

**UNIVERSIDADE FEDERAL DA GRANDE DOURADOS
FACULDADE DE ADMINISTRAÇÃO, CIÊNCIAS CONTÁBEIS E ECONOMIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONEGÓCIOS**

**Estimativa de Emissões de GEE na Suinocultura Brasileira:
Desenvolvimento de um Protótipo de Aplicativo Baseado em ACV**

Cármem Lúcia Marques Martins

**DOURADOS-MS
2025**

UNIVERSIDADE FEDERAL DA GRANDE DOURADOS
FACULDADE DE ADMINISTRAÇÃO, CIÊNCIAS CONTÁBEIS E ECONOMIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONEGÓCIOS

**Estimativa de Emissões de GEE na Suinocultura Brasileira:
Desenvolvimento de um Protótipo de Aplicativo Baseado em ACV**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Agronegócios da Universidade Federal da Grande Dourados – Faculdade de Administração, Ciências Contábeis e Economia, para obtenção do Título de Mestre em Agronegócios.

**Discente: Cármem Lúcia Marques
Martins**

**Orientador: Prof. Dr. Clandio Favarini
Ruviaro**

DOURADOS-MS
2025

FICHA CATALOGRÁFICA

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP).

M386c Martins, Cármem Lúcia Marques
Estimativa de Emissões de GEE na Suinocultura Brasileira: Desenvolvimento de um Protótipo de Aplicativo Baseado em ACV [recurso eletrônico] / Cármem Lúcia Marques Martins. -- 2025. Arquivo em formato pdf.

Orientador: Cláudio Favarini Ruviaro.
Dissertação (Mestrado em Agronegócios)-Universidade Federal da Grande Dourados, 2025.
Disponível no Repositório Institucional da UF-GD em:
<http://portal.ufgd.edu.br/setor/biblioteca/repositorio>

1. Avaliação do ciclo de vida. 2. gases de efeito estufa. 3. suinocultura. 4. modelagem matemática. 5. R. Shny, I. Ruviaro, Cláudio Favarini, II. Título.

Ficha catalográfica elaborada automaticamente de acordo com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

©Direitos reservados. Permitido a reprodução parcial desde que citada a fonte.

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO



Ministério da Educação
Universidade Federal da Grande Dourados
PROPP - Pró-Reitoria de Ensino de Pós-Graduação e Pesquisa



ATA DA DEFESA DE DISSERTAÇÃO DE Mestrado APRESENTADA POR CÁRMEM LÚCIA MARQUES MARTINS, ALUNA DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONEGÓCIOS, ÁREA DE CONCENTRAÇÃO "AGRONEGÓCIOS E SUSTENTABILIDADE".

Aos dezoito dias do mês de julho do ano de dois mil e vinte e cinco, às nove horas, em sessão pública, realizou-se na Universidade Federal da Grande Dourados, a Defesa de Dissertação de Mestrado intitulada **"Estimativa de Emissões de GEE na Suinocultura Brasileira: Desenvolvimento de um Protótipo de Aplicativo Baseado em ACV"**, apresentada pela mestranda Cármem Lúcia Marques Martins, do Programa de Pós-graduação em Agronegócios, à Banca Examinadora constituída pelos membros: Prof. Dr. Cláudio Favarini Ruviaro/UFGD (presidente/orientador), Prof. Dr. Davi José Bungenstab/EMBRAPA (membro titular interno), Prof. Dr. Leonardo de Oliveira Seno/UFGD (membro titular externo). Iniciados os trabalhos, a presidência deu a conhecer à candidata e aos integrantes da banca as normas a serem observadas na apresentação da Dissertação. Após a candidata ter apresentado a sua Dissertação, os componentes da Banca Examinadora fizeram suas arguições. Terminada a Defesa, a Banca Examinadora, em sessão secreta, passou aos trabalhos de julgamento, tendo sido a candidata considerada **aprovada**. Nada mais havendo a tratar, lavrou-se a presente ata, que vai assinada pelos membros da Comissão Examinadora.

Dourados/MS, 18 de julho de 2025.

Prof. Dr. Cláudio Favarini Ruviaro
Presidente/orientador

Prof. Dr. Davi José Bungenstab
Membro Titular Interno

Prof. Dr. Leonardo de Oliveira Seno
Membro Titular Externo

(PARA USO EXCLUSIVO DA PROPP)



Ministério da Educação
Universidade Federal da Grande Dourados
Pró-Reitoria de Ensino de Pós-Graduação e Pesquisa



CERTIFICADO

Certificamos que LEONARDO DE OLIVEIRA SENO participou, como Membro Titular, da banca examinadora de defesa de dissertação de mestrado de CÁRMEM LÚCIA MARQUES MARTINS, do Programa de Pós-Graduação em Agronegócios, da Universidade Federal da Grande Dourados, com trabalho intitulado **Estimativa de Emissões de GEE na Suinocultura Brasileira: Desenvolvimento de um Protótipo de Aplicativo Baseado em ACV**, no dia 18 de julho de 2025.

Composição da banca:

Dr. Cláudio Favarini Ruviano - Presidente
Dr. Davi José Bungenstab - Membro Titular
Dr. Leonardo De Oliveira Seno - Membro Titular

Dourados/MS, 18 de julho de 2025.

A autenticidade desse documento pode ser confirmada na página de internet da Universidade Federal da Grande Dourados (UFGD), no endereço <http://sistemas.ufgd.edu.br/webdoc>, por meio do **Código de Controle: 150.571.993.000 - Data: 05/08/2025 - Hora: 10:10.**





Ministério da Educação
Universidade Federal da Grande Dourados
Pró-Reitoria de Ensino de Pós-Graduação e Pesquisa



CERTIFICADO

Certificamos que DAVI JOSÉ BUNGENSTAB participou, como Membro Titular, da banca examinadora de defesa de dissertação de mestrado de CÁRMEM LÚCIA MARQUES MARTINS, do Programa de Pós-Graduação em Agronegócios, da Universidade Federal da Grande Dourados, com trabalho intitulado **Estimativa de Emissões de GEE na Suinocultura Brasileira: Desenvolvimento de um Protótipo de Aplicativo Baseado em ACV**, no dia 18 de julho de 2025.

Composição da banca:

Dr. Cláudio Favarini Ruviano - Presidente

Dr. Davi José Bungenstab - Membro Titular

Dr. Leonardo De Oliveira Seno - Membro Titular

Dourados/MS, 18 de julho de 2025.

A autenticidade desse documento pode ser confirmada na página de internet da Universidade Federal da Grande Dourados (UFGD), no endereço <http://sistemas.ufgd.edu.br/webdoc>, por meio do Código de Controle: 107.754.751.500 - Data: 05/08/2025 - Hora: 10:09.





Ministério da Educação
Universidade Federal da Grande Dourados
Pró-Reitoria de Ensino de Pós-Graduação e Pesquisa



CERTIFICADO

Certificamos que CLANDIO FAVARINI RUVIARO participou, como Presidente/orientador, da banca examinadora de defesa de dissertação de mestrado de CÂRMEM LÚCIA MARQUES MARTINS, do Programa de Pós-Graduação em Agronegócios, da Universidade Federal da Grande Dourados, com trabalho intitulado **Estimativa de Emissões de GEE na Suinocultura Brasileira: Desenvolvimento de um Protótipo de Aplicativo Baseado em ACV**, no dia 18 de julho de 2025.

