atenção e padronização. Como consequência, os protocolos utilizados para a determinação dos parâmetros acabam obedecendo a variáveis e condições

diferentes em laboratórios igualmente diferentes. Essas divergências explicam grande parte das oscilações dos valores de capacidade máxima de produção de metano considerando um mesmo substrato, mas em estudos diferentes.

2.5.2 Tecnologias disponíveis para aproveitamento energético

O biogás gerado na decomposição da matéria orgânica de resíduos pode ser aproveitado para a geração de energia térmica, energia elétrica, em sistemas de cogeração (sistemas combinados de calor e eletricidade) e como combustível, por meio do biometano[2] (COELHO et al., 2018). A **Figura *10*** apresenta as tecnologias já utilizadas para aproveitamento do biogás e do biometano.

Figura 10 - Usos finais e tecnologias para aproveitamento energético do biogás e biometano



Fonte: Coelho et. Al (2018) *apud* ICLEI (2009).

Com o intuito de geração de energia elétrica, são utilizados motores de combustão interna Ciclo Otto e microturbinas a gás. O primeiro diz respeito às máquinas térmicas, geralmente motores a gasolina adaptados, responsáveis pela conversão da energia química do combustível em energia mecânica por meio da

[2] Biometano é a expressão designada para a mistura gasosa decorrente do processo de limpeza e purificação do biogás, onde são retiradas impurezas como gás sulfídrico (H_2S), dióxido de carbono (CO_2), umidade, siloxanos (no caso de aterros e estações de tratamento de efluentes), aumentando a fração de metano em >95% e pode ser utilizado como substituto ao Gás Natural (GN) (COELHO et al., 2018)

combustão de ar e combustível em seu interior. Por sua vez, as microturbinas são máquinas térmicas que geram energia elétrica por meio da combustão do biogás segundo o ciclo a ar (COELHO et al., 2018).

Ainda de acordo com Coelho et al. (2018), visando a energia térmica, os sistemas de ciclo a vapor utilizam a energia térmica proveniente da combustão do biogás por meio de caldeiras na geração de vapor d'água. Esse ciclo funciona de acordo com o ciclo Rankine, com equipamentos como caldeira, turbina, condensador e bomba. O vapor resultante da turbina pode alimentar os processos que demandam energia térmica, assim como fornecer energia elétrica, acoplando-a em um gerador elétrico.

Para uso como combustível, o biogás deve ser purificado e torna-se biometano. Este pode ser injetado na rede de gás natural ou utilizado como combustível em veículos movidos a gás, visando a substituição na utilização de combustíveis fósseis.

3. METODOLOGIAS

Este capítulo apresenta as metodologias adotadas para quantificação de dejetos gerados na criação e abate de suínos, para a produção de biogás a partir desses dejetos (para cada um dos casos) e também para o aproveitamento energético deste biogás gerado. Para isso, foi realizada uma coleta de dados e análise de trabalhos e publicações pertinentes.

3.1 Dados e procedimentos de pesquisa

Para o desenvolvimento deste trabalho, uma pesquisa foi realizada levando em consideração as seguintes fontes:

- Teses de doutorado e dissertações de mestrado de instituições nacionais e internacionais relacionadas ao tema;
- Trabalhos e livros desenvolvidos por grupos de pesquisa e associações relacionadas aos temas abordados;
- Artigos publicados em revistas e congressos nacionais e internacionais de reconhecimento científico.

A coleta de dados de número de cabeças de suínos no Brasil foi obtida nas bases de dados da última Pesquisa da Pecuária Municipal desenvolvida pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), sendo o limite espacial os estados do Brasil e trazendo informações compiladas de 2018. Por meio desse estudo, o IBGE levanta informações sobre os rebanhos animais e produtos da pecuária.

A caracterização dos resíduos da suinocultura foi estudada e apresentada, tendo em vista quantificar e detalhar sua composição. Tais dados serão abordados no que diz respeito à quantidade de dejetos gerados, utilizando fatores e cálculos apresentados em metodologias específicas para os suínos brasileiros.

A partir dos dados obtidos, diversas metodologias foram utilizadas para a estimativa do potencial de produção de biogás a partir de dejetos da suinocultura e abate no Brasil e regiões. Feito isso, e devido a divergência de resultados, uma análise de cada metodologia utilizada foi desenvolvida, destacando os fatores principais e suas considerações.

Os resultados do potencial de geração de biogás da suinocultura brasileira foram utilizados em uma análise do aproveitamento energético deste, levando em consideração o potencial térmico e elétrico, definindo os usos finais e sua aplicação.

Por fim, foram avaliados os aspectos ambientais relacionados ao tratamento dos resíduos da criação e abate de suínos, comparando a situação atual do setor com a proposta de aproveitamento energético integral. Ainda, foram citados os aspectos sociais relacionados a produção de biogás e ao aproveitamento energético, apontando os efeitos positivos de sua utilização.

3.2 Metodologia para quantificação de dejetos de criação de suínos e seu aproveitamento energético

3.2.1 Quantificação de dejetos gerados na suinocultura

O dado inicial para análise do potencial de biogás para a suinocultura é o cálculo da quantidade de dejetos gerados. Diversos trabalhos foram realizados com o intuito de apresentar valores médios de dejetos gerados por cabeça de suínos. Uma pesquisa bibliométrica foi realizada a fim de comparar os fatores de produção sugeridos, levando em consideração as diversas variáveis consideradas para cada caso.

A **Tabela *12*** apresenta a média dos valores utilizados para produção de efluentes por diversos autores, classificados por categorias na criação de suínos, considerando a produção de fezes, urina e água do sistema de manejo.

Tabela 12 – Quantidade média de resíduos produzidos por suíno por categoria de criação

Categoria	Efluente (L/animal/dia)	Esterco (kg/animal/dia)
Varrão	9	3
Porca em gestação	16	3,60
Porca com leitão	27	6,40
Leitões desmamados	1,4	0,35
Suínos em crescimento e terminação	7	2,30

Fonte: Cibiogás (2009); Kunz, Higarashi e Oliveira (2005); Mito et al. (2018); Oliveira (1993); Datora, Perdomo e Tumelero (1998) e Gusmão (2008).

Os valores apresentados para os efluentes consideram situações nas quais ocorrem o controle de água, salientando os baixos níveis de obtenção de efluentes. Dito isso, o consumo de água é variável importante e pode divergir entre regiões e/ou instalações.

Partindo do conceito de ciclos de produção, foi realizada uma pesquisa bibliométrica acerca dos valores de efluentes gerados diariamente por suínos, apresentada na **Tabela *13***. Esses dados foram coletados de cada um dos estudos, mantendo suas análises e considerações originais, assim como os valores de efluentes apresentados, sendo dejetos, urina e outros resíduos aquosos.

Tabela 13 - Quantidade de efluentes produzidos por suíno classificados por ciclos de produção

Ciclos de Produção	Efluentes (L/animal/dia)	Fonte
Unidade Produtora de Leitões (UPL)	21,5	FEPAM (2014)
	31,2 - 39	Miranda (2009)
	45	Dartora, Perdomo e Tumelero (1998); Oliveira (2003); Oliveira (2005)
	47	Angonese et al. (2005); Campos et al. (2004)
	54	Mito et al. (2018)
	60	Dias et al. (2011)
	72	Souza et al. (2004)
	90	Brondani (2010); Oliveira (2003); Perdomo et al. (1999)
Crecheiros	1,2	Scherer, Aita e Baldissera (1996)
	1,4	Cibiogás (2009); Oliveira (1993)
	1,57	Tavares (2016)
Unidade de Crescimento e Terminação (UCT)	4,45	Tavares (2016)
	4,9 – 8,5	Scherer, Aita e Baldissera (1996)
	5,7 – 7,5	Angonese et al. (2005)
	5,88	ASAE (2003); Scheneider et al. (2012)
	6,03	Kunz, Higarashi e Oliveira (2005)
	7	Konzen (1983); Oliveira (2003, 1993)
	8	Motta (2014)
	8,6	Lucas Junior (2004)
	9	Dartora, Perdomo e Tumelero (1998)
	10,28	Mito et al. (2018)
	11,2	Perdomo et al. (1999)
	12 - 15	Konzen (2000); Menezes et al. (2004); Oliveira (1993)
Ciclo Completo (CC)	15	Gusmão (2008)
	57	FEPAM (2014)
	85	Brondani (2010); Dartora, Perdomo e Tumelero (1998); Oliveira (2003, 1993)
	90,88	Mito et al. (2018)
	100	Dias et al. (2011)
	140 - 150	Konzen (2000); Menezes et al. (2004)
	150	Perdomo et al. (1999)

Fonte: Elaboração própria.

Os resultados apresentados indicam uma grande variabilidade na produção média de dejetos suínos por ciclos de produção. Uma maior variação entre os resultados obtidos por diferentes autores ocorre nas Unidades Produtora de Leitões e naquelas de Ciclo Completo.

Nos crecheiros, onde ficam os leitões desmamados, ocorre pequena produção diária de dejetos, dentro de um intervalo pequeno de variação. Seguidos pelas Unidades de Crescimento e Terminação (UCT), que também sustentam valores relativamente baixos para geração de dejetos suínos.

Nas UPLs e CCs, a grande variação de resultados deve-se às particularidades de cada estudo de caso ou análise. A principal delas, além da mudança territorial, deve-se à diversificação na alimentação dos animais.

O cálculo do número de dejetos gerados na suinocultura leva em consideração a quantidade produzida de dejetos por animal e o número de cabeças de suínos, como demonstrado na equação (1), utilizada por Kunz e Oliveira (2006) e CIBIOGÁS (2009).

$$Q_{dej} = N \text{ x } V_{dej} \qquad \text{(Eq. 1)}$$

Em que:

Q_{dej} = volume de dejetos produzidos por dia (m^3/dia)

N = número de cabeças

V_{dej} = volume de dejetos gerados por animal por dia (m^3/dia)

3.2.2 Produção de biogás a partir dos dejetos suínos

A partir da determinação dos valores obtidos para o volume de dejetos gerados na suinocultura brasileira, foi possível estabelecer as relações e equações necessárias para determinação do potencial de produção de biogás. A escolha das metodologias foi realizada com base no número de citações em trabalhos e validações destas com experimentos laboratoriais.

a. Metodologia de Chen (1983)

O trabalho e análise da produção de metano propostos por Chen (1983) levam em consideração as reações presentes nos reatores anaeróbios e a composição química dos resíduos animais. Nela, o autor realiza uma análise cinética das reações para produção de metano, utilizando coeficientes cinéticos e tempo de retenção hidráulica.

As equações (2), (3), (4) e (5) apresentam o cálculo da produtividade de metano, da velocidade de crescimento específico de microrganismos, do coeficiente cinético e da produção diária de metano para resíduos animais, respectivamente.

$$\Upsilon_v = \frac{B_0 \text{ x } SV}{trh} \text{ x } \left(1 - \frac{K}{trh \text{ x } \mu_m - 1 + K}\right) \quad \text{(Eq. 2)}$$

Em que:

Υ_v = produtividade de metano por biodigestor por dia (m^3_{CH4}/m^3_{bio}/dia)

B_0 = produtividade de metano do resíduo (m^3_{CH4}/kg_{SV})

SV = concentração de sólidos voláteis do resíduo (g/L)

tdh = tempo de detenção hidráulica (dias)

K = coeficiente cinético

μ_m = velocidade máxima de crescimento específico de microrganismos (1/dia)

$$\mu_m = 0{,}013 \text{ x } T - 0{,}129 \quad \text{(Eq. 3)}$$

Em que:

T = Temperatura de digestão (°C)

$$K = 0{,}6 + 0{,}0006\, e^{(0{,}1185 \text{ x } SV_{T0})} \quad \text{(Eq. 4)}$$

Em que:

SV_{T0} = constante de baixa concentração de sólidos voláteis (0,6)

$$Q_{CH4} = \Upsilon_V \text{ x } V_{bio} \quad \text{(Eq. 5)}$$

Em que:

Q_{CH4} = produção diária de metano (m^3/dia)

V_{bio} = volume do biodigestor (m^3)

b. Metodologia de Kunz e Oliveira (2006)

Kunz e Oliveira (2006) estabeleceram uma metodologia tendo como base a concentração de sólidos voláteis (SV), o volume total de dejetos produzidos diariamente pelos suínos e sua capacidade máxima teórica de produção de metano.

A equação (6) diz respeito ao cálculo da produção de dejetos suínos ao dia, ao passo que a equação (7) apresenta a produção diária de metano para a suinocultura.

$$Q_{dej} = N \text{ x } V_{dej} \qquad \text{(Eq. 6)}$$

Em que:

Q_{dej} = volume de dejetos produzidos por dia (m^3/dia)

N = número de cabeças

V_{dej} = volume de dejetos gerados por animal por dia (m^3/dia)

$$Q_{CH4} = B_0 \text{ x } SV \text{ x } Q_{dej} \qquad \text{(Eq. 7)}$$

Em que:

Q_{CH4} = quantidade de metano produzida por dia (m^3/dia)

B_0 = capacidade máxima teórica de produção de metano (m^3_{CH4}/kg_{SV})

SV = concentração de sólidos voláteis (g_{SV} /L)

c. Metodologia de IPCC (2006)

O *Intergovermental Panel on Climate Change* (IPCC, 2006), por meio do trabalho *2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*, disponibilizou metodologias para determinar as emissões de gases de diversas culturas. O Volume 4, denominado *Agriculture, Forestry and Other Land Use*, apresenta um capítulo para o cálculo das emissões da pecuária e gestão de estrume, dividindo as análises em três níveis.

O nível 1 consiste num método mais simples, nos quais os dados de entrada são a população animal, região climática e temperatura aliados aos fatores de

emissão padrões estabelecidos. O segundo nível é mais complexo e estima as emissões de metano a partir do manejo, considerando informações com maior riqueza de detalhes quanto à característica dos animais e disposições dos dejetos. O nível 3 é mais complexo e é utilizado para desenvolver metodologias específicas para cada país (IPCC, 2006).

Para o desenvolvimento deste trabalho, foi utilizado o equacionamento referente ao nível 2. Ainda, vale ressaltar que essa metodologia está sendo adaptada para o cálculo de biogás, visto que ela é utilizada para obtenção de emissões de metano.

A equação (8) apresenta o cálculo do fator de emissão de metano específico do sistema analisado, refletindo a capacidade de produção de metano do dejeto, levando em consideração os sólidos voláteis e fatores adimensionais do sistema de manejo dos dejetos. Utilizando esse fator, é possível calcular a emissão de metano do sistema (equação 9), considerando o número de animais estudados. Além disso, o teor de sólidos voláteis (SV), a capacidade máxima teórica de produção de metano (B_0), o fator de conversão dependente do tipo de manejo (FCM) e o fator do sistema de manejo (SM) são estipulados de acordo com o autor e apresentados a seguir.

$$FE = (SV \text{ x } 365) \text{ x } \left[B_0 \text{ x } 0{,}67 \text{ x } \sum \frac{FCM}{100} \text{ x } SM\right] \qquad \text{(Eq. 8)}$$

Em que:

FE = fator de emissão de metano por categoria (kg_{CH4}/cab/ano)

SV = teor de sólidos voláteis (kg/cab/dia) = 0,3

365 = base para cálculo de produção anual (dia/ano)

B_0 = capacidade máxima teórica de produção de metano (m^3_{CH4}/kg_{SV}) = 0,29

0,67 = fator de conversão de m³ de metano para kg de metano

FCM = fator de conversão dependente do tipo de manejo (%) = 0,79

SM = fator do sistema de manejos dos resíduos = 1

$$Q_{CH4} = \sum \frac{FE \text{ x } N}{10^6} \qquad \text{(Eq. 9)}$$

Em que:

Q_{CH4} = quantidade de metano produzida por dia (Gg/ano)

N = número de cabeças de animais da categoria analisada

d. Metodologia de CIBIOGÁS (2009)

O Centro Internacional de Energias Renováveis (CIBIOGÁS, 2009) elaborou uma metodologia para estimar o potencial de biogás tendo como base os parâmetros e metodologia apresentada pelo *Intergovermental Panel on Climate Change* (IPCC, 2006). É importante ressaltar que, além dos parâmetros considerados pela metodologia já apresentada, esta leva em consideração dados referentes ao peso médio e real dos animais e a fração anual de permanência.

A equação (10) apresenta o cálculo da produção diária de dejetos para cada categoria estudada na suinocultura, levando em consideração a produção específica por cabeça e o número de animais. Já a equação (11), refere-se ao cálculo da produção diária de biogás, considerando os pesos médios e padrões, a fração diária de confinamento, além de fatores como sólidos voláteis, de conversão de metano para a linha base do sistema e de correção de incertezas.

$$Q_{dej} = \sum(N \text{ x } PE) \qquad \text{(Eq. 10)}$$

Em que:

Q_{dej} = produção diária de dejetos suínos por categoria (m³/dia)

N = número de cabeças de suínos por categoria

PE = produção específica de dejetos por cabeça por categoria (m³/cab/dia)

$$Q_{biogás} = N \text{ x } \left(\frac{P_m}{P_p}\right) \text{ x } FDC \text{ x } SV \text{ x } \left(\frac{FCM \text{ x } B_0 \text{ x } f_b}{\%CH_4}\right) \qquad \text{(Eq. 11)}$$

Em que:

$Q_{biogás}$ = produção diária de biogás (m³/dia)

N = número de cabeças de suíno

P_m = peso médio (kg)

P_p = peso padrão (kg)

FDC = fração diária de confinamento (entre 0 e 1)

SV = sólidos voláteis (kg/cab/ano) = 0,3

FCM = fator de conversão de metano = 0,78

B_0 = capacidade de produção de metano (m^3_{CH4}/ kg_{SV}) = 0,29

f_b = fator de correção de incertezas = 0,94

$\%CH_4$ = porcentagem de metano no biogás (%) = 60

e. Metodologia de Coelho et al. (2012)

A metodologia apresentada no Atlas de Bioenergia do Brasil (COELHO et al., 2012) tem como base a fórmula utilizada no Manual do Usuário do Programa de Computador – Biogás – Geração e Uso Energético versão 1.0, publicado pela Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental (CETESB, 2006). De acordo com esse estudo, a produção de biogás é dependente da quantidade de metano gerada pela decomposição do esterco dos animais, por sua vez gerado diariamente nas propriedades criadoras de suínos.

A equação (12) mostra o cálculo do potencial de geração de metano dependente da produção de esterco total, da produção de biogás pelo resíduo estudado, a concentração de metano no biogás e massa específica do metano.

$$Q_{metano} = \frac{N \text{ x } E_t \text{ x } P_b \text{ x } \%CH_4}{ME} \qquad \text{(Eq. 12)}$$

Em que:

Q_{metano} = produção diária de metano (m^3/dia)

N = número de cabeças de suínos

E_t = produção de esterco por dia ($kg_{esterco}$/dia/cab) = 2,25

P_b = produção de biogás do dejeto estudado ($kg_{biogás}/kg_{esterco}$) = 0,062

$\%CH_4$ = concentração de metano no biogás (%) = 66

ME = massa específica do metano (kgCH4/m^3_{CH4}) = 0,670

3.3 Metodologia para a quantificação de resíduos do abate de suínos e seu aproveitamento energético

3.3.1 Quantificação de resíduos gerados no abate de suínos

Os dados necessários para a caracterização e quantificação dos resíduos gerados nas indústrias de abate de suínos foram obtidos de trabalhos teóricos e práticos nacionais e internacionais. Este trabalho levou em consideração as características das indústrias de abate brasileiras, para que sua aplicabilidade seja assertiva para o caso nacional.