Composição da banca:

Dr. Claudio Favarini Ruviaro - Presidente

Dr. Davi José Bungenstab - Membro Titular

Dr. Leonardo De Oliveira Seno - Membro Titular

Dourados/MS, 18 de julho de 2025.

A autenticidade desse documento pode ser confirmada na página de internet da Universidade Federal da Grande Dourados (UFGD), no endereço <http://sistemas.ufgd.edu.br/webdoc>, por meio do Código de Controle: 112.484.717.900 - Data: 05/08/2025 - Hora: 10:10



EPÍGRAFE

“Entre a firmeza dos cascos e o silêncio da lama, estão as lições mais profundas da vida no campo: resistir, servir e seguir.”

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho aos meus amigos, pelo companheirismo e apoio sincero ao longo da jornada. Ao meu orientador, por todo o suporte, orientação e ajuda fundamentais durante o curso. Aos meus pais, pelo esforço, exemplo e pelo incentivo necessário para que eu continuasse mesmo nos momentos mais difíceis. Ao meu esposo, por estar ao meu lado com paciência, incentivo e amor em cada etapa, vocês fazem parte dessa conquista.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de expressar minha mais profunda gratidão aos professores que gentilmente aceitaram compor a banca de defesa, contribuindo com seu tempo e expertise para o aprimoramento deste trabalho. Agradeço também aos amigos que, com suas palavras de encorajamento e apoio ao longo do processo, foram fundamentais para superar os desafios dessa jornada. Aos meus pais por todo o apoio prestado, incentivo e suporte de sempre. Por fim, dedico um agradecimento especial ao meu esposo, cujo incentivo constante, paciência e parceria incondicional foram essenciais para que eu pudesse chegar até aqui.

Sumário

CAPÍTULO 1	18
CONSIDERAÇÕES INICIAIS	18
REFERÊNCIAS.....	22
CAPÍTULO 2	25
1. INTRODUÇÃO	27
2. REFERENCIAL TEÓRICO	28
2.1. <i>A Suinocultura Brasileira no Contexto Global e seus Desafios</i>	28
2.2. <i>Impactos Ambientais da Suinocultura</i>	29
2.3. <i>Diretrizes Internacionais para Avaliação de Emissões de GEE</i>	30
2.4. <i>Tecnologias e Estratégias de Mitigação</i>	31
3. MATERIAIS E MÉTODOS.....	32
3.1 <i>Referenciais Normativos, Protocolos e Bases de Dados</i>	33
3.2 <i>Delimitação do sistema de estudo</i>	33
3.3 <i>Etapas Metodológicas Adaptadas e Fluxograma</i>	35
3.4 <i>Modelagem Matemática e Equações-Chave</i>	38
3.4.1. <i>Balanço de Nitrogênio (N)</i>	38
3.4.2. <i>Balanço de Fósforo (P)</i>	39
3.4.3. <i>Excreção de Sólidos Voláteis (SV) e Metano (CH₄) dos Dejetos</i>	40
3.4.4. <i>Metano Entérico</i>	41
3.4.5. <i>Conversão de N₂O a partir de N</i>	42
3.5. <i>Sistemas de Manejo de Dejetos e Fatores MCF</i>	42
3.6. <i>Parâmetros Zootécnicos e Consumo de Ração</i>	44
3.7. <i>Desenvolvimento do Protótipo em R Shiny</i>	45
3.7.1. <i>Interface do Usuário</i>	46
3.7.2. <i>Lógica de Servidor</i>	46
3.7.3. <i>Saídas do Sistema</i>	47
4. RESULTADOS	47
4.1. <i>Caracterização do Ciclo de Produção de Suínos</i>	47
4.2. <i>Cálculo do Consumo de Ração</i>	49
4.3. <i>Inventário de Emissões de GEE da Suinocultura Brasileira</i>	50
4.3.1. <i>Cálculo da Excreção Total de Nitrogênio e Fósforo</i>	51
4.3.2. <i>Excreção de Sólidos Voláteis</i>	51
4.3.3. <i>Sólidos Voláteis Provenientes da Ração Não Consumida (VSWF)</i>	51
4.3.4. <i>Emissões de Metano a Partir de Sólidos Voláteis</i>	52
4.3.5. <i>Emissões de Óxido Nitroso no Manejo de Dejetos</i>	52
4.4. <i>Modelagem das Emissões de Metano Entérico na Suinocultura</i>	52
4.5. <i>Interface e Funcionalidades do Protótipo Computacional</i>	53

5.	DISCUSSÃO	58
	5.1. Limitações do Estudo e Perspectivas Futuras	60
6.	CONCLUSÃO	62
7.	REFERÊNCIAS	63

Estimativa de Emissões de GEE na Suinocultura Brasileira: Desenvolvimento de um Protótipo de Aplicativo Baseado em ACV

RESUMO - A suinocultura brasileira ocupa posição estratégica no agronegócio nacional, mas também se destaca como fonte relevante de emissões de gases de efeito estufa (GEE), principalmente associadas à produção de ração e ao manejo de dejetos. Diante das exigências globais por sustentabilidade e das metas assumidas pelo Brasil no Acordo de Paris, este estudo tem como objetivo desenvolver um protótipo de aplicativo interativo para estimar as emissões de GEE ao longo da cadeia produtiva da suinocultura, com base em parâmetros da Avaliação do Ciclo de Vida (ACV), conforme os protocolos da FAO (2018) e as diretrizes do IPCC (2006/2019). A metodologia adotada envolve: (i) adaptação de 13 etapas do protocolo FAO à realidade brasileira; (ii) construção de um inventário técnico de emissões segmentado por fase produtiva (reprodução, creche e terminação); (iii) modelagem matemática de fluxos de nitrogênio, fósforo, sólidos voláteis e metano entérico; e (iv) desenvolvimento de um sistema computacional em R Shiny com interface gráfica interativa. Os resultados indicam que a alimentação representa a maior fração das emissões, enquanto o manejo de dejetos é crítico para CH₄ e N₂O. Simulações no aplicativo revelaram o potencial mitigador de biodigestores de lagoa coberta e dietas otimizadas, reforçando a viabilidade de práticas mais sustentáveis. Conclui-se que a adaptação de protocolos internacionais ao contexto nacional é não apenas viável, mas essencial para a gestão ambiental da suinocultura, promovendo sua integração a mercados de carbono, programas ESG e políticas públicas climáticas.

Palavras-chave: Avaliação do ciclo de vida, gases de efeito estufa, suinocultura, sustentabilidade, i, R Shiny.

Estimating GHG Emissions in Brazilian Swine Farming: Developing an LCA-Based Application Prototype

ABSTRACT – Brazilian swine farming plays a strategic role in agribusiness but is also a significant emitter of greenhouse gases (GHGs), mainly from feed production and manure management. In light of increasing sustainability demands and Brazil's commitments under the Paris Agreement, this study aims to develop an interactive application prototype to estimate GHG emissions across the swine production chain, based on Life Cycle Assessment (LCA) parameters in accordance with FAO (2018) protocols and IPCC (2006/2019) guidelines. The methodology comprises: (i) adapting 13 key stages from the FAO protocol to Brazil's conditions; (ii) building a technical GHG inventory segmented by production phase (breeding, nursery, finishing); (iii) modeling nutrient and emission flows, including nitrogen, phosphorus, volatile solids, and enteric methane; and (iv) implementing a computational tool using R Shiny with a user-friendly interface. Results show feed as the dominant emission source, and manure management as critical for CH₄ and N₂O. Scenario simulations within the application demonstrated that covered lagoon biodigesters and optimized diets significantly reduce emissions while enabling energy recovery. The study concludes that adapting global methodologies to national contexts is both feasible and essential for environmental governance in swine farming, enabling alignment with carbon markets, ESG reporting frameworks, and national mitigation policies.

Keywords: Life cycle assessment, greenhouse gas emissions, swine farming, sustainability, mathematical modeling, R Shiny.

LISTAS DE ABREVIATURAS

ABCS	Associação Brasileira de Criadores de Suínos
ABPA	Associação Brasileira de Proteína Animal
ACV	Avaliação do Ciclo de Vida
CH₄	Metano
CO₂	Dióxido de Carbono
CSTR	Continuous Stirred-Tank Reactor
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
FAO	Food and Agriculture Organization
GEE	Gases de Efeito Estufa
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
LEAP	Low Emissions Analysis Platform
MAPA	Ministério da Agricultura e Pecuária
MCF	Methane Conversion Factor
MCTI	Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação
MMS	Sistema de Manejo de Dejetos (<i>Manure Management System</i>)
MS	Matéri Seca
N	Nitrogênio
NDCs	Contribuições Nacionalmente Determinadas
NH₃	Amônia
N₂O	Óxido Nitroso
ODS	Objetivos de Desenvolvimento Sustentável
P	Fósforo
PLANO ABC+	Plano de Agricultura de Baixa Emissão de Carbono
R Shiny	Framework para desenvolvimento web em R
SV	Sólidos Voláteis
UNDP	United Nations Development Programme
USDA	United States Department of Agriculture
UNFCCC	United Nations Framework Convention On Climate Change

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Distribuição dos sistemas de manejo de dejetos e fatores MCF adotados	43
Tabela 2 - Etapas, duração e fluxos de entrada e saída no ciclo produtivo da suinocultura brasileira	48
Tabela 3 - Composição nutricional média da ração nas diferentes fases da suinocultura brasileira.	49

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Diagrama detalhado do guia da FAO para inventário de emissões na produção suinícola	35
Figura 2 - Fluxograma dos 13 passos do inventário de emissões na produção suinícola brasileira.....	36
Figura 3 - Fluxograma das principais rotas de dejetos na suinocultura brasileira	42
Figura 4 - Layout inicial do aplicativo.....	53
Figura 5" - Aba "Tabela de Resultados"	53
Figura 6 - Aba "gráfico em barras".....	55
Figura 7 - Aba "Gráficos em pizza"	56
Figura 8 - Aba "Resumo detalhado"	57
Figura 9 - Parte da aba "Fórmulas detalhadas"	57
Figura 10 - Aba "Instruções de uso"	58
Figura 11 - Integração entre os principais blocos metodológicos.....	61

CAPÍTULO 1

CONSIDERAÇÕES INICIAIS

A suinocultura brasileira passou por uma transformação significativa ao longo das últimas décadas, evoluindo de práticas rudimentares em pequenas propriedades para um setor altamente tecnificado e essencial para a economia nacional. Inicialmente voltada para a subsistência das famílias rurais, a criação de suínos era realizada em pequena escala (ABCS, 2013). No entanto, mudanças econômicas e sociais, como o crescimento populacional, a urbanização e a alteração nos hábitos alimentares, impulsionaram a expansão do setor, acompanhada pela crescente demanda por carne suína e pela modernização das práticas produtivas (ABCS, 2019). Atualmente, o Brasil ocupa uma posição de destaque no cenário global, consolidando-se como um dos maiores produtores e exportadores de carne suína, beneficiado por avanços em manejo, sanidade e nutrição animal (MAPA, 2021).

O desenvolvimento contínuo da suinocultura no Brasil deve-se à abundância de recursos naturais, às condições climáticas favoráveis e aos investimentos constantes em tecnologia e inovação (ABCS, 2019). Em 2023, o Brasil foi o quarto maior produtor e exportador mundial de carne suína, com uma produção de 5,15 e 1,23 milhões de toneladas, respectivamente (ABCS, 2024). Este panorama faz com que 23,85% da produção nacional seja exportado, representando 4% da produção global (EMBRAPA, ABCS, 2024). Esses números reforçam a importância do setor como um pilar econômico, mas também evidenciam a necessidade de equilibrar crescimento produtivo com responsabilidade ambiental (Pereira et al., 2025).

Com o aumento da conscientização sobre as mudanças climáticas, a pegada de carbono do setor agropecuário tornou-se uma preocupação central, devido à sua contribuição significativa para as emissões de gases de efeito estufa (GEE). A suinocultura, em particular, é alvo de escrutínio por suas emissões de metano (CH_4), óxido nitroso (N_2O) e amônia (NH_3), que intensificam o efeito estufa (FAO, 2022). Estudos apontam para a necessidade de tecnologias

de mitigação e práticas de manejo mais eficientes para reduzir esses impactos (Gerber et al., 2019; Llonch et al., 2017).

Nesse contexto, a avaliação do ciclo de vida (ACV) surge como uma metodologia amplamente reconhecida para mensurar e quantificar os impactos ambientais de produtos e processos, desde a extração de matérias-primas até o descarte final. A ACV é uma ferramenta essencial para calcular a pegada de carbono e identificar as principais fontes de emissões de GEE, como dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄) e óxido nitroso (N₂O), permitindo intervenções tecnológicas ou de manejo mais eficazes (ISO, 2006; FAO, 2017). No setor suinícola, a ACV tem sido aplicada para otimizar processos e reduzir emissões em etapas críticas, como alimentação animal, manejo de dejetos e uso da terra (Bouwman et al., 2019).

Além disso, a ACV fornece subsídios para políticas públicas e certificações ambientais, oferecendo uma base científica para estratégias de mitigação e para atender às demandas de mercados globais por produtos mais sustentáveis. Organizações como a FAO e o Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC) utilizam a ACV para avaliar cadeias produtivas e identificar práticas mais eficientes em termos de emissões de GEE (IPCC, 2019). Ferramentas digitais, como aplicativos de mensuração de emissões, também desempenham um papel crucial ao permitir que produtores atendam a padrões ambientais rigorosos e aumentem sua competitividade no mercado global (WRI, 2019).