Devido à alta carga orgânica e grandes quantidades de água, os resíduos estudados foram tratados como industriais, possibilitando os equacionamentos apresentados a seguir para estimar a produção de biogás a partir de resíduos de abatedouros suínos. Os índices apresentados são particulares ao caso dos abatedouros de suínos, levando em conta suas particularidades e resíduos característicos presentes em cada estudo.

Devido à escassez de trabalhos que considerem na composição química dos resíduos todos aqueles gerados no processo de abate, foram considerados os valores apresentados na **Tabela *14***. Os parâmetros apresentados seguem as analises realizadas em cada um dos estudos, tanto teóricos como práticos. Além disso, deve-se atentar para a variabilidade decorrente dos ensaios para obtenção de cada um deles, seguindo variações de clima, resíduos e características laboratoriais.

Tabela 14 - Composição química dos resíduos de abatedouros suínos

Elementos / Parâmetros	Valores médios (mg/L)	Fonte
DBO	892	Kazmierczak et al. (2016)
	1.040	Krieger (2007)
	1150	Zadinelo et al. (2013)
	1.250	UNEP, DEPA e COWI (2000)
	1.800	CETESB (1993); Pacheco e Yamanaka (2006)
DQO	1.613	Kazmierczak et al. (2016)
	2.285	Zadinelo et al. (2013)
	2.500	Pacheco e Yamanaka (2006); UNEP, DEPA e COWI (2000)
	2.526	Krieger (2007)
	4.730	Orssatto (2017)
Sólidos suspensos	34	Tavares e Christmann (2013)
	39	Krieger (2007)
	300	Kazmierczak et al. (2016)
	700	Pacheco e Yamanaka (2006); UNEP, DEPA e COWI (2000).
Nitrogênio total	47,2	Romaniw et al. (2014)
	150	Pacheco e Yamanaka (2006); UNEP, DEPA e COWI (2000)
	164	Kazmierczak et al. (2016)
	186	Krieger (2007)
	289,8	Orssatto (2017)
pH	6,2	Zadinelo et al. (2013)
	6,46	Orssatto (2017)
	7,06	Krieger (2007)
	7,2	Pacheco e Yamanaka (2006); UNEP, DEPA e COWI (2000).
	7,86	Kazmierczak et al. (2016)

Fonte: Elaboração própria.

3.3.2 Produção de biogás a partir dos resíduos de abate de suínos

Considerando a composição química estabelecida para os resíduos industriais do abate de suínos, foram utilizadas metodologias específicas para obtenção do potencial de biogás presente nestes, considerando os materiais residuais e suas características. Algumas metodologias utilizadas foram retiradas de trabalhos acerca de processos industriais similares, como abatedouros de bovinos e aves.

a. Metodologia de IPCC (2006)

Para resíduos agroindustriais, como os resíduos do abate de suínos, foi utilizado o equacionamento para a obtenção de emissões de metano anuais apresentados na equação (15). As emissões calculadas são dependentes do total de material orgânico degradável em efluentes industriais (equação 13) e do fator de emissão do setor industrial (equação 14), que por sua vez tem a função de estabelecer uma correção aos níveis do material orgânico degradável apresentados, deixando evidente que nem toda DQO é degradável.

$$TOW = W \text{ x } DQO \qquad \text{(Eq. 13)}$$

Em que:

TOW = total de material orgânico degradável em efluentes industriais ao ano (kg_{DQO}/ano)

W = Efluentes gerados (m^3/ano)

DQO = Demanda Química de Oxigênio (kg/m^3)

$$EF = B_0 \text{ x } MCF \qquad \text{(Eq. 14)}$$

Em que:

EF = fator de emissão de CH_4 para cada tratamento (kg_{CH4}/kg_{DQO})

B_0 = capacidade máxima de produção de metano (kg_{CH4}/kg_{DQO}) = 0,25

MCF[3] = fator de correção de metano = 0,8

$$Q_{CH4} = \sum_i [(TOW_i - S_i)\, EF_i - R_i] \qquad \text{(Eq. 15)}$$

Em que:

Q_{CH4} = emissão de metano por ano (kg/ano)

TOW_i = material orgânico degradável em efluentes industriais (kg_{DQO}/ano)

[3] O Fator de Correção de Metano (MCF) reflete e ajusta a capacidade máxima de produção de metano do resíduo. Ele varia conforme o manejo e o clima, variando de 0 a 1, levando em consideração a temperatura e o tempo de detenção. Onde o resíduo está sob condições quentes por longos períodos, esse fator pode ser de 0,65 a 0,8 (IPCC, 2006).

S_i = componente orgânico removido como lodo no ano (kg_{DQO}/ano)

R_i = montante de metano recuperado no ano (kg_{CH4}/ ano)

b. Metodologia de CETESB (2006)

Os resíduos de abatedouros são caracterizados como resíduos da agroindústria de proteína animal. Segundo a Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental (CETESB), divulgada no Manual do Usuário do Programa de Computador – Biogás – Geração e Uso Energético versão 1.0 (CETESB, 2006), a equação (17) é utilizada para o cálculo da quantidade de metano produzido, utilizando valores para o potencial de geração de metano a partir da DBO, densidade do metano e vazão do efluente.

Por ser fator determinante para o cálculo, a equação (16) apresenta o cálculo da vazão de efluentes dos abatedouros, considerando fatores para o consumo de água e número de cabeças abatida.

$$\varphi_{eflu} = \frac{C_{água}\ x\ N_{cabeças}}{24\ x\ 1000} \qquad \text{(Eq. 16)}$$

Em que:

φ_{eflu} = vazão de efluentes dos resíduos de abatedouros (m^3/dia)

$C_{água}$ = Consumo de água para abate de um animal (1.200 L/cabeça abatida)

$N_{cabeças}$ = número de cabeças abatidas

$$Q_{CH4} = \frac{\varphi_{efl}\ \text{x}\ DBO_{eflu}\ \text{x}\ \eta\ \text{x}\ 0{,}25}{0{,}72} \qquad \text{(Eq. 17)}$$

Em que:

Q_{CH4} = emissão de metano (kg/dia)

DBO_{eflu} = Demanda Bioquímica de Oxigênio do efluente

η = eficiência de remoção (0,8 = 80%)

0,25 = Potencial de geração de metano (kg_{metano} / $kg_{DBO\ removida}$)

0,72 = densidade do metano (kg_{metano} / m^3_{metano})

c. Metodologia de Coelho et al. (2020)

Retirada do Atlas de Bioenergia do Estado de São Paulo (COELHO et al., 2020), a equação (18) apresenta que o cálculo do potencial de geração de biogás de efluentes gerados em abate é baseado nos valores estabelecidos de DQO da matéria orgânica. Essa metodologia considera que toda a DQO removida é convertida em metano e essa obtenção se faz possível por meio de reatores UASB, com eficiência de 80%.

$$V_{biogás} = V_{efl} \text{ x } DQO \ x \ \eta \ x \ F \qquad \text{(Eq. 18)}$$

Em que:

$V_{biogás}$ = Volume de biogás (Nm³)

V_{efl} = Volume de efluente (m³)

DQO = Demanda Química de Oxigênio (kg/m³)

F = fator de produção de biogás = 0,35 Nm³/kg de DQO removida

3.4 Metodologia para aproveitamento energético do biogás de dejetos suínos e resíduos de abatedouros

3.4.1 Aproveitamento do biogás para geração de Energia Elétrica

Para a estimativa do potencial de geração de energia elétrica utilizando o biogás gerado foi considerado a queima deste em um motor de combustão ciclo Otto, metodologia utilizada no Atlas de Bioenergia do Estado de São Paulo (COELHO et al., 2020). Utilizando-se dessa premissa, foi calculada a potência disponível de geração de energia elétrica por meio da equação (19).

$$EE = \frac{(V_{biogás} \times Con._{CH4} \times PCI_{CH4} \times Ef._{ele})}{1000} \qquad \text{(Eq. 19)}$$

Em que:

EE = Potencial de geração de energia elétrica por ano (MWh/ano)

$V_{biogás}$ = Volume de biogás (Nm³ biogás /ano)

$Con._{CH4}$ = Concentração de metano presente no biogás (%)

PCI_{CH4} = Poder Calorífico Inferior do metano (kWh/Nm³CH_4) = 9,97

$Ef._{ele}$ = Eficiência de conversão energética para motor ciclo Otto a biogás = 0,35 para vazões de biogás de até 5.000 Nm³/dia e 0,42 para vazões acima de 5.000 Nm³/dia

1000 = conversão de kWh para MWh

3.4.2 Conversão do biogás em biometano

Para a utilização do biogás como combustível veicular ou injeção na rede de gás natural, faz-se necessário sua conversão para biometano. Portanto, para o cálculo do volume de biometano, foi utilizada a equação (20) proposta por Coelho et al. (2020) no Atlas de Bioenergia do Estado de São Paulo.

$$V_{biom} = \frac{V_{biogás}\ X\ (Con._{CH4})}{\%\ CH_{4\ biometano}} \qquad \text{(Eq. 20)}$$

Em que:

V_{bioM} = Volume de biometano (Nm^3 biometano/ano)

$V_{biogás}$ = Volume de biogás (Nm^3 biogás/ano)

Con. CH_4 = % de metano no biogás = 60%

% $CH_{4\ biometano}$ = % de metano no biometano (= 97%)

Para o cálculo do volume de biomentano, o valor médio de purificação considerado foi 97%, representando as perdas de metano somados às impurezas residuais, atendendo às especificações da Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP) seguindo a resolução ANP 685/2017.

4. ANÁLISE DAS METODOLOGIAS PARA O POTENCIAL DE PRODUÇÃO DE BIOGÁS NA CRIAÇÃO E ABATE DE SUÍNOS NO BRASIL

Esse capítulo apresenta a análise realizada acerca das metodologias utilizadas na determinação do potencial de produção de biogás tanto na criação como no abate de suínos no Brasil. Está dividido em quatro tópicos, abordando a geração de resíduos e a produção de biogás na criação e no abate de suínos.

Os resultados obtidos por meio das metodologias de quantificação de resíduos e produção de biogás foram baseados na produção unitária, ou seja, de um único animal e também na produção regional e nacional. A análise unitária se fez necessária para avaliação dos indicadores e parâmetros das metodologias, enquanto a análise da produção regional e nacional foi feita para comparar as metodologias e estabelecer uma faixa de geração de biogás para a criação e abate de suínos. Além disso, fez-se necessário a conversão de alguns fatores para adaptá-los às metodologias utilizadas.

Para a obtenção dos indicadores unitários foi considerada a produção de resíduos por um único animal, aplicando essa premissa às equações apresentadas. Já para a produção de resíduos e biogás a nível nacional, utilizou-se a base de número de rebanhos em 2018, disponibilizada pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2018).

Sendo assim, a **Tabela *15*** apresenta a quantidade efetiva do rebanho de suínos no Brasil e regiões no ano de 2018 como sendo o mais atualizado até a confecção deste trabalho. Durante essa avaliação, a categoria do animal não foi identificada, sendo apenas analisado o rebanho como um todo.

Tabela 15 - Número efetivo de rebanho de suínos em 2018

País / Grandes Regiões	**Rebanho de Suínos – total (nº de cabeças)**
Brasil	41.443.594
Norte	1.563.123
Nordeste	5.740.314
Sudeste	7.006.826
Sul	20.594.238
Centro-Oeste	6.539.093

Fonte: Pesquisa Pecuária Municipal (IBGE 2018).

O Brasil detinha um rebanho efetivo de mais de 41 milhões de suínos em 2018 em todo o seu território. A região Sul do país possui participação importante neste setor, possuindo cerca de 50% do rebanho de suínos do país, seguido pela região Sudeste que representava 17% do total, a região Centro-Oeste com 16%, Nordeste com 14% e por último a região Norte com 4%.

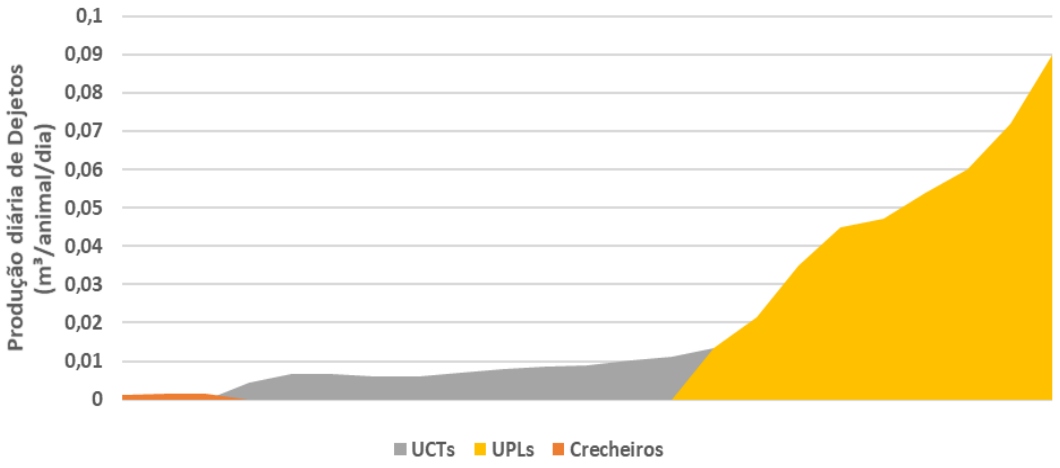
Estes dados foram utilizados tanto para a criação como para o abate de suínos, aplicando-os nas metodologias de ambas as análises.

4.1 Geração de resíduos na criação de suínos

A metodologia para obtenção da geração de resíduos na criação de suínos leva em consideração o número de cabeças de animais e a produção diária de dejetos. Diversos trabalhos teóricos utilizam os números estabelecidos por Oliveira (1993) no Manual de Manejo e Utilização de Dejetos Suínos, presentes na ***Tabela 12***. Porém, a maior parcela de trabalhos estudados, obteve seus dados por meio de estudos práticos *in loco*, resultando em números com maior variabilidade.

Há uma diferença considerável entre a produção de dejetos e efluentes suínos nos ciclos de produção estudados, tendo em vista que algumas categorias possuem apenas leitões recém-nascidos (crecheiros) enquanto outras possuem os animais durante toda sua vida. Por isso, a **Figura *11*** ilustra a faixa de produção unitária diária de dejetos de suínos, considerando esterco e urina, segundo dados obtidos na **Tabela *13***.

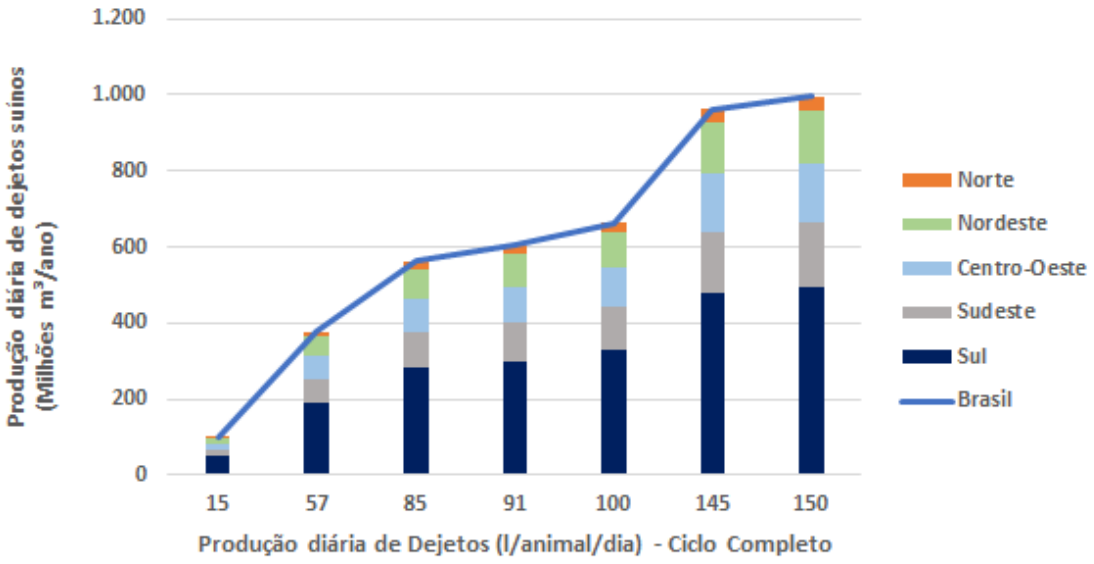
Figura 11 - Produção unitária diária de efluentes (dejetos e urina) de suínos por ciclo de produção



Fonte: Elaboração própria.

Admitindo a não distinção de categorias dos animais e levando em consideração as análises de diferentes autores, foi estabelecido que a produção diária de dejetos considera a criação em Ciclo Completo, ou seja, que toda a criação de suínos no Brasil acompanha esse método de criação. Sendo assim, segue na **Figura *12*** o gráfico contendo o intervalo de produção de dejetos totais de suínos no Brasil e regiões em 2018.

Figura 12 - Produção de dejetos totais de suínos (esterco + urina) no Brasil e regiões em 2018



Fonte: Elaboração própria.

Os dados utilizados como referência para a produção diária de dejetos foram adaptados para a unidade de milhões de metros cúbicos por ano, considerando o ciclo de vida dos suínos de 160 dias (MITO et al., 2018). Os valores apresentam uma ampla faixa de produção de resíduos totais, levando em consideração cada uma das particularidades abordadas em cada estudo. A região Sul, sendo a mais representativa, possui produção que varia de 49 milhões a 494 milhões de m³ por dia. O Brasil, em sua totalidade, apresenta variabilidade de 424 mil a 4,3 milhões de toneladas por dia.

Para determinação da quantidade de esterco produzida, foi utilizada a média da produção de esterco diária por categorias apresentada anteriormente na **Tabela *12***. Dentre as referências, três delas (KUNZ; OLIVEIRA, 2006; CIBIOGÁS, 2009; COELHO et al., 2020) levam em consideração a produção de dejetos totais nos

cálculos. Os valores pré-estabelecidos pelas metodologias foram mantidos, para que não ocorram erros de cálculos e mudanças significativas nas análises.

4.2 Potencial de produção do biogás na suinocultura

As metodologias utilizadas para estimar o potencial de biogás na suinocultura foram estudadas separadamente a fim de encontrar similaridades e diferenças entre elas no processo de obtenção dos valores para o Brasil e regiões. Para contextualizar, a **Tabela *16*** mostra as variáveis utilizadas nos cálculos das metodologias, obedecendo os parâmetros pré-estabelecidos por cada uma delas.