A ACV, conforme definida pelas normas ISO 14040 e 14044, permite uma análise sistêmica e integrada das emissões ao longo de todas as etapas do processo produtivo, desde a produção e transporte de insumos até o manejo dos dejetos e o consumo energético da propriedade. Essa abordagem “do berço ao portão da fazenda” (*cradle-to-farm-gate*) é especialmente adequada para identificar pontos críticos de emissão, subsidiar ações de mitigação de impactos ambientais e promover melhorias sustentáveis nos sistemas analisados.

O uso da ACV proporciona transparência e rastreabilidade dos resultados, elementos essenciais em contextos de certificação ambiental, relatórios de

sustentabilidade e conformidade com exigências de mercados internacionais. Por sua flexibilidade, robustez metodológica e reconhecimento global, a ACV foi considerada a abordagem mais adequada para alcançar os objetivos desta pesquisa e oferecer uma ferramenta aplicável à gestão ambiental da suinocultura nacional. Ela é essencial para identificar pontos críticos de emissão e subsidiar a tomada de decisão quanto a estratégias de mitigação e tecnologias sustentáveis (Bouwman et al., 2019; Reap et al., 2008).

Diante da crescente demanda por práticas agropecuárias sustentáveis e do papel central da suinocultura brasileira na economia e nas emissões de GEE, torna-se essencial dispor de instrumentos metodológicos e tecnológicos que quantifiquem esses impactos com precisão. A ACV, quando aplicada segundo protocolos reconhecidos internacionalmente, como o da FAO (2018), oferece uma base robusta para mensurar emissões em cada etapa produtiva. Contudo, ainda existem lacunas na adaptação dessa metodologia ao contexto brasileiro e na sua operacionalização em ferramentas acessíveis aos produtores.

Assim, surge a seguinte questão de pesquisa, “Como a aplicação da Avaliação do Ciclo de Vida, conforme o protocolo da FAO (2018), pode mensurar as emissões de GEE nas diferentes fases da cadeia produtiva da suinocultura brasileira e subsidiar decisões sustentáveis por meio de ferramentas digitais?”

Como objetivo geral esse estudo busca desenvolver um protótipo de aplicativo que permita estimar as emissões de GEE ao longo da cadeia produtiva da suinocultura brasileira, com base em dados históricos e nos parâmetros metodológicos da ACV, conforme o protocolo da FAO (2018), visando subsidiar a tomada de decisões sustentáveis no setor.

Como objetivos específicos a fim de atender o objetivo geral sugere-se os seguintes:

Adaptar a metodologia da ACV às condições da suinocultura brasileira, utilizando como base o protocolo da FAO (2018) e as diretrizes do IPCC (2006/2019), com foco nas fases de reprodução, creche e terminação.

Estruturar um inventário técnico de emissões de GEE segmentado por categoria animal e fase produtiva, a partir de dados zootécnicos nacionais e regionais (EMBRAPA, IBGE, Agroceres PIC).

Desenvolver um modelo matemático para estimar as emissões de CH₄ e N₂O, com base em parâmetros como ingestão de nutrientes, excreção de sólidos voláteis e manejo de dejetos.

Implementar um protótipo interativo em R Shiny que integre os cálculos do modelo e permita ao usuário simular cenários, visualizar indicadores de emissão e gerar relatórios técnicos.

Avaliar o desempenho do protótipo na identificação de pontos críticos de emissão e no potencial de mitigação com o uso de diferentes estratégias tecnológicas, como biodigestores e dietas otimizadas.

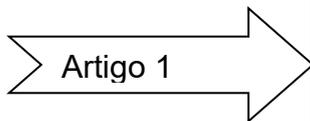
Com essa proposta, busca-se fornecer uma ferramenta prática e cientificamente fundamentada para quantificar as emissões associadas às diferentes etapas da produção suinícola, incluindo manejo de dejetos, fermentação entérica e uso de insumos. A análise detalhada das tendências de emissões ao longo do tempo permitirá identificar padrões e oportunidades para mitigação, contribuindo para o alinhamento do setor às demandas globais por sustentabilidade.

A estrutura escolhida neste estudo está apresentada no esquema a seguir:

**Estimativa de Emissões de GEE na Suinocultura Brasileira:
Desenvolvimento de um Protótipo de Aplicativo Baseado em ACV**

Questão de pesquisa: Como a aplicação da Avaliação do Ciclo de Vida, conforme o protocolo da FAO (2018), pode mensurar as emissões de GEE nas diferentes fases da cadeia produtiva da suinocultura brasileira e subsidiar decisões sustentáveis por meio de ferramentas digitais?"

Objetivo geral: Desenvolver um protótipo de aplicativo que permita estimar as emissões de GEE ao longo da cadeia produtiva da suinocultura brasileira, com base em dados históricos e nos parâmetros metodológicos da ACV, conforme o protocolo da FAO (2018), visando subsidiar a tomada de decisões sustentáveis no setor.



Adequação do Cálculo de Emissões de Gases de Efeito Estufa na Fase 2 da Suinocultura Brasileira: Análise de Produção, Reprodução, Crescimento e Terminação com Base no Protocolo FAO (2018), juntamente com a Proposta de Modelo Matemático para o Inventário de Emissões na Suinocultura Brasileira: Aplicação no Desenvolvimento de um Protótipo de Aplicativo.

REFERÊNCIAS

ABCS – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DOS CRIADORES DE SUÍNOS. Projeto Nacional de Desenvolvimento da Suinocultura (PNDS). 2013. Disponível em: <<http://www.abcs.org.br/informativo-pnds/1491-projeto-nacional-de-desenvolvimento-da-suinocultura-pnds-uma-alternativa-de-crescimento-do-setor>>. Acesso em: 21 mar. 2024.

CHENG, M.; McCARL, B.; FEI, C. Lifecycle assessment of pig breeding environmental impact on global warming. **Animals**, v. 14, n. 16, p. 2435, 2024. Disponível em: <<https://doi.org/10.3390/ani14162435>>. Acesso em: 22 set. 2024.

DE VOS, C. W.; BAIJER, J.; MEIJER, Y. G.; GARRÉ, N. N. A life cycle assessment of the Dutch pork sector to define carbon footprint reduction potential. **Sustainability**, v. 15, n. 12, 2023. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/2071-1050/15/12/1025>>. Acesso em: 20 set. 2024.

GERBER, P. J., et al. Tackling climate change through livestock: A global assessment of emissions and mitigation opportunities. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), 2013.

INSTITUTO DE MANEJO E CERTIFICAÇÃO FLORESTAL E AGRÍCOLA – IMAFLORA. Evolução das emissões de gases de efeito estufa no Brasil (1970-2013): setor agropecuário. Documento de análise, 2015.

MELZ, Laércio; GASTARDELO, Tiane. A suinocultura industrial no mundo e no Brasil. *Revista UNEMAT de Contabilidade*, v. 3, 2014. DOI: 10.30681/ruc.v3i6.266.

MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÕES. Estimativas anuais de emissões de gases de efeito estufa no Brasil. 6. ed., 2022.

OLIVEIRA, P. A. V. de. Produção de suínos em sistemas sustentáveis. In: II ANISUS Congresso Brasileiro de Produção Animal Sustentável, 29-31 maio.

PEREIRA, C. S., Stefani, E., Vargas, J. C. A., Paniago, V. D. A. G., Siqueira, M. N., & Ferreira, R. M. (2025). SWINE FARMING IN BRAZIL: AN ANALYSIS OF ENVIRONMENTAL IMPACT. *Revista de Gestão Social e Ambiental*, 19(3), 1-13.

Disponível em: https://abcs.org.br/wp-content/uploads/2025/01/20241216_007_ALI_Observatorio_Suino_V04.pdf#page=6.10 Acesso em: 05 ago. 2025.

RECKMANN, K., et al. Greenhouse gas emissions from pig and chicken supply chains: A global life cycle assessment. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), 2018.

RIPPLE, W. J., et al. World scientists' warning of a climate emergency. *BioScience*, v. 70, n. 1, 2020, p. 8-12.

SMITH, P., et al. How much land-based greenhouse gas mitigation can be achieved without compromising food security and environmental goals? *Global Change Biology*, v. 19, n. 8, 2013, p. 2285-2302.

STEINFELD, H., et al. Livestock's long shadow: Environmental issues and options. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), 2006.

THOMA, G. J. Environmental sustainability evaluation of PIC genetics vs. industry average: North America. Denver, CO, USA: Resilience Services PLLC, 2023. Disponível em: <<https://tinyurl.com/wtrczjm7>>. Acesso em: 14 jul. 2024.

UNFCCC – UNITED NATIONS FRAMEWORK CONVENTION ON CLIMATE CHANGE. Paris Agreement. Paris: UNFCCC, 2015. Disponível em:

<<https://unfccc.int/process-and-meetings/the-paris-agreement/the-paris-agreement>>. Acesso em: 20 ago. 2024.

CAPÍTULO 2

INVENTÁRIO DE EMISSÕES DE GEE NA SUINOCULTURA BRASILEIRA: METODOLOGIA ADAPTADA E PROTÓTIPO DE APLICATIVO EM R SHINY

RESUMO

O Brasil, quarto maior produtor mundial de carne suína, enfrenta o desafio de conciliar expansão econômica e sustentabilidade ambiental. Este estudo desenvolve e integra uma metodologia de inventário de gases de efeito estufa (GEE) adaptada às diretrizes da FAO (2018) e do IPCC (2006/2019), com foco no escopo “do berço ao portão da fazenda”, e um protótipo de aplicativo em R Shiny para operacionalizar os cálculos de emissões em tempo real. A abordagem baseia-se em dados nacionais e internacionais (FAO, IPCC, EMBRAPA, Agroceres PIC) e aplica a Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) às fases de reprodução, creche e terminação. As principais fontes de GEE identificadas são a produção de ração e o manejo de dejetos, com a alimentação respondendo pela maior fração das emissões e os dejetos sendo críticos para metano (CH_4) e óxido nitroso (N_2O). Resultados preliminares indicam que biodigestores de lagoa coberta e dietas otimizadas reduzem significativamente as emissões, geram bioenergia e reforçam a competitividade do setor. O aplicativo oferece aos produtores uma ferramenta prática para monitorar indicadores, apoiar decisões e alinhar-se às metas do Acordo de Paris e dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável. Conclui-se que a adaptação de protocolos globais ao contexto nacional é viável e essencial, posicionando a suinocultura brasileira como referência em economia de baixo carbono.

Palavras-chave: aplicativo; avaliação do ciclo de vida; bioeconomia; pegada de carbono; modelagem matemática; sustentabilidade ambiental.

ABSTRACT

Brazil, the fourth largest pork producer globally, faces the challenge of reconciling economic expansion and environmental sustainability. This study develops and integrates a greenhouse gas (GHG) inventory methodology adapted to FAO (2018) and IPCC (2006/2019) guidelines, focusing on a 'cradle-to-farm gate' scope, and an R Shiny application prototype to operationalize emission calculations in real-time. The approach is based on national and international data (FAO, IPCC, EMBRAPA, Agroceres PIC) and applies Life Cycle Assessment (LCA) to the reproduction, nursery, and finishing phases. The main GHG sources identified are feed production and manure management, with feed accounting for the largest fraction of emissions and manure being critical for methane (CH₄) and nitrous oxide (N₂O). Preliminary results indicate that covered lagoon biodigesters and optimized diets significantly reduce emissions, generate bioenergy, and enhance the sector's competitiveness. The application offers producers a practical tool to monitor indicators, support decision-making, and align with the goals of the Paris Agreement and the Sustainable Development Goals. It is concluded that adapting global protocols to the national context is feasible and essential, positioning Brazilian swine farming as a reference in the low-carbon economy.

Keywords: application; bioeconomy; carbon footprint; environmental sustainability; life cycle assessment; mathematical modeling.

1. INTRODUÇÃO

A suinocultura brasileira consolidou-se como um setor estratégico no agronegócio nacional e global. Em 2023, o país registrou 2.099.036 matrizes alojadas e uma produção de 5,156 milhões de toneladas de carne suína, um aumento de 3,5% em relação a 2022. Esses números posicionam o Brasil como o quarto maior produtor e exportador global, com 24% da produção destinada ao mercado externo e um consumo per capita interno de 18,3 kg (ABPA, 2024; EMBRAPA, FAO, USDA).

Contudo, apesar de seu robusto desempenho econômico, o setor suinícola enfrenta desafios ambientais significativos. As emissões de gases de efeito estufa (GEE), como dióxido de carbono (CO_2), metano (CH_4) e óxido nitroso (N_2O), são majoritariamente atribuídas à produção de ração, à fermentação entérica e ao manejo de dejetos. A agricultura, em especial a ligada à alimentação animal, contribui com 10% a 12% das emissões globais antropogênicas (IPCC, 2014), com o Brasil sendo um dos principais emissores nesse segmento (FAO, 2023). Diante desse cenário, compromissos internacionais como a Agenda 2030, o Acordo de Paris e as Contribuições Nacionalmente Determinadas (NDCs) impulsionam a meta brasileira de reduzir 50% das emissões até 2030, fomentando políticas como o Plano ABC+ e programas de incentivo a biodigestores.

A transição da suinocultura nacional, de um modelo de produção mais extensiva e de menor escala para uma indústria intensiva, tecnificada e verticalizada e tecnificada nas últimas três décadas, carrega na necessidade de investimentos em inovações tecnológicas em nutrição, biossegurança e gestão de resíduos (Savian et al., 2023). Paralelamente, essa evolução revelou lacunas na adoção de práticas de baixo carbono (UNDP, 2023). Embora a literatura aponte soluções como biodigestores anaeróbios e dietas com menor proteína bruta para a mitigação de GEE (Ripple et al., 2020), a quantificação sistemática dos ganhos ambientais e econômicos dessas tecnologias em condições brasileiras ainda carece de estudos aplicados (Oliveira, 2019; MCTI, 2022).

Nesse contexto, a Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) emerge como uma ferramenta robusta para mensurar os impactos ambientais ao longo da cadeia produtiva, desde o cultivo de insumos até a saída do animal da granja (“do berço ao portão da fazenda”). Contudo, observa-se uma escassez de trabalhos que

integrem a ACV a modelos matemáticos e aplicações digitais, capazes de permitir ao produtor monitorar emissões em tempo real e comparar cenários de mitigação de forma acessível.