Tabela 16 - Parâmetros e variáveis aplicados às metodologias para potencial de biogás na criação de suínos

Parâmetros/Variáveis		Chen (1983)	Kunz e Oliveira (2006)	IPCC (2006)	CIBIOGÁS (2009**)**	Coelho et al. (2012)
Produtividade de metano no resíduo (m^3_{CH4}/kg_{SV})	$\mathbf{B_0}$	0,50	0,45	0,29	0,29	-
Concentração de Sólidos Voláteis (kg_{SV}/dia)	**SV**	31,50	18,80	30	30	-
Produção de esterco por dia (kg/dia)	$\mathbf{E_t}$	-	4,46	-	-	2,25
Tempo de Detenção Hidráulica (dias)	**tdh**	30	-	-	-	-
Temperatura de Digestão (°C)	**T**	35	-	-	-	-
Fator de Conversão do Manejo (%)	**FCM**	-	-	79	78	-
Fator do Sistema de Manejo	**SM**	-	-	1	-	-
Fração Diária de Confinamento	**FDC**	-	-	-	1	-
Fator de correção de incertezas	$\mathbf{f_b}$	-	-	-	0,94	-
Porcentagem de metano no biogás (%)	$\mathbf{\%CH_4}$	60	60	60	60	66
Produção de biogás do dejeto ($kg_{biogás}/kd_{dejeto}$)	$\mathbf{P_t}$	-	-	-	-	0,062
Massa específica do metano (kg/m³)	**ME**	0,67	0,67	0,67	0,67	0,67

Fonte: Elaboração própria.

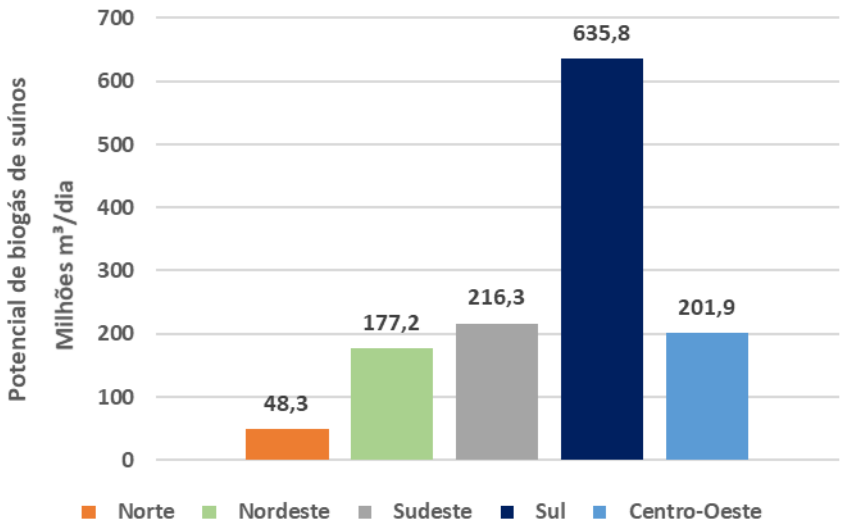
Em algumas metodologias, os parâmetros apresentam valores semelhantes entre eles. A produtividade de metano no resíduo é um desses parâmetros, na qual sua variabilidade ocorre entre 0,29 – 0,5 m^3_{CH4}/kg_{SV}. Esses valores influenciam diretamente nos resultados obtidos. A diferença na concentração de sólidos voláteis entre a metodologia de Kunz e Oliveira (2006) e as demais é expressiva, devido as particularidades de seu experimento.

Os valores de produção de esterco por dia não consideram os efluentes em sua totalidade (urina e água de higienização) e também influenciam diretamente na obtenção do biogás na criação. Os demais parâmetros são particulares de cada metodologia ao passo que a massa específica do metano é padronizada para todas (0,67 kg/m³).

A metodologia de Chen (1983) aborda aspectos relacionados ao processo de digestão anaeróbia. Nas variáveis estudadas, foram utilizados parâmetros estabelecidos pelo autor como tempo de retenção hidráulica de 30 dias, a temperatura usual de digestão e o volume do biodigestor a ser ocupado, sendo este último uma obedecendo relação de 0,8. Com essa metodologia foram obtidos os maiores valores de produção de biogás a partir da criação de suínos neste trabalho.

Utilizando essa metodologia, aplicando-a aos dados obtidos do rebanho brasileiro e das regiões, a **Figura *13*** apresenta os valores estimados para a produção de biogás na etapa de criação de suínos.

Figura 13 - Potencial de geração de biogás na criação de suínos no Brasil em 2018 - Metodologia de Chen (1983)



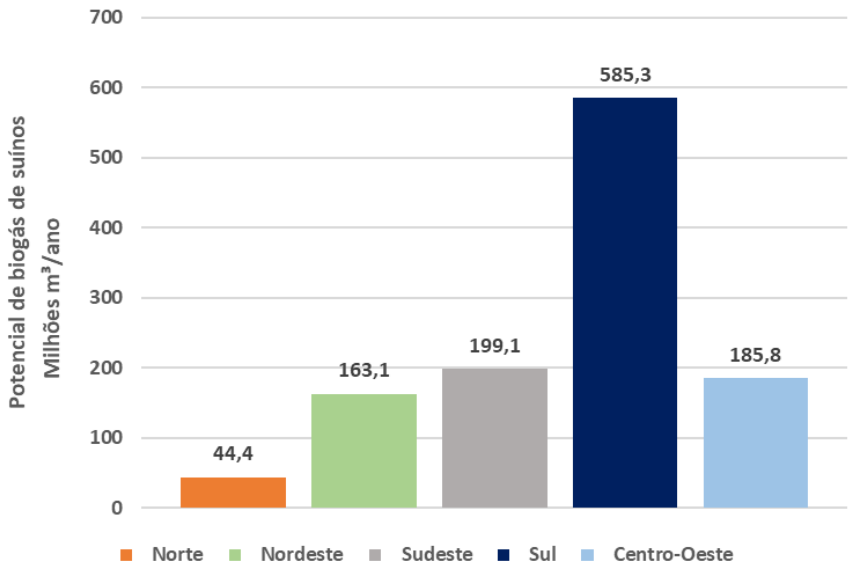
Fonte: Elaboração própria.

A região Sul apresenta um potencial de quase 636 milhões de m³/ano de biogás a partir de resíduos da criação suína. Esses números são expressivos e equivalem a cerca de 30% de toda a produção nacional. A região Sudeste está em segundo lugar, seguido pela região Centro-Oeste, Nordeste e Norte, respectivamente. No território nacional, resultante da soma das regiões do país, a produção de biogás pela metodologia de Chen (1983).

Na metodologia de Kunz e Oliveira (2006), os cálculos baseiam-se nos parâmetros e características relacionados ao próprio resíduo, como a produção diária de dejetos, a produtividade de metano no resíduo e a concentração de sólidos voláteis. Esses valores foram pré-estabelecidos pelo autor e estão presentes na **Tabela *16***. O autor considera valores de 4,46 kg de esterco por dia por animal, sendo este o dobro do valor utilizado por Coelho et al. (2012), ao passo que a concentração de sólidos voláteis é consideravelmente baixa quando comparada às outras metodologias, realizando assim uma compensação dos valores. Sendo assim, os valores obtidos se aproximam das demais metodologias estudadas.

Então, segue na **Figura *14*** o gráfico contendo a produção de biogás em 2018 para as regiões do Brasil, segundo a metodologia de Kunz e Oliveira (2006).

Figura 14 - Potencial de geração de biogás na criação de suínos no Brasil em 2018 - Metodologia de Kunz e Oliveira (2006)



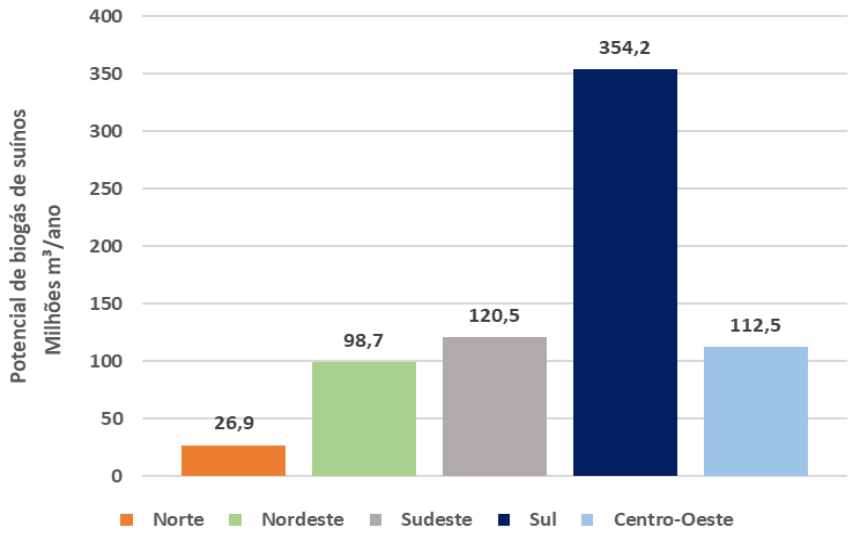
Fonte: Elaboração própria.

Abordando este caso, a região Sul seria detentora de um potencial de 585,3 milhões de m³/ano de biogás, redução de cerca de 8% do valor obtido na metodologia de Chen (1983). Porém, essa metodologia torna-se mais refinada para este caso pelo fato de considerar um volume de dejetos diários em seus cálculos. Os valores obtidos também são diretamente proporcionais à produtividade de metano do dejeto e a concentração de sólidos voláteis.

A metodologia proposta pelo *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC, 2006) busca resultados baseados na configuração e particularidades do tipo de manejo, levando em consideração fatores de conversão e de emissão de metano por população ou categoria estudada. Os parâmetros utilizados nas equações apresentam valores médios tabelados estabelecidos pelos autores.

Portanto, a **Figura *15*** simula a produção de biogás para os resíduos de criação de suínos segundo a metodologia apresentada pelo IPCC (2006). Os valores são apresentados para cada região do Brasil, assim como nas outras metodologias abordadas até o momento.

Figura 15 - Potencial de geração de biogás na criação de suínos no Brasil em 2018 - Metodologia de IPCC (2006)



Fonte: Elaboração própria.

Essa análise utiliza um valor de produtividade de metano no resíduo menor quando comparado às metodologias até então apresentadas (0,29 m^3_{CH4}/kg_{SV}), sendo então mais conservadora. Porém, a concentração de sólidos voláteis equipara-se àquela utilizada por Chen (1983), cerca de 30 g/L. O Fator de Conversão do tipo de

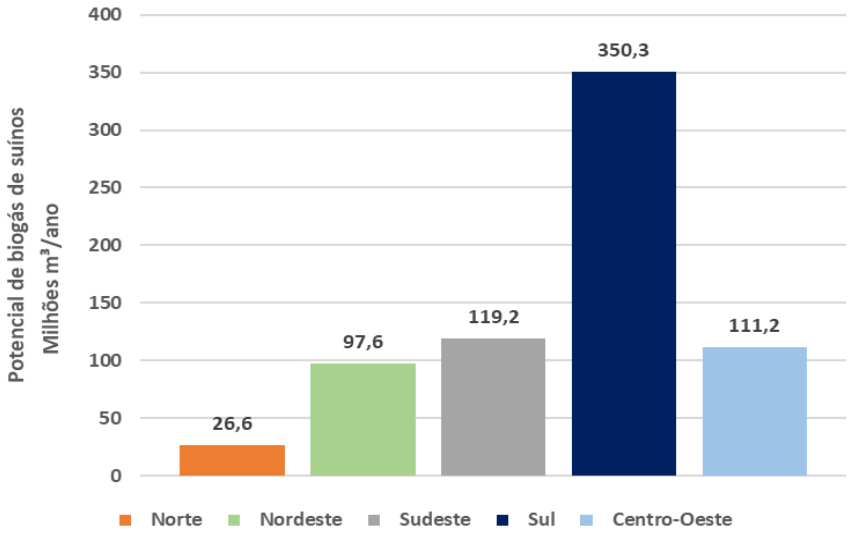
Manejo (FCM) é uma variável que caracteriza o percentual de produção de metano do material orgânico segundo o clima e tempo de retenção ao qual é submetido. Se o dejeto é administrado como um líquido sob condições climáticas quentes por um longo período de tempo, seu FCM pode atingir níveis de 65 a 80%. Devido às condições climáticas do Brasil e a composição do dejeto, foi considerado um FCM alto (79%), obtido em tabelas e referências da própria metodologia.

Apesar de convergir com as outras equações utilizadas em alguns aspectos, a metodologia do IPCC (2006) apresentou resultados 45% menores que a metodologia de Chen (1983), que por sua vez apresentou os maiores índices de produção de biogás. Esses resultados evidenciam uma análise que considera tanto os fatores ambientais como as características e propriedades do dejeto estudado, tornando-se mais assertiva para esse caso teórico.

Destaca-se também o fato de que os valores utilizados para SV e B_0, mesmo sendo derivados de uma metodologia internacional que tende a dados gerais, são amplamente utilizados em outras equações e trabalhos a nível nacional. Além disso, a alta taxa de produção de esterco diária da metodologia de Kunz e Oliveira (2006) provoca uma disparidade entre os valores obtidos com a metodologia estabelecida pelo IPCC (2006). Nessa análise, o potencial de biogás de criação de suínos no Brasil apresenta valores 40% menores, passando de 1.177 milhões de m^3/ano para 712 milhões de m^3/ano.

A metodologia de CIBIOGÁS (2009), por sua vez, além de calcular o número de dejetos com base na produção diária destes e o número de cabeças de suínos, como na metodologia de Kunz e Oliveira (2006), utiliza este último fator para o cálculo do potencial de biogás. Outros parâmetros utilizados são peso médio e peso padrão dos animais, considerado o mesmo. A **Figura *16*** apresenta os valores obtidos de produção esperada de biogás utilizando essa metodologia e seus parâmetros pré-estabelecidos.

Figura 16 - Potencial de geração de biogás na criação de suínos no Brasil em 2018 - Metodologia de CIBIOGAS (2009)



Fonte: Elaboração própria.

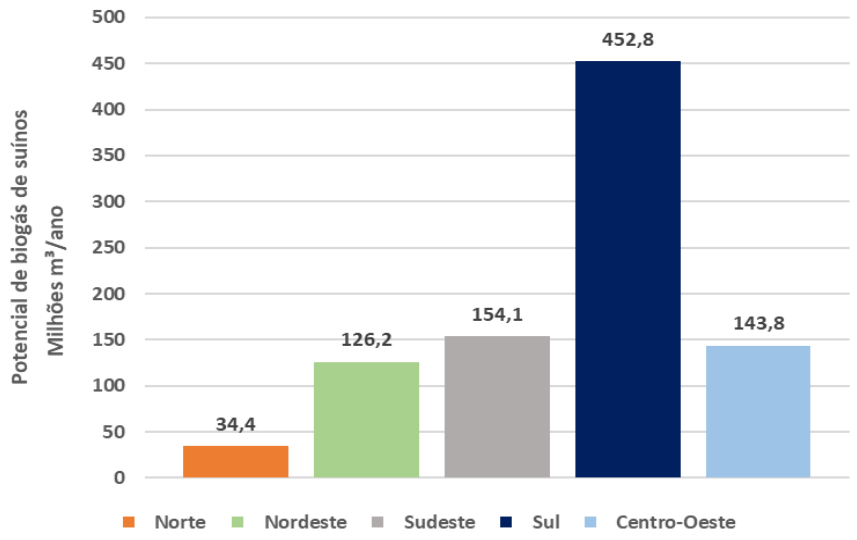
Por ter como base as metodologias já citadas, os resultados obtidos para essa análise assemelham-se aos já apresentados. Porém, vale ressaltar que a metodologia proposta pela CIBIOGÁS (2009) foca em aspectos importantes da criação dos suínos, como peso, manejo e tempo de confinamento. Para esse último fator, dá-se o nome de Fração Diária de Confinamento (FDC), podendo ser 0 (animal não confinado) até 1 (animal confinado), valor utilizado nos cálculos acima. Além deste, o autor propõe uma variável chamada fator de correção de incertezas, para quantificar e considerar prováveis perdas e quedas de eficiência durante a obtenção do biogás.

Os demais fatores comuns às metodologias, B_0 e SV, possuem os mesmos valores utilizados na metodologia do IPCC (2006), resultando assim em resultados parcialmente iguais. Portanto, o potencial nacional de biogás proveniente de resíduos da criação de suínos, pela metodologia de CIBIOGÁS (2009) equivale a 705 milhões m³/ano, assemelhando-se a 712 milhões de m³/ano obtidos pela metodologia do IPCC (2006).

Por fim, a metodologia utilizada para desenvolvimento do Atlas de Bioenergia do Brasil (Coelho et al., 2012) tem como principais variáveis a produção de esterco por dia por animal e a produção de biogás do dejeto. Além destas, a massa específica do metano e o percentual de metano no biogás são considerados, sendo o primeiro uma constante entre todas as metodologias (0,67 kg/m³) e o percentual um pouco mais elevado do que as outras análises (66% de metano no biogás).

Assim, a **Figura *17*** apresenta os valores obtidos para potencial de produção de biogás para as regiões do Brasil em 2018.

Figura 17 - Potencial de geração de biogás na criação de suínos no Brasil em 2018 - Metodologia de Coelho et al. (2012)

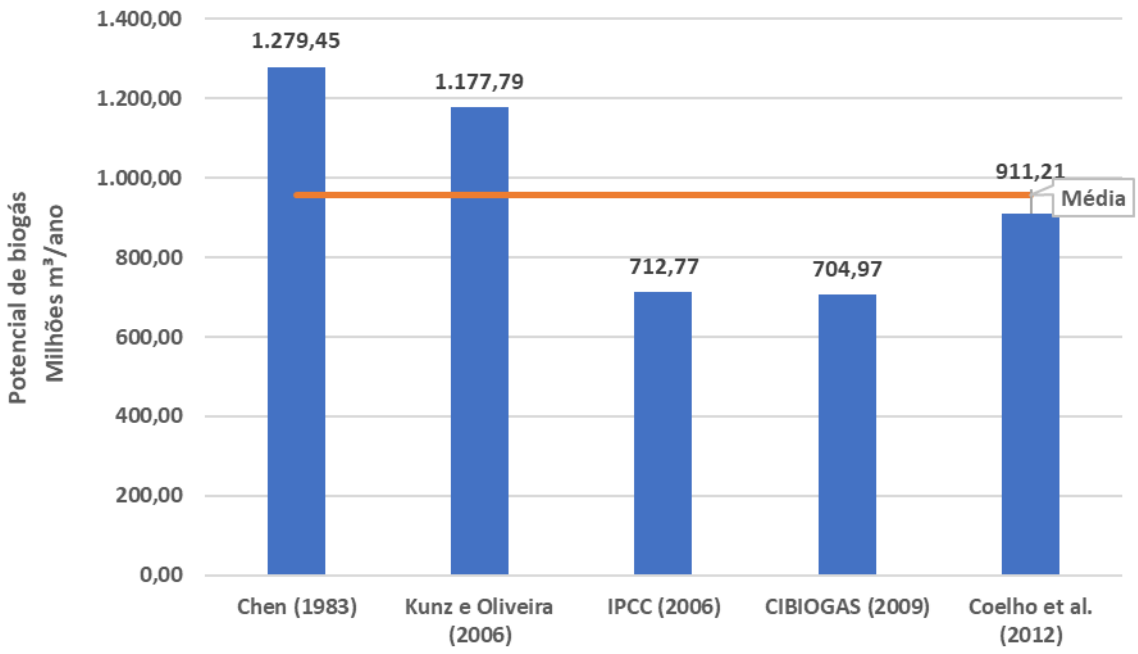


Fonte: Elaboração própria.