Diante desse cenário, o presente estudo propõe-se a cumprir dois propósitos complementares:

1. Adaptar e detalhar uma metodologia de inventário de GEE para a suinocultura brasileira, estruturada em 13 etapas críticas alinhadas às diretrizes da FAO (2018) e do IPCC (2006/2019), com foco nas fases de reprodução, creche e terminação.
2. Desenvolver um protótipo de aplicativo em *R Shiny*, capaz de operacionalizar o modelo matemático de cálculo, quantificar as emissões por categoria e fase produtiva, e gerar relatórios interativos para subsidiar decisões de manejo.

Essa abordagem, ao integrar rigor científico e inovação tecnológica, visa não apenas mitigar os impactos ambientais da suinocultura, mas também promover a geração de bioenergia a partir de dejetos e fortalecer a competitividade do setor. Assim, espera-se que a suinocultura brasileira possa avançar como referência global na produção de proteína animal de baixo carbono.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1. A Suinocultura Brasileira no Contexto Global e seus Desafios

A suinocultura brasileira consolidou uma posição estratégica no cenário agropecuário, caracterizada por uma evolução de práticas de subsistência para uma indústria intensiva e tecnificada. Esse avanço é resultado de investimentos contínuos em genética, nutrição, biossegurança e gestão produtiva, que impulsionaram a produtividade e a competitividade do setor no mercado global (ABPA, 2024; EMBRAPA, 2024). A crescente demanda por carne suína, tanto no mercado interno quanto externo, reforça a relevância econômica da atividade.

No entanto, essa modernização e expansão impõem desafios ambientais significativos, especialmente no contexto das mudanças climáticas e das crescentes exigências dos mercados por produtos de baixo carbono. A competitividade internacional da suinocultura brasileira depende, cada vez mais, da sua capacidade de incorporar práticas sustentáveis e de se alinhar a compromissos ambientais globais, como o Acordo de Paris e os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS). Nesse cenário, a adoção de instrumentos eficazes de medição e mitigação de impactos ambientais torna-se imperativa, não apenas para atender à legislação, mas para manter a posição do Brasil nos mercados internacionais, que impõem critérios ambientais cada vez mais rigorosos.

Apesar do avanço tecnológico e da conscientização sobre a sustentabilidade, persistem lacunas na quantificação precisa das emissões de GEE ao longo do ciclo produtivo da suinocultura brasileira, considerando suas particularidades regionais e operacionais. A carência de estudos que integrem dados zootécnicos nacionais com metodologias robustas de avaliação ambiental e ferramentas digitais acessíveis aos produtores dificulta a adoção de estratégias de mitigação baseadas em evidências.

2.2. Impactos Ambientais da Suinocultura

A intensificação da suinocultura, embora tenha gerado ganhos expressivos em produtividade, também elevou significativamente sua pegada ambiental. O setor é reconhecido como uma das principais fontes de emissões de GEE dentro da agropecuária, com contribuições notáveis provenientes da produção de ração, da fermentação entérica e, principalmente, do manejo de dejetos (IPCC, 2014; FAO, 2023). Mas ao aplicar métodos mais precisos para estimar as emissões de CH₄ de origem entérica e do manejo dos resíduos, alguns autores, como Vechi, Jensen e Scheutz (2022), expõem a complexidade de somar as duas fontes em uma única categoria, visto que os dejetos emitem mais CH₄ e são influenciados por muitos fatores externos, enquanto a emissão entérica é mais constante e é influenciada apenas pela condição fisiológica do animal e pela qualidade da dieta.

Dentre os GEE emitidos, destacam-se o CO₂, o CH₄ e o N₂O. O CH₄ e o N₂O são particularmente preocupantes devido aos seus elevados potenciais de aquecimento global (GWP), sendo o metano até 28 vezes mais potente e o óxido nitroso até 265 vezes mais que o CO₂ em um horizonte de 100 anos (IPCC, 2019). A produção de ração, que envolve o cultivo intensivo de grãos como milho e soja, contribui para essas emissões pelo uso de fertilizantes nitrogenados e combustíveis fósseis (Wiedemann et al., 2010). O manejo inadequado de dejetos, por sua vez, intensifica a liberação de CH₄ por decomposição anaeróbia e de N₂O em processos de nitrificação e desnitrificação.

Além das emissões atmosféricas, a suinocultura está associada a outros impactos ambientais relevantes, como a degradação do solo, a contaminação de recursos hídricos por excesso de nutrientes (nitrogênio e fósforo) e a proliferação de vetores sanitários. A compreensão aprofundada desses impactos é crucial para o desenvolvimento e a implementação de práticas de manejo ambientalmente responsáveis.

2.3. Diretrizes Internacionais para Avaliação de Emissões de GEE

A ACV é amplamente reconhecida como uma das metodologias mais robustas para a quantificação dos impactos ambientais ao longo de cadeias produtivas agropecuárias. No contexto da suinocultura, a ACV permite mensurar as emissões de GEE desde a produção de insumos até o portão da fazenda (*cradle to farm gate*), abrangendo as principais fontes de emissão ao longo do ciclo produtivo (FAO, 2018).

A aplicação da ferramenta ACV propõe análises que procuram atender todos os recursos de entrada e, de saída, seus produtos e co-produtos (produto do sistema e emissões e outros impactos ambientais negativos) de cada etapa que envolve o ciclo de produtivo, de acordo com a ISO 14040 e 14044 (ABNT, 2014^a; ABNT, 2014b). Estas análises utilizam as entradas e saídas baseadas em uma unidade funcional, em massa, medidas de distância, medidas de tempo etc, que, geralmente, é definida de acordo com o produto. O uso da ACV como ferramenta de análise e identificação dos potenciais impactos ambientais negativos depende de dados numéricos resultantes de ocorrências bioquímicas (fisiológicas), que, segundo Sumner *et al.* (2012), consistem em inúmeros

elementos que interagem entre si e que englobam processos que variam entre o tempo, as condições biológicas (da fisiologia dos animais) e o espaço.

O protocolo internacional mais utilizado para a mensuração de emissões na produção animal é o da FAO, desenvolvido no âmbito da Parceria LEAP (*Livestock Environmental Assessment and Performance Partnership*). Este guia oferece uma estrutura detalhada para inventariar emissões por meio de 18 etapas metodológicas, adaptáveis a diversos contextos produtivos, desde a caracterização da população animal até o manejo de dejetos e o consumo energético, com base em fatores de emissão específicos (FAO, 2018).

Complementarmente, o Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC) disponibiliza as *Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*, revisadas em 2006 e 2019. Essas diretrizes apresentam três níveis de complexidade metodológica, (Tier 1 (default), Tier 2 (intermediário) e Tier 3 (avançado)), que variam conforme o grau de detalhamento dos dados disponíveis. A escolha do nível adequado depende da capacidade técnica e dos dados regionais existentes. Estudos como os de Rigolot et al. (2010) e McAuliffe et al. (2017) demonstram que abordagens de Tier 2 e 3, quando alimentadas com dados locais, proporcionam maior precisão para subsidiar políticas públicas e gestão produtiva.

A harmonização entre as diretrizes da FAO e do IPCC é fundamental para garantir a comparabilidade internacional dos inventários e sua aceitação em plataformas de monitoramento climático, como o UNFCCC. Contudo, um dos principais desafios para países em desenvolvimento reside na adaptação dessas diretrizes às realidades locais, especialmente no que se refere à disponibilidade de dados zootécnicos confiáveis e ao acesso a tecnologias de modelagem. A superação desse desafio é crucial para que as estimativas sejam cientificamente robustas e aplicáveis ao campo, respondendo à necessidade de ferramentas práticas para a gestão ambiental do setor.

2.4. Tecnologias e Estratégias de Mitigação

A mitigação dos impactos ambientais da suinocultura requer a adoção de estratégias integradas que combinem inovações tecnológicas, melhorias no manejo zootécnico e ferramentas de gestão ambiental. A literatura científica

reconhece diversas práticas capazes de reduzir significativamente as emissões de GEE no setor, com destaque para o uso de biodigestores, ajustes na formulação da dieta e a compostagem aeróbica (Cherubini et al., 2009; Santos et al., 2020).

Entre as tecnologias mais promissoras, os biodigestores anaeróbios, como os sistemas de lagoa coberta e os reatores contínuos (CSTR), destacam-se por capturar o metano produzido na decomposição dos dejetos e convertê-lo em biogás. Além de reduzir as emissões líquidas de GEE, esses sistemas geram energia renovável e podem fornecer fertilizantes orgânicos como subprodutos. Apesar de sua eficácia, sua adoção ainda enfrenta barreiras econômicas e técnicas, especialmente entre produtores de pequeno e médio porte.

A compostagem aeróbica, por sua vez, apresenta-se como uma solução de baixo custo, particularmente viável para pequenas propriedades. Quando corretamente manejada, a compostagem reduz a emissão de metano em comparação a sistemas anaeróbios abertos, embora falhas no manejo possam elevar as emissões de N_2O .

Mais recentemente, o uso de ferramentas digitais para suporte à tomada de decisão, como aplicativos e plataformas baseados em modelagem matemática, tem ganhado relevância. Esses sistemas permitem estimar emissões com base em parâmetros técnicos do rebanho e do sistema produtivo, simulando cenários de mitigação e monitorando indicadores ambientais em tempo real (Medeiros et al., 2020; González-Mejía et al., 2021). Essa abordagem representa uma ponte essencial entre o conhecimento científico e sua aplicação prática nas granjas, tornando a gestão ambiental mais transparente, adaptável e cientificamente validada.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Este estudo adota uma abordagem metodológica estruturada em quatro eixos principais, visando a quantificação de emissões de GEE na suinocultura brasileira: (i) adaptação de diretrizes internacionais ao contexto nacional; (ii) construção de um inventário de GEE; (iii) modelagem matemática das emissões;

e (iv) desenvolvimento de um protótipo de aplicativo interativo para estimativas em tempo real.

3.1 Referenciais Normativos, Protocolos e Bases de Dados

A metodologia empregada fundamenta-se em um arcabouço de normas e protocolos internacionais amplamente reconhecidos. O guia da FAO (2018), desenvolvido no contexto da Parceria LEAP, serve como base principal, estruturando a cadeia produtiva da suinocultura e definindo etapas para a estimativa de impactos ambientais. Das 18 etapas propostas originalmente, 13 foram adaptadas para refletir as condições produtivas, climáticas e tecnológicas específicas do Brasil, garantindo maior fidelidade aos dados de campo.

Complementarmente, as *Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories* do IPCC (2006/2019) foram utilizadas, oferecendo metodologias em três níveis de complexidade (Tier 1 a 3). Optou-se prioritariamente pelo Tier 2, que equilibra robustez técnica e viabilidade operacional, permitindo um ajuste preciso conforme a disponibilidade de dados locais. O GHG Protocol, para contabilização de emissões corporativas, e as normas ISO 14040/14044, que regem a ACV, também foram integrados para assegurar consistência metodológica e compatibilidade internacional dos resultados.

No âmbito nacional, a metodologia alinha-se ao Plano ABC+ (2022), a principal estratégia governamental brasileira para redução de emissões na agropecuária. Para a parametrização realista dos modelos, foram incorporados coeficientes zootécnicos e dados regionais fornecidos por instituições como EMBRAPA, IBGE e Agrocere PIC, abrangendo informações sobre consumo alimentar, produtividade, sistemas de manejo de dejetos e características populacionais de rebanhos suínos. Essa integração entre diretrizes internacionais e dados locais resulta em uma abordagem metodológica robusta, adaptada à realidade produtiva brasileira e capaz de subsidiar decisões em níveis técnico, regulatório e político.

3.2 Delimitação do sistema de estudo

O sistema analisado neste estudo corresponde à Fase 2 da cadeia suinícola, conforme a estruturação da FAO (2018), englobando as etapas de

reprodução, creche e terminação. Essa delimitação é metodologicamente justificada por representar a fase sob maior controle técnico do produtor e por concentrar os principais fluxos de emissão de GEE, como a fermentação entérica, o manejo de dejetos e a produção de ração (FAO, 2018; IPCC, 2019).

O recorte adotado é o "do berço ao portão da fazenda" (*cradle-to-farm gate*), que permite capturar as emissões diretas associadas à produção animal, em conformidade com as práticas recomendadas de ACV (ISO 14044, 2006). Etapas posteriores, como transporte, abate e processamento, foram excluídas do escopo por estarem fora do controle direto do produtor e exigirem bases de dados setoriais distintas (Wiedemann et al., 2010).

A unidade de análise é uma granja tecnificada com capacidade para 1.000 matrizes, localizada na região Centro-Oeste do Brasil, onde predominam sistemas de produção intensiva (Agrocères PIC, 2021). Essa escala, representativa de uma configuração comercial amplamente empregada, possibilita o cálculo de indicadores zootécnicos robustos. A escolha foi também embasada na disponibilidade de dados regionais consolidados junto à EMBRAPA e IBGE, assegurando maior precisão na parametrização dos modelos.

A estrutura do rebanho foi organizada por categorias produtivas e janelas temporais, seguindo parâmetros técnicos da FAO (2018) e Agrocères PIC (2020), além de registros de campo. As principais categorias incluem: (i) matrizes (pré-cobertura: 4 dias; gestação: 115 dias; lactação: 26 dias); (ii) marrãs (preparação reprodutiva: 21 dias); (iii) leitões pós-desmamados na creche (40 dias); e (iv) suínos em crescimento e engorda na terminação (100 dias), até o abate (100-125 kg). Essas categorizações são cruciais para estimar com precisão o consumo de ração, a excreção de dejetos e as emissões de GEE. Granjas com esse perfil garantem robustez estatística na modelagem dos fluxos ambientais, sendo representativas da suinocultura tecnificada nas regiões Sul e Centro-Oeste (ABCS, 2014).