O potencial de biogás por Coelho et al. (2012) apresenta valores acima daqueles obtidos por meio das metodologias de IPCC (2006) e CIBIOGAS (2009) Pode-se comparar essa metodologia com a de Kunz e Oliveira (2006), pois ambas utilizam o parâmetro para produção de esterco diária por animal. Para Coelho et al. (2012), o valor para essa variável é 2,25 kg de esterco diária por animal, ao passo que para Kunz e Oliveira (2006) esse parâmetro foi 4,46 kg/dia. Isso caracteriza a diminuição dos valores de potencial de biogás de uma metodologia para a outra, já quantificados na análise da metodologia anterior.

Sendo assim, considera-se que a metodologia de Coelho et al. (2012) possui valores mais próximos à média de todas as metodologias analisadas, estabelecendo valores médios para o potencial de biogás proveniente da criação de suínos no Brasil. A **Figura *18*** apresenta os valores do potencial de biogás obtidos para cada uma das metodologias estudadas.

Figura 18 - Potencial de produção de biogás na criação de suínos no Brasil em 2018 – resumo das metodologias



Fonte: Elaboração própria.

A metodologia de Chen (1983) apresenta os maiores valores para o potencial de biogás da criação de suínos, sendo cerca de 8 milhões de metros cúbicos por dia. Essa metodologia estabelece o potencial com base nas características do processo de digestão anaeróbia, sendo estimado com base em várias considerações. Portanto, essa metodologia é indicada para situações nas quais os dados de volume de dejetos e biodigestores são conhecidos.

Já a metodologia de Kunz e Oliveira (2006) utiliza valores altos para produtividade de metano do resíduo e concentração de sólidos voláteis quando comparada às outras metodologias. Mesmo assim, o potencial estimado de biogás atinge valores de 1.178 milhões m³/ano, pois considera uma elevada taxa de produção de esterco por dia por animal.

Segundo a metodologia do IPCC (2006), o valor para o potencial de biogás da criação de suínos no Brasil, em 2018, atingiu o valor de 712 milhões de m³/ano. Esse equacionamento leva em consideração características da criação, como o manejo dos resíduos. Esses fatores são estabelecidos com base em dados e tabelas disponibilizados pelo próprio autor.

A metodologia de CIBIOGAS (2009) assemelha-se à essa anteriormente citada, levando em consideração os mesmos fatores com valores similares. O valor

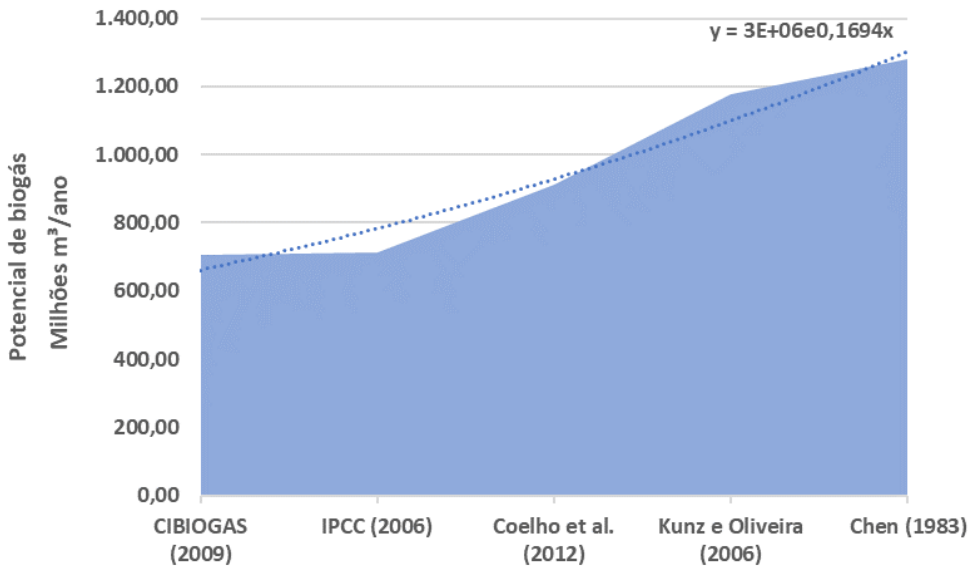
obtido para o potencial, nesse caso, ficou em cerca de 705 milhões m³/dano, um pouco abaixo daquele obtido pela metodologia do IPCC (2006), pois considera um fator de correção de possíveis incertezas.

Já a metodologia de Coelho et al. (2012), utilizada para confecção do Atlas de Bioenergia do Brasil, tem como base um valor para produção de esterco por dia abaixo daquele estabelecido por Kunz e Oliveira (2006), que por sua vez representa os valores atuais da suinocultura brasileira. Além disso, essa metodologia é a única que difere quanto ao percentual de metano no biogás (66%). Sendo assim, a metodologia de Coelho et al. (2012) estabelece um potencial de biogás da criação de suínos da ordem de 911 milhões m³/ano, caracterizando-se como a metodologia que atinge valores mais próximos à média (957 milhões m³/ano).

As divergências mais expressivas observadas entre as metodologias dizem respeito aos parâmetros e variáveis diferentes utilizadas em cada uma das análises. Uma delas, a capacidade máxima para geração de metano, obtida por meio de ensaios BPM, que podem apresentar valores sub ou superdimensionados, ocasionam em prováveis erros e inconsistência a fins de comparação das metodologias.

A fim de criar uma faixa aceitável do potencial de biogás proveniente da criação de suínos, a **Figura *19*** ilustra as faixas obtidas para a produção brasileira de biogás dos resíduos da suinocultura, além de apresentar uma curva média de geração de biogás para as metodologias estudadas.

Figura 19 - Intervalos e curva do potencial de biogás da criação de suínos no Brasil em 2018



Fonte: Elaboração própria.

4.3 Geração de resíduos no abate de suínos

Para quantificar a geração de resíduos no abate de suínos, foi utilizado como referência o número de cabeças de suínos abatidas no ano de 2018 de 44,20 milhões, disponibilizado pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística por meio do documento Indicadores IBGE – Estatística da Produção Pecuária (IBGE, 2019). A **Tabela *17*** apresenta o número de suínos abatidos no Brasil e regiões no ano de 2018.

Tabela 17 - Número de cabeças de suínos abatidos em 2018

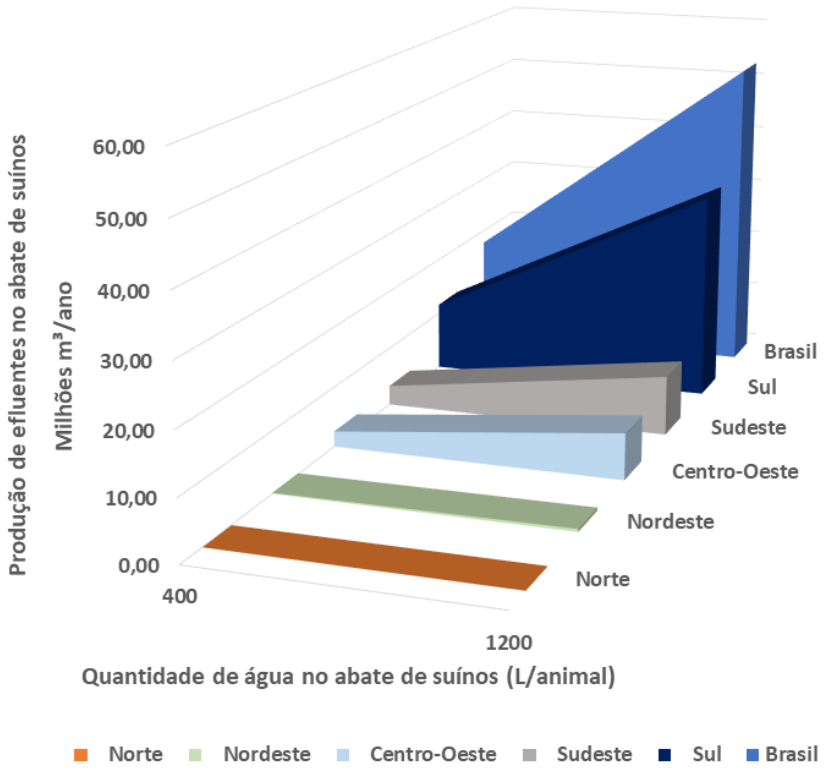
País / Grandes Regiões	**Suínos abatidos – total (nº de cabeças)**
Brasil	44.200.00
Norte	44.200
Nordeste	397.800
Sudeste	8.265.400
Sul	29.083.600
Centro-Oeste	6.409.000

Fonte: Estatística da Produção Pecuária (IBGE, 2019).

Considerando as quantidades de esterco, água, sangue, entre outros resíduos do abate, a metodologia disponibilizada por Coelho et al. (2012) define a vazão de efluentes geradas no processo de abate como dependente do número de animais abatidos e da quantidade de água consumida no processo de abate. Pacheco e Yamanaka (2006) estabelecem um intervalo de consumo de água em abatedouros suínos de 400 a 1.200 litros por cabeça por dia. Para cálculos nas metodologias, foi utilizado o limite superior, considerado na análise de Coelho et al. (2012), de 1.200 L/cabeça/dia.

De qualquer forma, a **Figura *20*** estabelece um intervalo aceitável de geração de efluentes nos abatedouros, seguindo as premissas estabelecidas, os dados da **Tabela *17*** e os limites de consumo de água por cabeça no abate de suínos no Brasil e regiões.

Figura 20 - Produção total de efluentes nos abatedouros de suínos em 2018 - Brasil e regiões



Fonte: Elaboração própria.

Seguindo esse intervalo, a produção de efluentes no abate de suínos no Brasil em 2018 pode variar entre 17,7 - 53 milhões de metros cúbicos por ano. A Região Sul segue como maior produtora de carne suína e consequentemente de efluentes gerados no abate, com cerca de 65,8% do total, seguida pelas Regiões Sudeste (18,7%), Centro-Oeste (14,5%), Nordeste (0,9%) e por fim, a Região Norte (0,1%).

Para os cálculos das metodologias, foram utilizados os maiores valores obtidos para a produção de efluentes na indústria de abate, seguindo as premissas estabelecidas pelos autores. Ainda, em cada uma delas, foi considerada uma faixa aceitável de valores para DBO e DQO dos efluentes de abatedouros, obtendo-se uma curva de potencial de biogás para essas análises.

4.4 Potencial de produção de biogás nos abatedouros de suínos

Para o abate de suínos, o potencial de produção de biogás foi estimado com base em três metodologias disponíveis para o tratamento de efluentes industriais. Os valores para quantidade de efluentes foi igual para todas as análises, levando em

consideração o equacionamento apresentado e o consumo de água até então sugerido pelos autores. A **Tabela *18*** apresenta as variáveis e parâmetros utilizados para os cálculos das metodologias para o potencial de biogás no abate de suínos, fixando os valores estabelecidos em cada uma delas.

Tabela 18 - Parâmetros e variáveis aplicados às metodologias para potencial de biogás no abate de suínos

Parâmetros/Variáveis		IPCC (2006)	CETESB (2006)	Coelho et al. (2020)
Demanda Química de Oxigênio (kg/m³)	**DQO**	2,50	-	3,57
Demanda Bioquímica de Oxigênio (kg/m³)	**DBO**	-	1,80	-
Fator de Emissão de CH_4	**EF**	0,20	-	-
Capacidade máxima de Produção de Metano (kg_{CH4}/kg_{DQO})	$\mathbf{B_0}$	0,25	0,25	0,25
Fator de Correção de Metano	**MCF / F**	0,80	0,80	0,80
Componente orgânico removido como lodo (kg_{DQO}/ano)	$\mathbf{S_i}$	0,35	-	-
Densidade do metano (kg_{CH4}/m^3_{CH4})	**-**	0,67	0,67	0,67

Fonte: Elaboração própria

Para o consumo de água, foi utilizado um valor único, estabelecendo o mesmo valor de geração de efluentes para as metodologias estudadas, sendo considerado o número de cabeças abatidas disponíveis na **Tabela *17***. Os valores tanto de DQO quanto de DBO foram retirados da **Tabela *14***, obedecendo os intervalos apresentados em cada uma das metodologias e utilizando-se um valor médio para cada uma das variáveis. Em um segundo momento, foi realizada uma análise de sensibilidade, variando os valores para essas variáveis.

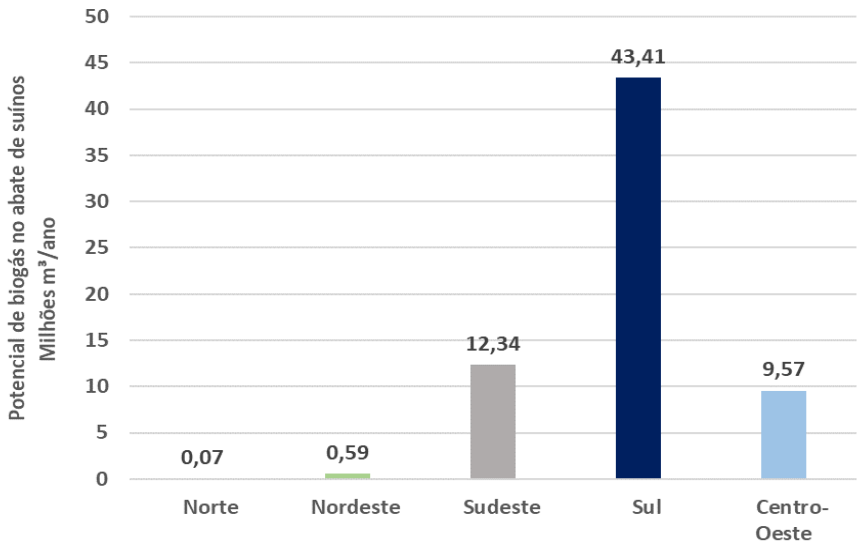
O fator de correção de metano (0,8) e a densidade do metano (0,67 kg_{CH4}/m^2_{CH4}) foram considerados iguais para as duas metodologias, com o intuito de utilizar a mesma base de análise para elas.

A metodologia utilizada pelo *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC, 2006) realiza uma análise baseada na Demanda Química de Oxigênio como parâmetro para medição da quantidade de matéria orgânica. Além dele, outros parâmetros relacionados à produção de metano são utilizados como o fator de emissão de metano, a capacidade máxima de produção de CH_4 pelo resíduo estudado, um fator de correção de metano e sua densidade. O Componente orgânico

removido como lodo utilizado apresenta um valor médio segundo a metodologia, considerando uma média de sedimentação primária que pode remover de 25 a 40% da DBO (COLUNA, 2016).

A **Figura *21*** apresenta os resultados para o potencial de biogás no abate de suínos em 2018, considerando a metodologia de IPCC (2006), para as regiões do Brasil.

Figura 21 - Potencial de geração de biogás no abate de suínos no Brasil em 2018 - Metodologia de IPCC (2006)



Fonte: Elaboração própria.

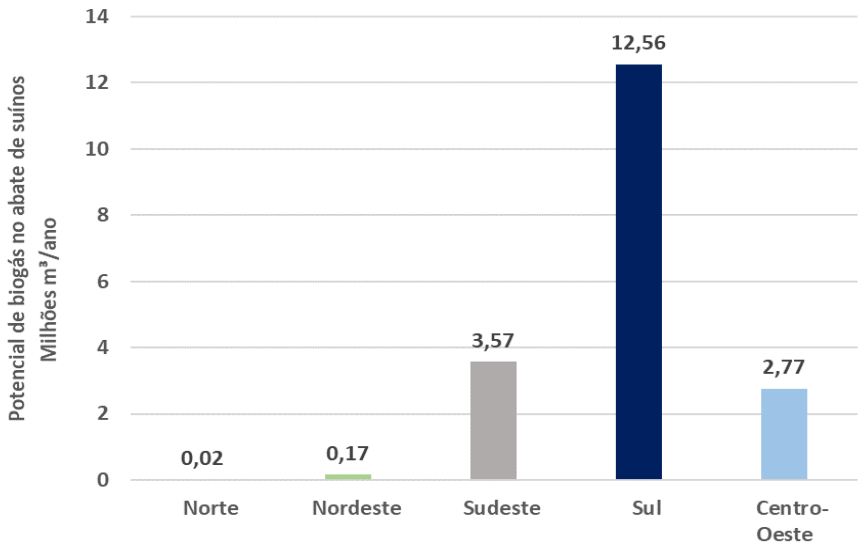
Nota-se resultados elevados para a região Sul, evidenciando sua importância quanto ao setor de abate de suínos. Em sua totalidade, analisando esse equacionamento, o Brasil apresenta potencial de cerca de 65,9 milhões de metros cúbicos por ano de biogás para o setor de abate de suínos. Vale ressaltar que os índices apresentados pelo autor levam em consideração dados internacionais para a obtenção dos valores utilizados nos cálculos.

O IPCC, por meio da metodologia apresentada, avalia o total de material orgânico degradável para os efluentes industriais, analisando o setor industrial, os fatores de emissões e as emissões recuperadas durante o período estudado. Alguns parâmetros estabelecidos, como o fator de correção e a densidade do metano, possuem valores iguais entre as metodologias estudadas.

Por sua vez, a metodologia apresentada por CETESB (2006) utiliza uma relação dos efluentes gerados e a Demanda Bioquímica de Oxigênio, que estabelece

a concentração de matéria orgânica biodegradável por meio da demanda de oxigênio. A **Figura *22*** mostra os resultados obtidos para o potencial de biogás pela metodologia da CETESB (2006).

Figura 22 - Potencial de geração de biogás no abate de suínos no Brasil em 2018 - Metodologia de CETESB (2006)

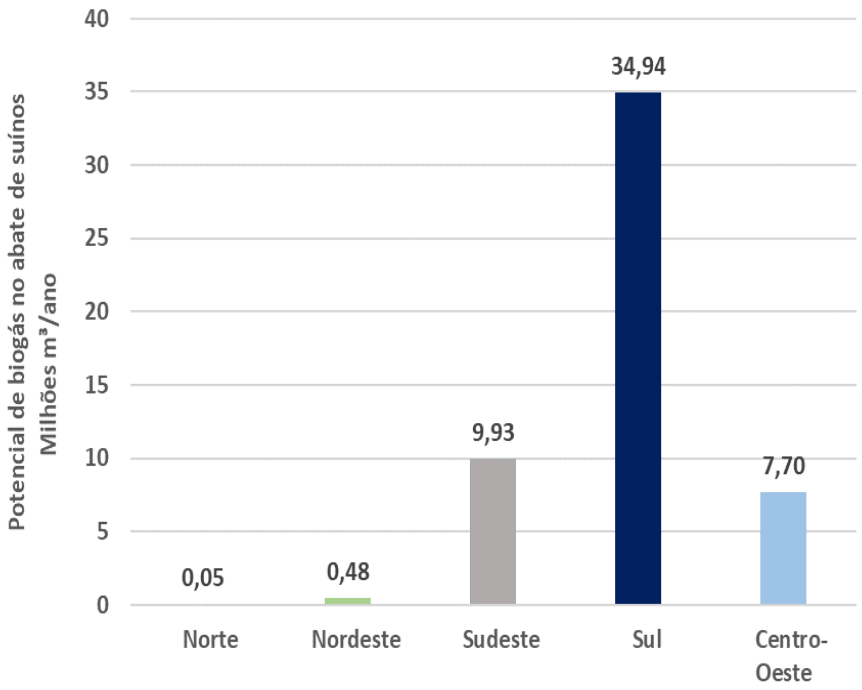


Fonte: Elaboração própria.

Utilizando a metodologia da CETESB, o potencial de produção de biogás no abate de suínos no Brasil em 2018 alcança o valor de 19 milhões de metros cúbicos por ano. Esse valor, quando comparado ao obtido pela metodologia do IPCC (2006), apresenta-se 70% menor, mesmo tendo utilizado valores iguais para capacidade máxima de produção de metano, fator de correção e densidade. Isso ocorre pois, nessa análise, o índice utilizado como base para o cálculo, o DBO, possui valores menores àqueles utilizados nas outras metodologias. Ainda, utiliza valores iguais para a produção de efluentes às outras metodologias, multiplicando-o pela eficiência da biodigestão (0,8), DBO e um valor menor de capacidade máxima de produção de metano.

A seguir, a metodologia utilizada no Atlas de Bioenergia do Estado de São Paulo , segundo Coelho et al. (2020), tem como base para o seu equacionamento a DQO, similar ao IPCC (2006). O gráfico a seguir, apresentado na **Figura *23***, mostra os valores para o potencial de produção de biogás no abate de suínos nas regiões do Brasil obtidos por meio do equacionamento disponibilizado por Coelho et al. (2020).

Figura 23 - Potencial de geração de biogás no abate de suínos no Brasil em 2018 - Metodologia de Coelho et al. (2020)



Fonte: Elaboração própria.

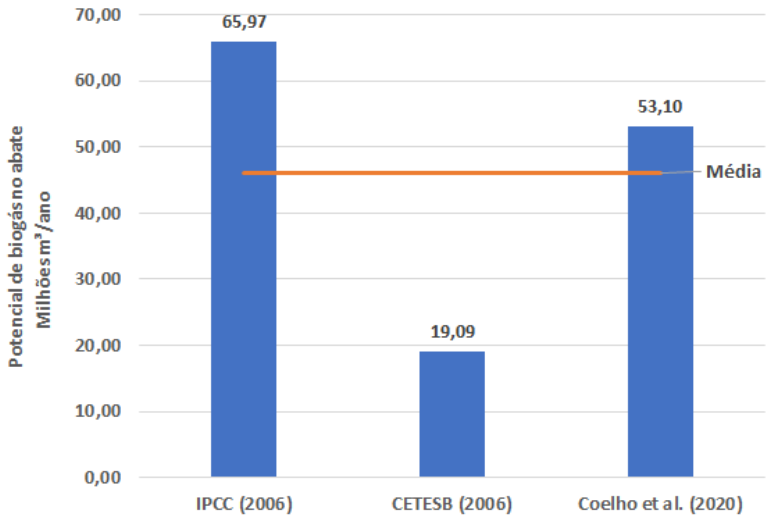
Segundo esse equacionamento, o potencial de geração de biogás no abate de suínos no Brasil para o ano de 2018 é de 53 milhões de metros cúbicos por dia, atingindo valores menores daqueles calculados utilizando a metodologia do IPCC (2006) e maiores do que os obtidos pela metodologia da CETESB (2006). Coelho et al. (2020) desenvolvem o equacionamento com base na demanda química de oxigênio, que por sua vez apresenta-se quantitativamente maior do que a DQO utilizada pela metodologia do IPCC (2006). Essa elevação também ocorre com a capacidade máxima de produção de metano, sendo considerada a mesma para as outras duas metodologias.

Para as análises técnicas, Coelho et al. (2020) consideraram que toda a DQO removida do efluente é convertida somente em metano, evidenciando o fato de que a degradabilidade da matéria orgânica de um ciclo industrial apresenta melhores resultados ao ser representada por essa variável quando comparada a outras, como o teor de sólidos voláteis.

A fim de se obter uma análise comparativa, a **Figura *24*** plota os valores obtidos para o potencial de biogás no abate de suínos no Brasil em 2018 para cada

uma das metodologias estudadas. Além disso, fica possível observar a linha média de geração de biogás.

Figura 24 - Potencial de produção de biogás no abate de suínos no Brasil em 2018 – resumo das metodologias



Fonte: Elaboração própria.

Os resultados mostram que a metodologia do IPCC (2006) apresenta o maior valor de potencial de produção de biogás, tendo em vista seus parâmetros já apresentados. Já o equacionamento disponibilizado pela CETESB (2006) possui o menor resultado obtido nessas análises, com queda brusca quando comparada à primeira metodologia. Coelho et al. (2020), por meio de sua metodologia, quantifica o potencial entre as duas metodologias, aproximando-se do valor médio obtido durante o estudo.

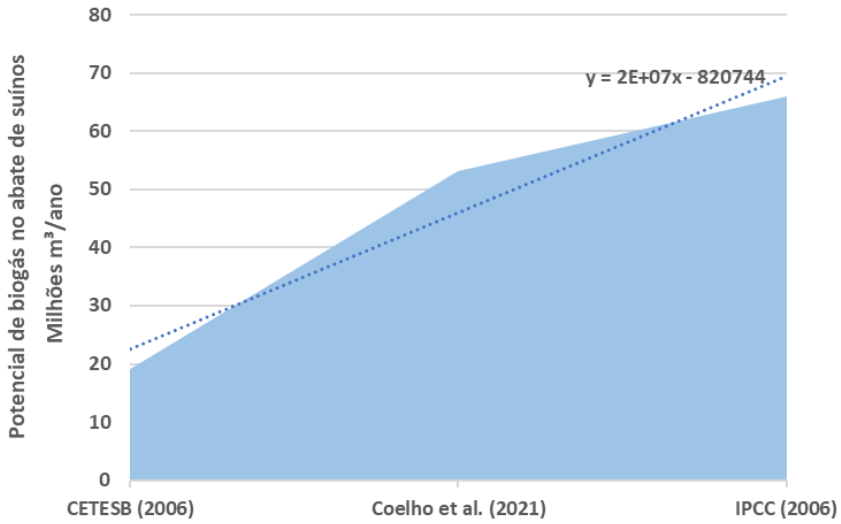
Com todos os parâmetros evidentes e quantificados, a metodologia de Coelho et al. (2020) utiliza parâmetros mais atuais aplicados ao caso brasileiro, considerando valores elevados para DQO e capacidade máxima de produção de metano, baseando seus parâmetros na situação nacional com a consideração de que toda a DQO é removida. Esses fatores, assim como a aplicação de cada um deles nas diferentes metodologias, ocasionam resultados divergentes e pouco comparáveis.

Outro ponto a ser destacado é o fator de conversão da DQO nas metodologias que utilizam esse parâmetro, que tem a função de indicar a eficiência de remoção. Essa consideração evidencia que uma parte da DQO fica retida no lodo do efluente,

não sendo convertida em metano. A utilização da DBO como variável para os cálculos elimina essa possível inconsistência.

Esse estudo permite a criação de uma faixa de geração de biogás a partir das metodologias citadas acima. Portanto, a **Figura *25*** apresenta o intervalo do potencial de geração de biogás a partir do abate de suínos no Brasil para o ano de 2018.

Figura 25 - Intervalos e curva do potencial de biogás do abate de suínos no Brasil em 2018



Fonte: Elaboração própria.

5. APROVEITAMENTO ENERGÉTICO DO BIOGÁS GERADO

Utilizando como base as metodologias para o potencial de geração de biogás a partir dos resíduos da criação e abate de suínos, foi possível quantificar a produção brasileira derivada dessa cadeia para o ano de 2018. Para seu aproveitamento energético, foram considerados dois usos finais: eletricidade e combustível (biometano).

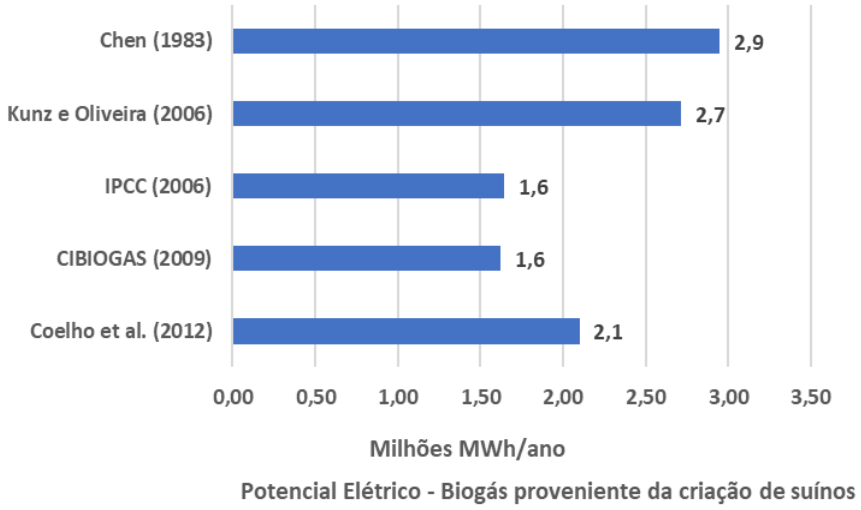
5.1 Aproveitamento do biogás para geração de Energia Elétrica

O biogás, quando extraído de sua fonte, pode ser direcionado para a produção de energia elétrica. Pensando nisso, Coelho et al. (2020) disponibilizam equacionamento para a obtenção do potencial elétrico considerando a utilização de motores ciclo Otto. Essa metodologia considera a concentração do metano no biogás, o Poder Calorífico Inferior do gás metano e a eficiência energética para esse motor.

Este último parâmetro representa a eficiência da conversão energética do biogás para energia elétrica, sendo diretamente proporcional aos valores de vazão de efluentes.

Sendo assim, a **Figura *26*** faz uma representação dos valores para o potencial de energia elétrica de biogás da criação de suínos no Brasil, utilizando os valores obtidos nas metodologias discutidas.

Figura 26 - Potencial elétrico do biogás proveniente da criação de suínos no Brasil em 2018



Fonte: Elaboração própria.

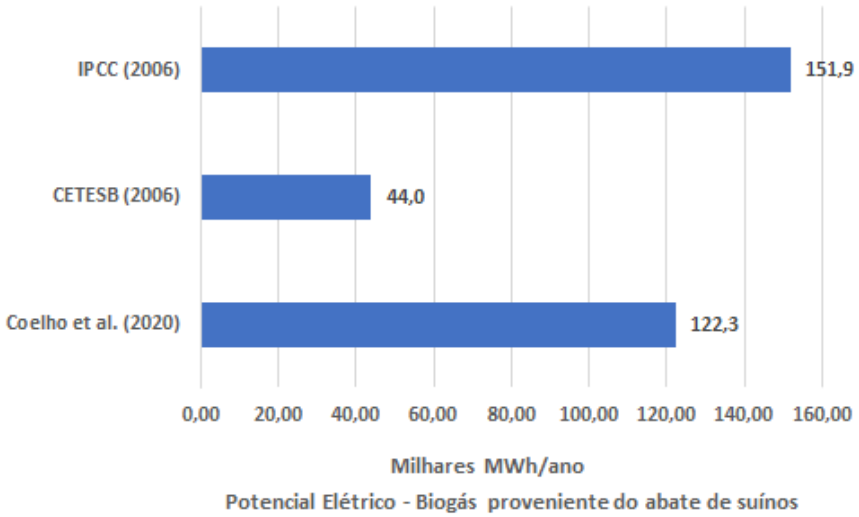
Os valores obtidos para o potencial elétrico de biogás da criação de suínos no Brasil variam de 1,6 milhões MWh/ano, obtidos para metodologias como IPCC (2006) e CIBIOGAS (2009), até 2,9 milhões de MWh/ano, segundo a metodologia de Chen (1983). Para itens comparativos, foram utilizados os dados disponibilizados pelo Governo de São Paulo acerca do consumo de energia elétrica e gás natural por cidade, disponibilizados abertamente para consulta. Para os outros Estados, não foram encontrados valores para comparação, pois nem todas as distribuidoras de energia divulgam os dados necessários. Segundo o Grupo de Dados Energéticos da Secretaria de Infraestrutura e Meio Ambiente de São Paulo (SIMA, 2018), a cidade de São Paulo, no ano de 2018, foi a primeira no ranking de consumo de energia elétrica e com 27,1 milhões de MWh/ano. A cidade de Guarulhos ocupa a segunda colocação, com cerca de 3,2 milhões de MWh/ano.

Sendo assim, a eletricidade gerada como produto da conversão do biogás da criação de suínos, poderia suprir de 8 a 11% do consumo anual da cidade de São

Paulo. Analisando o consumo de Guarulhos, o potencial elétrico obtido supriria de 65 a 91% do consumo anual da segunda maior cidade no quesito consumo do Estado de São Paulo.

Para o abate, a **Figura *27*** apresenta os valores obtidos para o potencial elétrico do biogás do abate de suínos segundo as metodologias analisadas e estudadas, utilizando como base os dados de 2018.

Figura 27 - Potencial elétrico do biogás proveniente do abate de suínos no Brasil em 2018



Fonte: Elaboração própria.

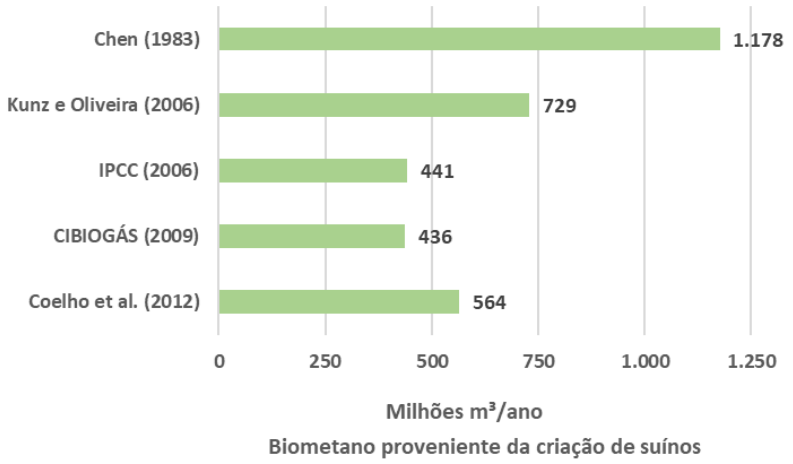
A obtenção do biogás gerado para o abate de suínos proporcionaria um potencial elétrico entre 44.000 e 151.900 MWh/ano. Utilizando as informações do Ranking Paulista de Energia (SIMA, 2018), a energia gerada por essa fonte supriria de 7,5 a 26% do consumo anual da cidade de Presidente Prudente, maior cidade do Oeste do Estado de São Paulo, que por sua vez ocupa a 36º posição dos maiores consumidores de energia elétrica. Outra destinação da eletricidade gerada seria dentro da propriedade, tornando-a um autoprodutor de energia elétrica, tendo no mínimo dez horas de geração por dia (MARTINS; OLIVEIRA, 2011).

5.2 Aproveitamento do biogás para produção de Biometano

Além do aproveitamento energético por meio da queima do biogás em motores e geração de energia elétrica, é possível utilizá-lo como combustível desde que seja transformado em biometano.

O biometano assume as mesmas características do gás natural e pode ser destinado para os usos finais comuns a esse gás. Sendo assim, a **Figura *28*** apresenta os valores obtidos para o potencial de biometano seguindo as metodologias de obtenção do biogás para a criação de suínos no Brasil, com a base de 2018.

Figura 28 - Potencial de biometano proveniente da criação de suínos no Brasil em 2018

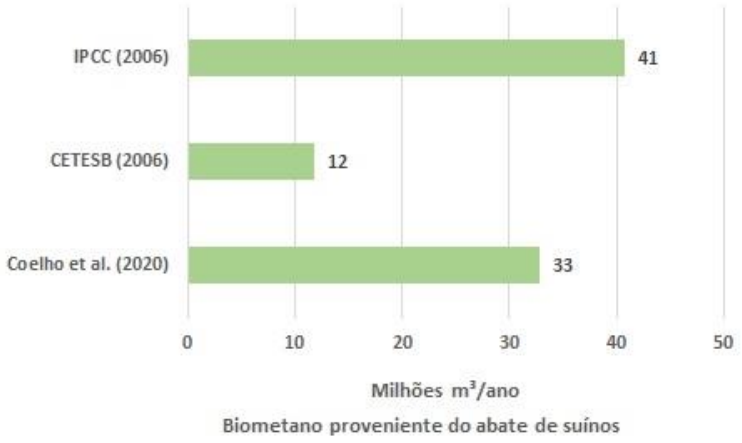


Fonte: Elaboração própria.

Para a criação de suínos, foram obtidos valores na faixa entre 436 milhões de m³/ano e 1,2 bilhões de m³ de biometano por ano, representando cerca de 54 a 113% do consumo de gás natural da cidade de São Paulo, proporcionando ainda um excedente de gás para ser consumido. Segundo a SIMA (2018), a cidade de São Paulo consumiu 1,04 bilhões de m³ de gás natural em 2018.

Já para o abate de suínos, que representa uma produção de biogás em menor escala, a **Figura *29*** ilustra os valores comparando as metodologias para o potencial de biogás do abate de suínos.

Figura 29 - Potencial de biometano proveniente do abate de suínos no Brasil em 2018



Fonte: Elaboração própria.

A metodologia da CETESB (2006) apresenta o menor valor para o biometano do abate dos animais, com cerca de 12 milhões de m³ por ano, ao passo que o equacionamento disponibilizado pelo IPCC (2006) apresenta valores de 41 milhões m³/ano. Para itens comparativos, a cidade de Cubatão, é a segunda no ranking de maiores consumidores de gás natural do estado de São Paulo (SIMA, 2018). O biometano produzido seria capaz de suprir a necessidade dessa cidade entre 9 a 11% do consumo total de gás natural, sendo o menor valor referente à metodologia de CETESB (2006) e o maior à metodologia de IPCC (2006).

Por fim, na sessão Anexos, da **Tabela *19*** até a **Tabela *26*** é apresentada uma síntese dos potenciais de biogás, biometano e energia elétrica para o Brasil e Regiões para cada uma das metodologias utilizadas para criação e abate de suínos.

6. ASPECTOS AMBIENTAIS E SOCIAIS DO TRATAMENTO DOS RESÍDUOS DE CRIAÇÃO E ABATE DE SUÍNOS E DO SEU APROVEITAMENTO ENERGÉTICO

A intensificação da suinocultura no Brasil, proporcionou um crescimento exponencial da produção, que fez com que o país se tornasse uma potência mundial exportadora e consumidora de carne suína. O desempenho econômico da produção de carne suína no Brasil ocorreu pelo aumento da escala, da especialização, da concentração geográfica da produção, e do aumento dos contratos entre os produtores e as agroindústrias (MIELE, 2006).

Porém, ao mesmo tempo em que o Brasil aprimorou suas técnicas de produção, aumentando significativamente a produção de animais, verificou-se que a mudança estratégica sobre o manejo dos dejetos suínos não acompanhou na mesma velocidade (MIELE, 2006). Como consequência desse manejo inadequado dos dejetos líquidos de suínos, constata-se atualmente uma grande destruição de recursos naturais renováveis (OLIVEIRA; NUNES, 2002). Baseando-se nisso, verifica-se a importância de discorrer sobre o destino dos resíduos da suinocultura. A seguir, é descrito sobre os aspectos ambientais e sociais do tratamento de resíduos gerados na suinocultura, além das possibilidades e vantagens do aproveitamento energético desses resíduos.

6.1 Aspectos do tratamento de resíduos de criação e abate de suínos

A cadeia produtiva de suínos no Brasil, apesar de ser importante para o setor econômico, traz consigo um alto índice de problemas ambientais agregados, principalmente pela poluição do solo, ar, da água, na contaminação dos lençóis freáticos, problemas com a saúde pública e distúrbios ambientais entre as espécies (BRASIL, 2016; COSTA; MARVULLI, 2020; FERREIRA et al., 2018; MIELE, 2006).

Um estudo mostrando a toxicidade potencial do esterco de suínos gerada na fauna de solos subtropicais no Brasil, mostrou que o uso de esterco líquido altera, e, em alguns casos, foi responsável pela extinção total da fauna do solo. Isso foi causado por compostos presentes na matéria orgânica do material. Segundo o estudo, quanto maior a quantidade de esterco utilizado, maiores os impactos negativos na fauna do solo (SEGAT et al., 2019).

Porém, quando bem manejados, os impactos ambientais gerados pela disposição final dos dejetos podem ser minimizados. Mallmann et al. (2014), fizeram um estudo projetando cenários de longo prazo em solos com diferentes doses de esterco e diferentes manejos do solo. Os autores concluíram que com um preparo adequado da terra, e a utilização de doses moderadas de estrume, é possível minimizar a contaminação do solo por Zn e Cu em excesso, além de também minimizar a poluição de águas subterrâneas por Zn.

No ano de 2001, no estado de Santa Catarina, maior produtor brasileiro de suínos, apenas 15% das propriedades dispunham de algum tipo de manejo de dejetos

durante a etapa de criação (BELLI FILHO et al., 2001). Hoje, sabe-se que o percentual de descarte dos dejetos em efluentes aquáticos no Brasil é alto (BRASIL, 2016).

Os resíduos do abate também são significantes no Brasil, gerando grande quantidade de efluentes, tanto sólidos como líquidos (que representam de 80% a 95% de toda água consumida nestes locais). Esses resíduos apresentam alta demanda química e bioquímica de oxigênio, e por consequência, alta carga de poluentes orgânicos, que comumente são descartados em afluentes próximos aos polos produtivos (FERREIRA et al., 2018).

Segundo BRASIL (2016) os sistemas de descarte de dejetos onde são despejados diretamente nos afluentes, além de inviáveis economicamente e ambientalmente, não permitem o aproveitamento do potencial econômico que estes resíduos possuem.

Uma das estratégias apontadas para diminuir o volume de resíduos gerados diz respeito a formulação da nutrição dos animais, ou seja, uma dieta que possibilite a maior disponibilidade com a menor excreção de nutrientes possível. Este ponto é importante, visto que estudos apontam, por exemplo, que a ração animal é uma das principais responsáveis pelos impactos ambientais e pela pegada de carbono na produção de suínos (ARRIETA; GONZÁLEZ, 2019; SAGASTUME GUTIERREZ et al., 2016). Desta forma, a otimização do consumo alimentar dos animais, possibilita uma menor geração de resíduos além de diminuição dos custos de produção (BRASIL, 2016).

Segundo Oliveira e Nunes (2002), a manutenção das zonas de produção intensiva de suínos depende diretamente de sistemas que contribuam com a redução de emissão de odores, gases nocivos e poluição de águas superficiais e subterrâneas. Portanto, o tratamento adequado deste resíduo faz-se necessário. Neste sentido, três são as principais técnicas adotadas no Brasil: a compostagem para produção de biofertilizante; o tratamento aeróbio em lagoas e; o tratamento anaeróbio com consequente produção de biogás (BELLI FILHO et al., 2001).

O tratamento aeróbico é uma das tecnologias mais utilizadas no país. Neste, os dejetos são dispostos em lagoas para tratamento, e posterior aplicação no solo. Sabe-se, porém, que este processo é altamente impactante (COLUNA, 2016; KUNZ et al., 2004).

Alguns autores apontam que a compostagem é uma abordagem aconselhável para o manejo do esterco de suínos. Por exemplo, Sagastume Gutierrez et al. (2016)

argumentam que a utilização do resíduo na forma de compostagem é uma melhor alternativa à lagoa. Na compostagem, o adubo orgânico pode substituir o adubo químico, gerar economia ao produtor e aumentar o nível de matéria orgânica no solo (BRASIL, 2016).

Segat et al. (2019) defende que a principal alternativa para este resíduo é utilizá-lo como biofertilizante. Neste processo biológico, ocorre a redução da carga orgânica e do potencial poluidor da biomassa (FERREIRA et al., 2018). Segundo Segat et al. (2019), quando utilizado de maneira correta, é uma fonte barata de aumento da matéria orgânica no solo, melhorando as características químicas, biológicas e físicas. No entanto o uso excessivo ou não planejado do biofertilizante, ou mesmo o uso *in natura* do dejeto pode gerar diversos problemas, como visto anteriormente.

Além da compostagem e das lagoas aeróbias, o tratamento anaeróbio dos dejetos de suínos é uma alternativa promissora que, além da diminuição do potencial poluidor dos resíduos, propicia também o aproveitamento energético do biogás e do biometano.

Entre as vantagens da produção de biogás a partir do tratamento de dejetos de suinocultura no Brasil estão (BRASIL, 2017):

- Fonte renovável que pode ser convertida tanto em gás veicular, energia elétrica ou energia térmica;
- Pode ser utilizado na substituição de combustíveis fósseis, como o GLP, possibilitando a geração de emprego e renda;
- Ocorre em produção descentralizada, o que pode reduzir os custos com redes de distribuição e/ou transmissão;
- Devido a origem renovável, tem potencial poluidor significativamente menor que o gás natural de origem fóssil;
- Permite a mitigação da poluição hídrica e atmosférica, possibilitando a redução dos impactos ambientais, e;
- No caso da utilização do biometano em substituição ao Gás Natural e GLP, pode ser utilizada a mesma infraestrutura de distribuição.

Um dos principais motivos do recente entusiasmo do Brasil em relação a intensificação da produção de biogás se dá pelo constatado grande potencial brasileiro de produção. Neste sentido, o Ministério de Minas e Energia indicou que o volume potencial total de geração de biometano no Brasil é de cerca de 65 milhões

de m^3/dia. Segundo o estudo, isso equivale a aproximadamente duas vezes o volume comercializado via Gasoduto Brasil Bolívia (BRASIL, 2017). A diminuição da dependência externa de combustíveis fósseis pode então, ser indicado como mais uma vantagem da produção de biogás a partir dos dejetos de animais.

Segundo Lassaletta et al. (2019), a sustentabilidade dos sistemas de produção de suínos nas próximas décadas dependerá da melhoria genética das raças, aumento da eficiência do processo de criação animal, inclusão do uso de biofertilizantes resultantes do esterco, e também da moderação do consumo humano de carne suína. Além disso, o aproveitamento energético do biogás gerado também será de suma importância na jornada para melhoria dos indicadores ambientais e sociais da cadeia da suinocultura no país.

6.2 Emissões, Suinocultura de Baixo Carbono e aproveitamento energético do biogás de dejetos suínos no Brasil

A utilização do biogás e do biometano como fonte energética vem sendo incentivada por diversos países que buscam aumentar a parcela de combustíveis renováveis em suas matrizes energéticas e dessa forma reduzir emissões de gases de efeito estufa (CETESB - COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL, 2020).

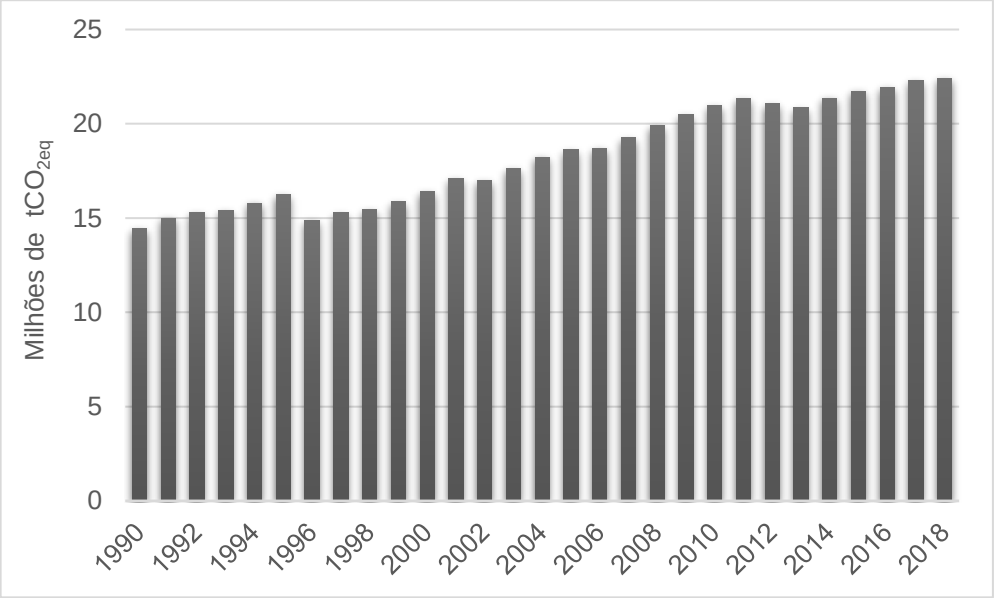
O Brasil se comprometeu no ano de 2015, durante a Conferência das Partes (COP21) em Paris, a reduzir a emissão total de gases de efeito estufa em 37% até o ano de 2025 e em 43% até o ano de 2030, tomando o ano de 2005 como base (BRASIL, 2020). Portanto, para cumprir as metas de redução de emissões, a produção de combustíveis renováveis com potencial poluidor inferior aos combustíveis de origem fóssil, deve ser estimulado.

Os resíduos da suinocultura passam pelo processo de decomposição, pela ação de bactérias, gerando gases, principalmente dióxido de carbono e metano. Quando não utilizados estes gases são lançados na atmosfera, aumentando as taxas de emissão de gases de efeito estufa (FERREIRA et al., 2018). De acordo com o Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC) o metano (CH4) tem um potencial de aquecimento global 28 vezes superior ao do gás carbônico (CO2) (GREENHOUSE GAS PROTOCOL, 2014).

A forma de criação dos suínos no Brasil, totalmente confinado e com retirada de dejetos por meio de lavagem, faz com que a suinocultura seja uma das grandes responsáveis pelas emissões de metano no país (JÚNIOR; ORRICO; JÚNIOR, 2011).

Segundo o Sistema de Estimativas de Emissões e Remoções de Gases de Efeito Estufa (SEEG), os dejetos de animais foram responsáveis pela emissão de mais de 22 milhões de toneladas de CO2eq na atmosfera no ano de 2018 (**Figura *30***). Os dados consideram todos os animais[4] produzidos pela pecuária brasileira (SEEG, 2019).

Figura 30 - Emissões por manejo de dejetos de animais entre 1990 e 2018



Fonte: SEEG (2019).

A adoção das tecnologias como a biodigestão e a compostagem diminui as emissões de gases de efeito estufa provenientes do setor agropecuário (JÚNIOR; ORRICO; JÚNIOR, 2011).

Segundo a Associação Brasileira do Biogás (ABiogás) se todo o resíduo da suinocultura no Brasil fosse aproveitado para produção de biogás, seria possível a redução do consumo de diesel em 2,5 bilhões de litros, reduzindo em 96% as emissões de gases de efeito estufa causados por este combustível (IEA, 2020).

[4] Incluí: Asininos, aves, bubalinos, caprinos, equinos, gados de corte, gados de leite, muares, ovinos, suínos.

Além disso, o desenvolvimento da suinocultura elevou a produção de dejetos que, sem tratamentos e critérios de disposição, tornam-se uma grande fonte poluidora do solo e dos mananciais de água (PRA et al., 2005). Segundo Perdomo (2001), os produtores de suínos movimentam grandes quantidades de insumos e recursos com o intuito de otimizar a produtividade, mas não levando em consideração os investimentos necessários para o controle das emissões de poluentes e utilização agronômica dos resíduos.

Com o intuito de minimizar as emissões de carbono pelas práticas na suinocultura, o Ministério da Agricultura Pecuária e Abastecimento (MAPA) juntamente com o Instituto Interamericano de Cooperação para a Agricultura (IICA) elaborou um estudo para pontar alternativas economicamente viáveis para os dejetos de suínos no país, chamado “Suinocultura de Baixa Emissão de Carbono”. Essas alternativas devem ser adotadas pelos produtores de suínos. Dentre as práticas apontadas nesse estudo estão (BRASIL, 2016):

- A redução da utilização excessiva da água, visto que aumenta a quantidade de resíduos, dispersão da matéria orgânica nos afluentes e provoca uma menor produção de biogás, aumentando os custos de produção.

- A utilização de sistemas de captação de água da chuva e armazenagem em cisternas, para ser utilizado na limpeza as instalações;

- O uso de bombas de lavagem de alta pressão, raspagem das baias (limpeza a seco), e construção de pisos com um leve declínio (de 3 a 5%) para auxiliar na limpeza e minimizar o consumo de água, visto que o alojamento de suínos é um dos grandes responsáveis pelo alto impacto ambiental desse sistema (SAGASTUME GUTIERREZ et al., 2016).

- Manejo dos resíduos e utilização desses como biofertilizantes;

- Auto geração de energia elétrica na propriedade por meio de aproveitamento do biogás proveniente da biodigestão anaeróbica dos dejetos dos suínos;

Apesar de recomendada, a auto geração de energia elétrica nem sempre é viável para pequenas propriedades. Um estudo avaliou a capacidade de geração de créditos de carbono em uma pequena produtora de suínos no Oeste do estado do Paraná. Segundo os autores, a produção de energia elétrica pelo uso do biogás na propriedade é inviável, devido aos altos custos de implantação e operação do sistema. Além disso, os créditos de carbono gerados pela propriedade seriam insuficientes para se mostrarem economicamente atrativos (KOTZ; SCHMITZ; MATIELLO, 2011).

Desta forma, alternativas que viabilizem a produção e utilização de biogás em pequenas propriedades são necessárias.

Segundo Salomon e Lora (2005), a crise ambiental, a ratificação do Protocolo de Kyoto, o rápido desenvolvimento econômico dos últimos anos e a elevação do preço do petróleo foram fatores chave para o crescimento do interesse pelas pesquisas e investimentos na utilização do biogás como alternativa energética. Neste quesito, o biogás possui propriedades atrativas, principalmente pelo alto poder calorífico apresentado, que depende diretamente da concentração de metano presente na sua composição, variando entre 5.000 a 7.000 kcal/m^3. Enquanto isso, o metano possui poder calorífico inferior de até 8.550 kcal/m^3 [5](OLIVEIRA, 2009).

O estudo de Ferreira et al. (2018) afirma que naquele ano, o aproveitamento do biogás resultante da decomposição anaeróbica de dejetos de suínos no Brasil para produção de energia elétrica poderia contribuir com 486,88 GWh/ano. Só no estado do Paraná, foco do estudo, verificou-se o potencial de 94,94 GWh/ano para a mesma categoria de resíduos. Já o estudo de Ribeiro e Raiher (2013), apontou que o estado do Paraná poderia aumentar a oferta de energia em até 103 GWh, utilizando resíduos de suínos para a geração.

O Atlas de Bioenergia do Estado de São Paulo afirma que no ano de 2017 o potencial energético do biogás no estado seria de aproximadamente 818 GWh. Apenas o potencial de geração de biogás a partir da criação de suínos corresponde a cerca de 50GWh de energia por ano, o que seria o equivalente ao consumo energético de 21.700 residências (COELHO et al., 2020).

Segundo Borges (2020), a produção nacional de biometano pode atingir no ano de 2030 um potencial teórico de 6,8 milhões de metros cúbicos por dia, o que pode representar cerca de 3,54 TWh ou 0,6% da demanda atual por energia elétrica no país[6].

Além da possibilidade de produção de energia, os efeitos positivos da produção de biogás a partir de resíduos no Brasil incluem a geração de empregos, descentralização da produção de energia, diminuição da poluição ambiental, redução

---

[5] Para fins de comparação, em termos energéticos, 1m^3 de biogás equivale a 0,4kg de GLP (VIEIRA; FRANCISCO; BITTENCOURT, 2016)

[6] O estudo rata do potencial geral de produção de biometano no país, não apenas da suinocultura.

de consumo de combustíveis fósseis, principalmente nas áreas rurais do Brasil (FREITAS et al., 2019).

No entanto, no Brasil os empreendimentos que produzem e utilizam biogás são relativamente novos e regionalmente isolados, apesar de apresentarem grande potencial econômico para áreas rurais (VIEIRA; POLLI, 2020). Segundo Borges (2020), a produção de biogás apresenta barreiras que dificultam sua implantação em larga escala no Brasil. Entre elas estão:

- A necessidade de capital para infraestrutura;
- Incentivos concedidos aos combustíveis fósseis; e
- Falta de alinhamento entre instituições financeiras.

Historicamente, os dejetos de suínos, assim como o próprio biogás, não possuíam valor comercial e eram associados a altos custos ambientais. Porém, com a busca de alternativas para a redução de impactos ambientais relacionados, a transformação deste resíduo em energia tornou-se uma das melhores opções para o tratamento dos dejetos (BRASIL, 2016). Hoje o biogás é visto não mais como um passivo ambiental, mas como um ativo energético (FREITAS et al., 2019).

7. CONCLUSÕES

Esse trabalho foi dividido em quatro sessões: a primeira apresentou os dados e as metodologias selecionadas e utilizadas para quantificação dos dejetos e produção de biogás a partir dos resíduos de criação e abate de suínos, além do aproveitamento energético na conversão para energia elétrica e biometano; na segunda foi realizada uma análise das metodologias estudadas para o potencial de biogás para cada um dos casos por meio de resultados obtidos para o Brasil e suas Regiões, atribuindo valores de forma que possibilitasse análises quantitativas e comparativas; a terceira sessão apresentou os resultados obtidos para o aproveitamento energético do biogás gerado na conversão tanto para energia elétrica quanto para o biometano, considerando todas as metodologias estudadas para a obtenção de faixas; e por fim a quarta sessão abordou os aspectos ambientais e sociais do tratamento dos resíduos de criação e abate de suínos e do seu aproveitamento energético, apresentando o cenário atual do setor e quais são os impactos diretos acerca do aproveitamento dos resíduos dessa cadeia.

A produção estimada de dejetos animais tomou como base diversos trabalhos e índices de produção de dejetos por animal por ciclo de produção. Para essa determinação, foi adotado como referência a criação em Ciclo Completo, que leva em consideração todo o período de vida do animal, obtendo-se valores que podem variar de 424 mil a 4,3 milhões de toneladas de resíduos por dia no Brasil, estabelecendo-se valores máximos e mínimos para esse potencial.

As metodologias estudadas para o potencial de produção de biogás da criação de suínos possuem parâmetros particulares, em alguns casos compartilhados entre elas, que consideram as análises realizadas por cada um de seus autores. A metodologia de Chen (1983) baseou sua análise no processo de digestão anaeróbia, utilizando variáveis como tempo de retenção hidráulica e temperatura de digestão, pré-determinados pelos autores e análises desenvolvidas para o caso da suinocultura, nas quais foram obtidos os maiores valores para produção de biogás. Já para Kunz e Oliveira (2006), os cálculos utilizam como diretriz as características e composição do resíduo analisado, como a produtividade de metano e concentração de sólidos voláteis fornecidos pelos autores, apresentando valores menores dos obtidos pela metodologia de Chen (1983), mas relativamente altos quando comparado às outras. A metodologia segundo IPCC (2006) dá visibilidade para a configuração e

particularidades do tipo de manejo, considerando fatores de conversão e emissão de metano por categoria, obtendo-se a segunda menor faixa de produção de biogás entre as metodologias. Já a metodologia desenvolvida por CIBIOGÁS (2009) desenvolveu seu equacionamento com base na produção diária e características dos resíduos, além do peso médio e peso padrão dos animais, na qual foram obtidos os menores valores de produção de biogás para as metodologias. Por fim, a metodologia de Coelho et al. (2012), que analisou variáveis relacionadas ao dejeto e suas características pré-estabelecidas, como produção de biogás pelo dejeto estudado, apresentou valores acima das metodologias de CIBIOGÁS (2009) e IPCC (2006) e abaixo das demais, tornando-se a metodologia mais próxima da média estabelecida entre as cinco estudadas.

A produção de resíduos dos abatedouros de suínos foi estimada baseando-se nos dados obtidos para o número de suínos abatidos e o consumo de água nos processos envolvidos. Com isso, a faixa de produção de efluentes obtida para o Brasil em 2018 foi de 17,7 milhões a 53 milhões de metros cúbicos por ano, sendo o consumo de água no abate de suínos variado de 400 a 1.200 litros por animal abatido.

No que diz respeito a produção de biogás no abate, a análise foi realizada considerando três metodologias. A primeira, desenvolvida pelo *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC, 2006), e que tem como base a DQO como parâmetro para medição de matéria orgânica, além de utilizar padrões internacionais para as variáveis utilizadas, apresentou os maiores resultados para obtenção de biogás. A segunda metodologia estudada foi publicada pela CETESB (2006), que utiliza a DBO como fator de conversão, na qual foi obtido o menor resultado para o Brasil e regiões dentre as metodologias analisadas. A última, desenvolvida por Coelho et al. (2020), que também apresenta a DQO como principal fundamento dos cálculos, foi a metodologia que apresentou um resultado intermediário, próximo a média de todas estas.

O aproveitamento energético foi dividido em potencial de produção de energia elétrica e conversão do biogás em biometano. Essas análises foram realizadas considerando todas as metodologias estudadas e aplicadas para a criação e abate, obtendo-se resultados para cada uma delas. Foi utilizada a base de dados para o consumo de energia elétrica e gás natural fornecida pelo Governo do Estado de São Paulo, pois essa informação não está disponível em todas as Regiões e Estados. Para a conversão de biogás em energia elétrica, a criação de suínos apresentou valores de

1,6 milhões a 2,9 milhões de MWh por ano. Já para o abate, a faixa obtida variou de 44 mil a 152 mil de MWh por ano. Para o biometano, o intervalo de produção para a criação de suínos ficou entre 436 milhões e 1,2 bilhões de m^3/ano e de 12 milhões a 41 milhões de m^3 por ano para o abate.

As metodologias obedecem a parâmetros únicos e obtidos por meio de experimentos e análises próprias, considerando que algumas das suas variáveis se repetem entre os estudos, mas apresentam valores diferentes. Esses resultados divergentes decorrem pela variabilidade dos parâmetros, não estabelecendo a mesma base para comparação de outras variáveis. Os principais exemplos são a capacidade máxima de produção de metano, presente nas metodologias de criação e abate, e a DQO e DBO, presentes nas metodologias para abate. Ambos são responsáveis pelas divergências expressivas entre os resultados obtidos, evidenciando a importância da caracterização e definição dos resíduos e sua composição.

O potencial de produção de biogás a partir da cadeia da suinocultura no Brasil é alto, e é uma alternativa na substituição dos combustíveis fósseis, visto que a produção de metano nesta cadeia é expressiva. A ampla produção e utilização de biogás no país provocaria como efeitos: um aumento da segurança energética do país; uma diminuição considerável das emissões de gases de efeito estufa na atmosfera; uma diminuição dos problemas ambientais relacionados a má disposição dos dejetos; além de contribuir para a geração de emprego e renda. Porém, o aproveitamento dos resíduos para a produção de biogás é ainda mínimo. Este cenário é causado principalmente pela falta de incentivos fiscais a esta forma de energia. Sendo assim, estudos que mostrem formas de viabilizar e incentivar o aproveitamento de dejetos para a geração de biogás devem ser desenvolvidos.

8. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Como sugestão para trabalhos futuros, apresentam-se algumas ideias. Neste trabalho, mantiveram-se todos os parâmetros determinados pelos autores em suas respectivas metodologias. Desta forma, como sugestão, podem ser variados os parâmetros pré-estabelecidos, trazendo-os à mesma base para avaliação do impacto das demais variáveis, como a capacidade máxima de produção de metano e os valores de sólidos voláteis. Além disso, as metodologias podem ser aplicadas à um estudo de caso para validação dos resultados obtidos no caso teórico com o caso real.

Ainda, os coeficientes e parâmetros utilizados nas metodologias poderiam ser reavaliados e redimensionados, levando em consideração o desenvolvimento das técnicas e tecnologias envolvidas. E, por fim, sugere-se a realização de uma projeção para o aproveitamento energético do biogás obtido na criação e no abate de suínos, considerando o desenvolvimento dessa indústria, e qual seria o impacto deste no cumprimento dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável firmados pelo Brasil durante a Conferência das Partes de Paris (COP21).

9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABPA - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE PROTEÍNA ANIMAL. **Relatório Anual 2019**. Disponível em: <http://abpa-br.org/wp-content/uploads/2019/08/Relatório-Anual-2019.pdf>. Acesso em: 22 abr. 2020.

ALVEZ, P. **Carta Conjuntura - A crise da suinocultura brasileira - Scot Consultoria**. Disponível em: <https://www.scotconsultoria.com.br/noticias/artigos/25222/carta-conjuntura---a-crise-da-suinocultura-brasileira.htm>. Acesso em: 18 abr. 2020.

AMARAL, A. L. et al. Boas Práticas de Produção de Suínos. **Circular Técnica - Embrapa Suínos e Aves**, v. 50, p. 1–60, 2006.

AMARAL, A. C. DO et al. Influence of solid-liquid separation strategy on biogas yield from a stratified swine production system. **Journal of Environmental Management**, v. 168, p. 229–235, 2016.

ANGONESE, A. R. et al. Avaliação da eficiência de um biodigestor tubular na redução da carga orgânica e produção de biogás a partir de dejetos suínos. **Enc. Energ. Meio Rural**, n. 6, 2006.

AROUCA, C. L. C. et al. Desempenho, morfometria de órgãos e histologia intestinal de suínos na fase de terminação tardia alimentados com cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Saúde e Produção Animal**, v. 13, n. 4, 2012.

ARRIETA, E. M.; GONZÁLEZ, A. D. Energy and carbon footprints of chicken and pork from intensive production systems in Argentina. **Science of the Total Environment**, v. 673, p. 20–28, 2019.

ASAE - AMERICAN SOCIETY OF AGRICULTURAL ENGINEERS. Manure Production and Characteristics. **ASAE D384.1**, v. 1, p. 4, 2003.

ASAE - AMERICAN SOCIETY OF AGRICULTURAL ENGINEERS. Manure production and characteristics. **ASABE Standard D384. 2. American Society of Agricultural and Biological Engineers. St. Joseph, MI**, 2005.

BARBOSA, G.; LANGER, M. Uso de biodigestores em propriedades rurais: uma alternativa à sustentabilidade ambiental. **Unoesc e Ciência – ACSA**, v. 2, n. 1, p. 87–95, 2011.

BATALHA, M. O.; SILVA, A. L. Gerenciamento de sistemas agroindustriais: definições, especificidades e correntes metodológicas. **Gestão Agroindustrial**, v. 3, p. 1–62, 2007.

BELLI FILHO, P. et al. Tecnologias para o tratamento de dejetos de suínos. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 5, n. 1, p. 166–170, 2001.

BORGES, C. P. **Sistema tecnológico de inovação do biogás do Brasil : Uma análise funcional e prospectiva**. 211 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção). Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2020.

BRASIL. **Suinocultura de Baixa Emissão de Carbono**. 1. ed. Brasília: EMBRAPA, 2016.

BRASIL, M. DE M. E E. **Gás para crescer - Anexo 6 - Proposta ABIOGÁS - O biometano na matriz energética Brasileira**. Disponível em: <http://www.mme.gov.br/documents/36216/940374/participacao_pdf_0.5922977368934383.pdf/1dff6bca-75be-f62a-e4ba-75f0026beef4>. Acesso em: 1 nov. 2020.

BRASIL, M. DO M. A. **Acordo de Paris**. Disponível em: <https://www.mma.gov.br/clima/convencao-das-nacoes-unidas/acordo-de-paris>. Acesso em: 7 jun. 2020.

BRONDANI, J. C. **Biodigestores e biogás: balanço energético, possibilidades de utilização e mitigação do efeito estufa**. 118 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção). Universidade Federal de Santa Catarina, Santa Maria, 2010.

CAETANO, L. **Metodologia para estimativa da produção contínua de biogás em biodigestores modelo indiano.** 112 f. Tese (Doutorado em Agronomia - Energia na Agricultura) - Faculdade de Ciências Agronômicas. Universidade Estadual Paulista, Botucatu 1991.

CAMPOS, A. T. et al. Análise energética de biodigestores tubulares usando dejetos de suínosS. **ncontro de Energia no Meio Rural**, n. 5, p. 1–6, 2004.

CARVALHO, P.L.C; VIANA, E. DE F. Suinocultura SISCAL e SISCON: análise e comparação dos custos de produção. **Custos e Agronegócio online**, v. 7, n. 3, p. 2–20, 2011.

CASSINI, S. T.; VOZOLLER, R. F.; PINTO, M. T. **Digestão de resíduos sólidos orgânicos e aproveitamento do Biogás**. Rio de Janeiro: ABES/RIMA, 2003.

CETESB - COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL. **Caracterização, reaproveitamento e tratamento de resíduos de frigoríficos, abatedouros e graxarias.** São Paulo: CETESB, 1993.

CETESB - COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL. **Manual do Usuário do Programa de Computador – Biogás – Geração e Suo Energético versão 1.0.** SMA : CETESB, São Paulo, 2006.

CETESB - COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL. **Biogás**. Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br/biogas/>. Acesso em: 5 nov. 2020.

CHEN, Y. R. Kinetic analysis of anaerobic digestion of pig manure and its design implications. **Agricultural Wastes**, v. 8, n. 2, p. 65–81, 1983.

CIBIOGÁS - CENTRO INTERNACIONAL DE ENERGIAS RENOVÁVEIS. **Manual de Equações e Metodologias do Simulador**. Plataforma de Informações para Energias Renováveis. Foz do Iguaçu: CIBIOGAS-ER, 2009.

COELHO, S. T. et al. A conversão da fonte renovável biogás em energia. *In*: **Congresso Brasileiro de Planejamento Energético (CBPE)**, nº 12, p. 5, 2006.

COELHO, S. T. et al. **Atlas de bioenergia do Brasil**. Projeto Fortalecimento Institucional do CENBIO, Convênio 721606/2009 - MME. São Paulo, 2012.

COELHO, S. T. et al. **Tecnologias de Produção e Uso de Biogás e Biometano**. São Paulo: Synergia Editora, 2018. v. 1

COELHO, S. T.; GARCILASSO V. P.; SANTOS, M. M.; ESCOBAR, J. F.; PERECIN,

D.; SOUZA, D. B. **Atlas de Bioenergia do Estado de São Paulo**. 1 ed. São Paulo: IEE Instituto de Energia e Meio Ambiente da Universidade de São Paulo, 2020.

COLUNA, N. M. E. **Análise Do Potencial Energético Dos Resíduos Provenientes Da Cadeia Agroindustrial Da Proteína Animal No Estado De São Paulo**. 136 f. Dissertação (Mestrado em Ciências) - Pós-Graduação em Energia. Instituto de Energia e Ambiente da Universidade de São Paulo, 2016.

CORTEZ, L. A. B.; LORA, E. E. S.; GÓMEZ, E. O. **Biomassa para energia**. Campinas: Editora da Unicamp, 2008.

COSTA, G. S. DA; MARVULLI, M. V. N. Soluções alternativas para o tratamento, disposição ou reutilização de dejetos animais provenientes de atividade suinícola no Brasil. **Brazilian Journal of Animal and Environmental Research**, v. 3, n. 3, p. 1471–1479, 2020.

DARTORA, V.; PERDOMO, C. C.; TUMELERO, I. L. Manejo de dejetos suínos. **BIPERS**, v. 7, n. 11, p. 41, 1998.

DIAS, A. C. et al. Manual brasileiro de boas práticas agropecuárias na produção de suínos. **Concórdia: Embrapa Suínos e Aves.**, p. 140, 2011.

FÁVERO, J. A. et al. **Embrapa - Produçao Suínos**. Disponível em: <http://www.cnpsa.embrapa.br/SP/suinos/autores.html>. Acesso em: 20 mar. 2020.

FEPAM - FUNDAÇÃO ESTADUAL DE PROTEÇÃO AMBIENTAL HENRIQUE LUÍS ROESSLER. **Critérios técnicos para o licenciamento ambiental de novos empreendimentos destinados à suinocultura**. Porto Alegre: FEPAM, 2014.

FERREIRA, A. H. et al. Produção de suínos: teoria e prática. **Brasília: ABCS**, 2014.

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**, v. 94, n. June, p. 440–455, 2018.

FREIRE, W. J. **Aproveitamento de resíduos animais**. Botucatu: UNESP, 1985 98 p. Apostila.

FREITAS, F. F. et al. The Brazilian market of distributed biogas generation: Overview, technological development and case study. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 101, n. June 2018, p. 146–157, 2019.

GIZ. **Guia Prático do Biogás - Geração e Utilização**. 5. ed. Gulzow: Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. (FNR), 2010.

GREENHOUSE GAS PROTOCOL. The IPCC fifth assessment report. **Carbon Management**, v. 5, n. 1, p. 17–25, 2014.

GUIMARÃES, D. et al. Suinocultura: Estrutura da Cadeia Produtiva, Panorama do Setor no Brasil e no Mundo e o Apoio do BNDES. **BNDES Setorial**, v. 45, p. 85–136, 2017.

GUSMÃO, M. M. F. C. C. **Produção de biogás em diferentes sistemas de criação de suínos em Santa Catarina.** 170 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental). Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2008.

HAMILTON, D. W. **Anaerobic digestion of animal manures: methane production potential of wastes materials**. Oklahoma State University: Division of Agricultural Sciences and Natural Resources: BAE-1762, 2012.

HOLLIGER, Christof et al. Towards a standardization of biomethane potential tests. **Water Science and Technology**, v. 74, n. 11, p. 2515-2522, 2016.

IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Produção da pecuária municipal**. Rio de Janeiro: IBGE, 2018.

IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Indicadores IBGE - Estatística da Produção Pecuária. Rio de Janeiro: IBGE, 2019.

ICLEI - BRASIL. GOVERNOS LOCAIS PELA SUSTENTABILIDADE. Governos Locais pela Sustentabilidade. Manual para aproveitamento do biogás: volume I, Aterros Sanitários. **Secretariado para América Latina e Caribe, Escritórios de projetos no Brasil, São Paulo**, 2009.

IEA - INTERNACIONAL ENERGY AGENCY. **Outlook for biogas and biomethane: Prospects for organic growth. World Energy Outlook special report: 2020**.

Disponível em: <https://www.iea.org/reports/outlook-for-biogas-and-biomethane-prospects-for-organic-growth>. Acesso em: 1 nov. 2020.

IPCC - INTERGOVERMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. Emissions from livestock and manure management. In: **IPCC Guideliness for National Greenhouse Gas Inventories**. Hayama: Institute for Global Environmental Strategies, 2006. p. 10.1–10.87.

ITO, M.; GUIMARÃES, D. D.; AMARAL, G. F. Impactos ambientais da suinocultura: desafios e oportunidades. **BNDES Setorial**, v. 44, p. 125–156, 2016.

JÚNIOR, M. A. P. O.; ORRICO, A. C. A.; JÚNIOR, J. D. L. Produção animal e o meio ambiente: uma comparação entre potencial de emissão de metano dos dejetos e a quantidade de alimento produzido. **Engenharia Agrícola**, v. 31, n. 2, p. 399–410, 2011.

KAZMIERCZAK, T. et al. Estimativa teórica da Produção de Biogás A Partir de Efluente Procedente De Abatedouro De Suínos E Aves No Município De Videira - Sc (Estudo De Caso). **Ignis Caçador**, v. 5, n. 1, p. 5–17, 2016.

KIREGER, E. I. F. **Avaliação do consumo de água, racionalização do uso e reúso do efluente líquido de um frigorífico de suínos na busca da sustentabilidade socioambiental da empresa**. Tese (Doutorado em Ciências Biológicas). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2007.

KONZEN, E. A. **Avaliação quantitativa e qualitativa dos dejetos de suínos em crescimento e terminação, manejados em forma líquida**. 56 p. Mestrado (Veterinária). Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 1980.

KONZEN, E. A. Manejo e utilização dos dejetos de suínos. **Embrapa Suínos e Aves-Circular Técnica (INFOTECA-E)**, 1983.

KONZEN, E. A. Alternativas de manejo, tratamento e utilização de dejetos animais em sistemas integrados de produção. **Embrapa Milho e Sorgo-Documentos (INFOTECA-E)**, 2000.

KOTZ, A.; SCHMITZ, M.; MATIELLO, S. **Estimativa da produção de biogás a partir**

de dejetos suínos: avaliação da eficiência energética do metano e a geração de créditos de carbono. 71 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Tecnologia em Gestão Ambiental). Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Medianeira, 2011.

KUNZ, A. et al. Recomendações técnicas para uso de esterqueiras para a armazenagem de dejetos de suínos. **Comunicado Técnico, Concórdia: Embrapa Suínos e Aves**, n. 361, p. 1–4, 2004.

KUNZ, A.; HIGARASHI, M. M.; OLIVEIRA, P. A. DE. Tecnologias de manejo e tratamento de dejetos de suínos estudadas no Brasil. **Cadernos de Ciência e Tecnologia**, v. 22, n. 3, p. 651–665, 2005.

KUNZ, A.; OLIVEIRA, P. A. V. DE. Aproveitamento de dejetos de animais para geração de biogás. **Revista de Política Agrícola**, v. 15, n. 3, p. 28–35, 2006.

LASSALETTA, L. et al. Future global pig production systems according to the Shared Socioeconomic Pathways. **Science of the Total Environment**, v. 665, p. 739–751, 2019.

LEITE, V. D.; POVINELLI, J. Comportamento dos sólidos totais no processo de digestão anaeróbia de resíduos sólidos urbanos e industriais. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 3, n. 2, p. 229–232, 1999.

LOPES, C. R. M.; FILHO, N. R. A.; ALVES, M. I. R. A. Impactos ambientais e sociais causados por voláteis emanados por excretos de suínos. **Enciclopédia Biosfera, Centro Científico Conhcer, Goiânia**, v. 9, n. 17, p. 3556–3565, 2013.

LUCAS JUNIOR, J. DE. **Manejo de dejetos em suinocultura: biodigestores**. Jaboticabal: FCAV/UNESP, 2004.

MALLMANN, F. J. K. et al. Soil tillage to reduce surface metal contamination - model development and simulations of zinc and copper concentration profiles in a pig slurry-amended soil. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v. 196, p. 59–68, 2014.

MARTINS, F. M.; OLIVEIRA, P. A. V. Análise econômica da geração de energia elétrica a partir do biogás na suinocultura. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 31,

n. 3, p. 477-486, maio/jun. 2011.

MEES, J. B. R. **Uso de aguapé (Eichhornia crassipes) em sistema de tratamento de efluente de matadouro e frigorífico e avaliação de sua compostagem**. 56 f. Mestrado (Dissertação em Engenharia Agrícola). Universidade Estadual do Oeste do Parana, Cascavel, 2006.

MELZ, L. J.; GASTARDELO, T. A. R. A suinocultura industrial no mundo e no Brasil. **Revista UNEMAT de contabilidade**, v. 3, n. 6, 2014.

MENEZES, J. F. S. et al. **Cama-de-frango na agricultura: perspectivas e viabilidade técnica e econômica.** Rio Verde: Fundação do Ensino Superior de Rio Verde, 2004.

MERKEL, J. A. **Managing livestock wastes.** Westport: AVI Publishing Company, Inc., 1981.

MIELE, M. **Contratos, especialização, escala de produção e potencial poluidor na suinocultura de Santa Catarina**. 278 f. Tese (Doutorado em Agronegócios). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2006.

MIELE, M.; WAQUIL, P. D. Cadeia produtiva da carne suína no Brasil. **Revista de Política Agrícola**, v. 16, n. 1, p. 75–87, 2007.

MIRANDA, A. P. **Suínos em diferentes fases de crescimento alimentados com milho ou sorgo: desempenho, digestibilidade e efeitos na biodigestão anaeróbia**. 123 f. Tese (Doutorado em Zootecnia). Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Jaboticabal, 2009.

MITO, J. Y. DE L. et al. Metodologia para estimar o potencial de biogás e biometano a partir de plantéis suínos e bovinos no Brasil. **Embrapa Suínos e Aves-Documentos (INFOTECA-E)**, 2018.

MØLLER, H. B.; SOMMER, S. G.; AHRING, B. K. Methane productivity of manure, straw and solid fractions of manure. **Biomass and Bioenergy**, v. 26, n. 5, p. 485–495, 2004.

MOTTA, K. U. **Avaliação da geração de biogás de um biodigestor de dejetos**

bovinos e suínos. 126 f. Dissertação (Mestrado em Meio Ambiente Urbano e Industrial). Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2014.

NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES. **Methane Generation from Human, Animal, and Agricultural Wastes**. Washington: National Academies, 1977.

OECD - ORGANISATION FOR ECONOMIC CO-OPERATION AND DEVELOPMENT. **Agriculture, Trade and the Environment: The Pig Sector**. Paris: OECD, 2003.

OLIVEIRA, P. A. V. DE. Modelo matemático para estimar a evaporação d'água contida nos dejetos, em sistemas de criação de suínos sobre cama de maravalha e piso ripado, nas fases de crescimento e terminação. **Journal of the Brazilian Society of Agricultural Engineering**, v. 23, n. 3, p. 398–626, 2003.

OLIVEIRA, R. D. E. **Geraçao de energia elétrica a partir do biogas produzido pela fermentação anaeróbica de dejetos em abatedouros e as possibilidades no mercado de carbono**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação). Universidade de São Paulo, São Paulo 2009.

OLIVEIRA, P. A. V. **Manual de manejo e utilização dos dejetos de suínos.** Embrapa Suínos e Aves-Documentos (INFOTECA-E), Concórdia, 1993.

OLIVEIRA, P. A. V. **Projeto de biodigestor e estimativa da produção de biogás em sistema de produção.** Embrapa Suínos e Aves-Comunicado Técnico (INFOTECA-E). Concórdia, 2005.

OLIVEIRA, P. A. V; NUNES, M. L. A. Sustentabilidade ambiental da suinocultura. **Embrapa Suínos e Aves**, p. 16, 2002.

ORSSATTO, F. **Otimização do tratament de efluente de matadouro e frigorífico de suínos pela eletrofloculação e combinação eletrofloculação/coagulação orgânica**. 102 f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola). Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Cascavel, 2017.

PACHECO, J. W.; YAMANAKA, H. T. Guia técnico ambiental de abates (bovino e suíno). **São Paulo: CETESB**, 2006.

PERDOMO, C. C. et al. Dimensionamento de sistemas de tratamento (decantador e

lagoas) e utilização de dejetos suínos. **Embrapa Suínos e Aves-Comunicado Técnico (INFOTECA-E)**, 1999.

PERDOMO, C. C.; LIMA, G. J. M. M.; NONES, K. **Produção de suínos e meio ambiente**. *In:* **9° Seminário Nacional de Desenvolvimento da Suinocultura**, n° 9, Gramado, 2001.

PRA, M. A. D. et al. Compostagem de dejetos líquidos de suínos. **Embrapa Milho e Sorgo-Documentos (INFOTECA-E)**, 2005.

RIBEIRO, M. DE F. DOS S.; RAIHER, A. P. Potentialities of energy generation from waste and feedstock produced by the agricultural sector in Brazil: The case of the State of Paraná. **Energy Policy**, v. 60, p. 208–216, 2013.

ROHR, S. A.; COSTA, O. A. D.; COSTA, F. A. D. Bem-estar animal na produção de suínos: toda a granja. **Embrapa Suínos e Aves-Fôlder/Folheto/Cartilha (INFOTECA-E)**, 2016.

ROMANIW, J. et al. Impacto Do Uso De Resíduo Orgânico De Abatedouro De Aves E Suínos Na Percolação De Nitrato No Solo. **Synergismus scyentifica UTFPR**, v. 9, n. 1, p. 9–14, 2014.

RUIZ, U. S. **Complexo enzimático para suínos: digestão, metabolismo, desempenho e impacto ambiental**. 71 f. Dissertação (Mestrado em Zootecnia). Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Jaboticabal, 2006.

SAGASTUME GUTIERREZ, A. et al. Environmental assessment of pig production in Cienfuegos, Cuba: Alternatives for manure management. **Journal of Cleaner Production**, v. 112, p. 2518–2528, 2016.

SALOMON, K. R.; LORA, E. E. S. Estimativa do Potencial de Geração de Energia Elétrica para Diferentes Fontes de Biogás no Brasil - Energetic Potential Estimate for Electric Energy Generation of Different Sources of Biogas in Brazil. **Biomassa & Bioenergia**, v. 2, n. 1, p. 57–67, 2005.

SAMWAYS, A. R.; MICHALOSKI, A. O. Saúde e Segurança na Suinocultura no Brasil: um levantamento dos riscos ocupacionais. **Revista Espacios**, v. 38, n. 11, p. 13, 2017.

SANTINI, G. A.; FILHO, H. M. S. **Mudanças tecnológicas em cadeias agroindustriais: uma análise dos elos de processamento da pecuária de corte, avicultura de corte e suinocultura**. *In*: **Congresso da Sociedade Brasileira de Economia Rural**, v. 42, p. 1–12, 2004.

SANTOS, A. R. DOS. **Rastreabilidade" do laboratório à mesa": um estudo da cadeia produtiva da indústria de carne suína na empresa Doux**. 115 f. Dissertação (Mestrado em Administração). Universidade de Caxias do Sul, Caxias do Sul, 2014.

SCARASSATI, D. et al. Tratamento De Efluentes De Matadouros E Frigoríficos. **III Fórum de Estudos Contábeis**, v. d, p. 9, 2003.

SCHERER, E. E.; AITA, C.; BALDISSERA, I. T. **Avaliação da qualidade do esterco líquido de suínos da Região Oeste Catarinense para fins de utilização como fertilizanteEPAGRI**. Florianópolis: EPAGRI, 1996.

SCHNEIDER, V. E. et al. **Diagnóstico dos resíduos orgânicos do setor agrossilvopastoril e agroindustriais associadas**. Brasília: Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (Ipea), 2012.

SEEG, S. DE E. DE E. E R. DE G. DE E. E. **Emissões pelo manejo de dejetos de animais**. Disponível em: <http://seeg.eco.br/o-que-e-o-seeg>. Acesso em: 30 out. 2020.

SEGAT, J. C. et al. Disentangling the effects of the aqueous matrix on the potential toxicity of liquid pig manure in sub-tropical soils under semi-field conditions. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, v. 168, n. May 2018, p. 457–465, 2019.

SILVA, C. L.; BASSI, N. S. S.; NASCIMENTO, D. E. A implementação de políticas públicas pelas instituições públicas de pesquisa: um estudo sobre pesquisas e tecnologias da Embrapa Suínos e Aves para mitigação do impacto ambiental da suinocultura no oeste catarinense. **Embrapa Suínos e Aves-Artigo em periódico indexado (ALICE)**, v. 32, 2011.

SILVA, G. A; MORAIS JUNIOR, J A.; ROCHA, E. R. Proposta de procedimento operacional padrão para o teste do Potencial Bioquímico do Metano aplicado a resíduos sólidos urbanos. Engenharia Sanitária e Ambiental, v. 21, n. 1, p.11-16, mar.

2016.

SILVA, V. P. et al. Uso De Farelo De Biscoito, Farelo De Macarrão E Farelo De Coco Na Alimentação De Suínos. **ANAIS SIMPAC**, v. 9, n. 1, 2018.

SIMA - SECRETARIA DE INFRAESTRUTURA E MEIO AMBIENTE. **Ranking Paulista de Energia**. Disponível em: <http://dadosenergeticos.energia.sp.gov.br/Portalcev2/Municipios/ranking/index.html>. Acesso em: 12 out. 2020.

SOUZA, S. N. M. DE et al. Custo da eletricidade gerada em conjunto motor gerador utilizando biogás da suinocultura. **Acta Scientiarum Technology**, v. 26, n. 2, p. 127–133, 2004.

TAVARES, A. P.; CHRISTMANN, J. A. **Tratamento e reuso de água em abatedouro de suínos**. 47 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Gestão Ambiental). Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Medianeira, 2013.

TAVARES, J. M. R. **Modelagem do consumo de água, produção de dejetos e emissão de gases de efeito estufa e amônia na suinocultura**. 229 f. Tese (Doutorado em Engenharia Ambiental). Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2016.

TRICHES, D. et al. A cadeia produtiva de carne suína no estado do Rio Grande do Sul e na serra gaúcha. **In: XLIV Congresso da Sociedade Brasileira de Economia e Sociologia Rural – SOBER**, p. 1–20, 2006.

UNEP - UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME; DEPA - DANISH ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY; COWI. Cleaner production assessment in meat processing. **UNEP DTIE, DEPA, Denmark**, p. 1–101, 2000.

USDA - U. S. DEPARTMENT OF AGRICULTURE. Livestock and poultry: world markets and trade. **United States Department of Agriculture and Foreign Agricultural Service**, p. 31, 2020.

USDE - U. S. DEPARTMENT OF ENERGY. **Handbook of biogas utilization, Southeastern Regional Biomass Energy Program**. 2. ed. Washington: USDE, 1996.

VIEIRA, F. D.; FRANCISCO, A. C. DE; BITTENCOURT, J. V. M. Biometano e biogás como fontes de energia sustentável e ecologicamente viável. **Espacios**, v. 37, n. 18, p. 9, 2016.

VIEIRA, H. G.; POLLI, H. Q. BIOGAS AS AN ALTERNATIVE SOURCE OF ENERGY. **Interface Tecnológica**, v. 1, n. 2020, p. 388–400, 2020.

WEREKO-BROBBY, C.; HAGAN, E. B. **Biomass conversion and technology**. New York: John Wiley e Sons, 1996.

ZADINELO, I. V. et al. Potencial da produção de biogás a partir de efluente pré-tratado de abatedouro de aves da região Oeste do Paraná. **Revista Brasileira de Energias Renováveis**, v. 2, n. 1, 2013.

ZANATO, J. A. F. **Produção e qualidade do biogás gerado com os dejetos de diferentes espécies animais**. 112 f. Tese (Doutorado em Zootecnia). Universidade Estadual Paulista, Jaboticabal, 2014.

ZANOTTO, D. L. et al. Utilização de flotado industrial de frigorífico na produção de farinha de carne e osso desti-nada a alimentação de suínos. **Embrapa Suínos e Aves-Comunicado Técnico (INFOTECA-E)**, Comunicado Técnico 564, Concórdia, 2019.

10. ANEXOS

Tabela 19 - Síntese dos potenciais de biogás, biometano e energia elétrica para o Brasil e Regiões para criação de suínos - Metodologia de Chen (1983)

País / Grandes Regiões	Nº de suínos	Volume de biogás (m³/ano)	Volume de biometano (m³/ano)	Potencial de Energia Elétrica (MWh/ano)
Brasil	**41.443.594**	**1.279.446.718**	**791.410.341**	**2.946.655**
Norte	1.563.123	48.256.736	29.849.528	111.139
Nordeste	5.740.314	177.214.985	109.617.517	408.139
Sudeste	7.006.826	216.314.746	133.802.936	498.188
Sul	20.594.238	635.785.357	393.269.293	1.464.258
Centro-Oeste	6.539.093	201.874.892	124.871.067	464.932

Fonte: Elaboração própria.

Tabela 20 - Síntese dos potenciais de biogás, biometano e energia elétrica para o Brasil e Regiões para criação de suínos - Metodologia de Kunz e Oliveira (2006)

País / Grandes Regiões	Nº de suínos	Volume de biogás (m³/ano)	Volume de biometano (m³/ano)	Potencial de Energia Elétrica (MWh/ano)
Brasil	**41.443.594**	**1.177.790.471**	**728.530.188**	**2.712.534**
Norte	1.563.123	44.422.580	27.477.885	102.308
Nordeste	5.740.314	163.134.672	100.908.045	375.711
Sudeste	7.006.826	199.127.829	123.171.853	458.605
Sul	20.594.238	585.270.121	362.022.755	1.347.918
Centro-Oeste	6.539.093	185.835.269	114.949.651	427.992

Fonte: Elaboração própria.

Tabela 21 - Síntese dos potenciais de biogás, biometano e energia elétrica para o Brasil e Regiões para criação de suínos - Metodologia de IPCC (2006)

País / Grandes Regiões	Nº de suínos	Volume de biogás (m³/ano)	Volume de biometano (m³/ano)	Potencial de Energia Elétrica (MWh/ano)
Brasil	**41.443.594**	**712.769.451**	**440.888.320**	**1.641.558**
Norte	1.563.123	26.883.439	16.628.931	61.914
Nordeste	5.740.314	98.725.040	61.067.035	227.371
Sudeste	7.006.826	120.507.201	74.540.537	277.537
Sul	20.594.238	354.190.896	219.087.152	815.726
Centro-Oeste	6.539.093	112.462.875	69.564.665	259.010

Fonte: Elaboração própria.

Tabela 22 - Síntese dos potenciais de biogás, biometano e energia elétrica para o Brasil e Regiões para criação de suínos - Metodologia de CIBIOGAS (2009)

País / Grandes Regiões	Nº de suínos	Volume de biogás (m³/ano)	Volume de biometano (m³/ano)	Potencial de Energia Elétrica (MWh/ano)
Brasil	**41.443.594**	**704.965.480**	**436.061.122**	**1.623.585**
Norte	1.563.123	26.589.097	16.446.864	61.237
Nordeste	5.740.314	97.644.119	60.398.424	224.881
Sudeste	7.006.826	119.187.792	73.724.407	274.498
Sul	20.594.238	350.312.931	216.688.411	806.795
Centro-Oeste	6.539.093	111.231.541	68.803.015	256.174

Fonte: Elaboração própria.

Tabela 23 - Síntese dos potenciais de biogás, biometano e energia elétrica para o Brasil e Regiões para criação de suínos - Metodologia de Coelho et al. (2012)

País / Grandes Regiões	Nº de suínos	Volume de biogás (m³/ano)	Volume de biometano (m³/ano)	Potencial de Energia Elétrica (MWh/ano)
Brasil	**41.443.594**	**911.214.734**	**563.637.980**	**2.098.591**
Norte	1.563.123	34.368.175	21.258.665	79.152
Nordeste	5.740.314	126.211.513	78.068.977	290.674
Sudeste	7.006.826	154.058.142	95.293.696	354.807
Sul	20.594.238	452.802.745	280.084.172	1.042.836
Centro-Oeste	6.539.093	143.774.159	88.932.470	331.122

Fonte: Elaboração própria.

Tabela 24 - Síntese dos potenciais de biogás, biometano e energia elétrica para o Brasil e Regiões para abate de suínos - Metodologia de IPCC (2006)

País / Grandes Regiões	Nº de suínos	Volume de biogás (m³/ano)	Volume de biometano (m³/ano)	Potencial de Energia Elétrica (MWh/ano)
Brasil	**44.200.000**	**65.970.149**	**40.806.278**	**151.934**
Norte	44.200	65.970	40.806	152
Nordeste	397.800	593.731	367.256	1.367
Sudeste	8.265.400	12.336.418	7.630.774	28.412
Sul	29.083.600	43.408.358	26.850.531	99.972
Centro-Oeste	6.409.000	9.565.671	5.916.910	22.030

Fonte: Elaboração própria.

Tabela 25 - Síntese dos potenciais de biogás, biometano e energia elétrica para o Brasil e Regiões para abate de suínos - Metodologia de CETESB (2006)

País / Grandes Regiões	Nº de suínos	Volume de biogás (m³/ano)	Volume de biometano (m³/ano)	Potencial de Energia Elétrica (MWh/ano)
Brasil	**44.200.000**	**19.094.400**	**11.810.969**	**43.976**
Norte	44.200	19.094	11.811	44
Nordeste	397.800	171.850	106.299	396
Sudeste	8.265.400	3.570.653	2.208.651	8.223
Sul	29.083.600	12.564.115	7.771.618	28.936
Centro-Oeste	6.409.000	2.768.688	1.712.591	6.376

Fonte: Elaboração própria.

Tabela 26 - Síntese dos potenciais de biogás, biometano e energia elétrica para o Brasil e Regiões para abate de suínos - Metodologia de Coelho et al. (2020)

País / Grandes Regiões	Nº de suínos	Volume de biogás (m³/ano)	Volume de biometano (m³/ano)	Potencial de Energia Elétrica (MWh/ano)
Brasil	**44.200.000**	**19.094.400**	**11.810.969**	**43.976**
Norte	44.200	19.094	11.811	44
Nordeste	397.800	171.850	106.299	396
Sudeste	8.265.400	3.570.653	2.208.651	8.223
Sul	29.083.600	12.564.115	7.771.618	28.936
Centro-Oeste	6.409.000	2.768.688	1.712.591	6.376

Fonte: Elaboração própria.