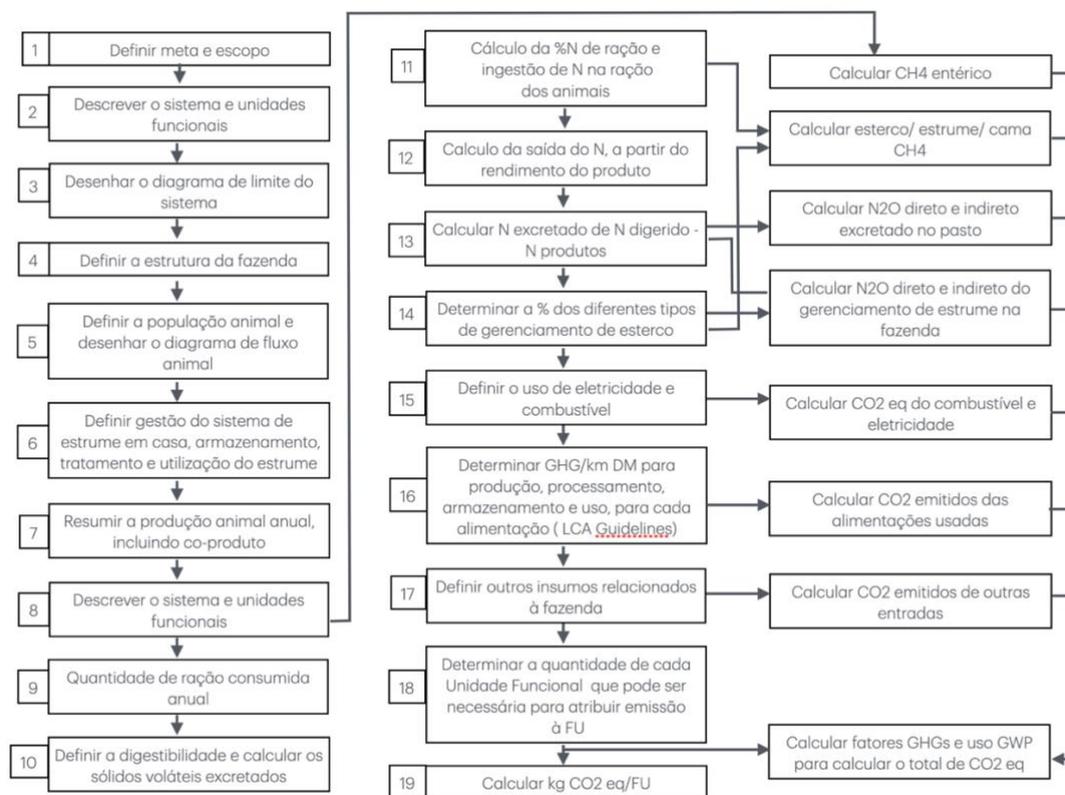
Essa delimitação clara e justificada assegura a consistência do inventário de GEE e sua aplicabilidade em diagnósticos ambientais, formulação de políticas e desenvolvimento de ferramentas de gestão ambiental. O foco na Fase 2 também facilita comparações internacionais com outros inventários de

suinocultura, dado que esse recorte é amplamente adotado em estudos baseados em ACV (McAuliffe et al., 2017).

3.3 Etapas Metodológicas Adaptadas e Fluxograma

As etapas metodológicas deste estudo seguem o protocolo da FAO (2018), com adaptações para o contexto brasileiro e baseadas em dados zootécnicos nacionais. Esse diagrama, ilustrado na Figura 1, serve como uma ferramenta fundamental para padronizar a análise, assegurando consistência e confiabilidade nos resultados obtidos.

Figura 1 - Diagrama detalhado do guia da FAO para inventário de emissões na produção suinícola



Fonte: FAO (2018).

Das 18 etapas previstas no protocolo original, 13 foram selecionadas e adaptadas por serem consideradas mais adequadas à realidade operacional da suinocultura brasileira. Essas etapas, fundamentais para a coerência e

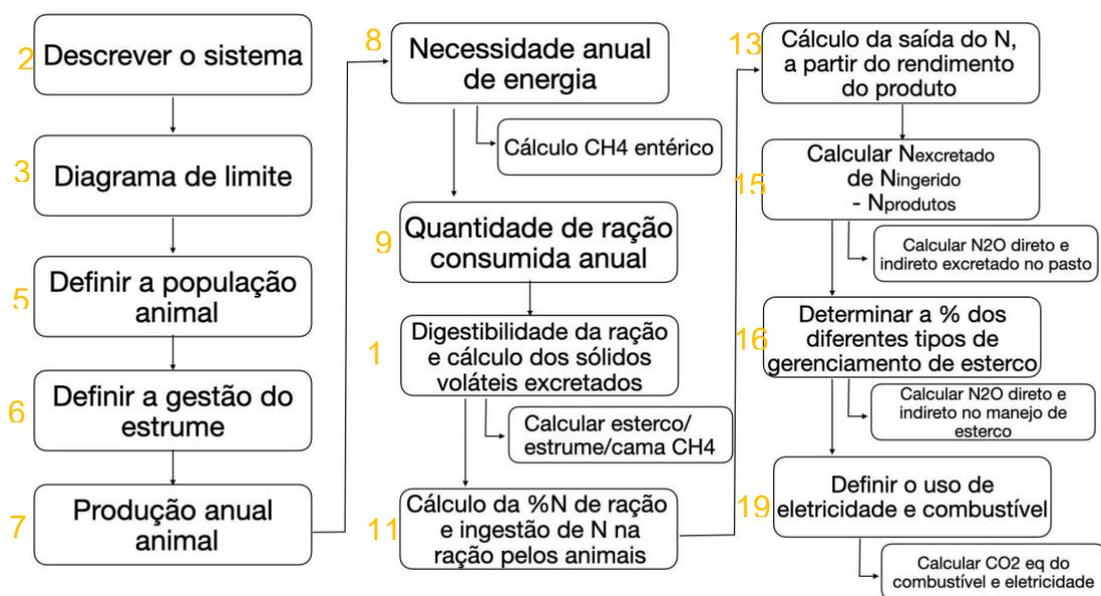
rastreabilidade do inventário, abrangem desde a definição da unidade funcional até a estimativa das emissões de GEE.

As etapas adaptadas são:

1. Definição da unidade funcional: (kg de peso vivo).
2. Delimitação do sistema de produção.
3. Caracterização da população animal e taxas zootécnicas.
4. Classificação dos sistemas de manejo de dejetos (MMS).
5. Produção anual por categoria animal.
6. Necessidades energéticas e ingestão de matéria seca (MS).
7. Excreção de sólidos voláteis (SV).
8. Ingestão e excreção de nitrogênio (N).
9. Ingestão e excreção de fósforo (P).
10. Distribuição dos dejetos entre os sistemas MMS.
11. Consumo de energia (elétrica e térmica).
12. Emissões de CH₄ de dejetos e fermentação entérica.
13. Conversão de N excretado em N₂O.

A seleção dessas 13 etapas resultou da exclusão de itens do protocolo original considerados irrelevantes ou inviáveis para a realidade brasileira devido à ausência de dados locais confiáveis. As etapas excluídas incluem: definição da cadeia de fornecimento ampliada (item 1), avaliação de resíduos alimentares (item 4), uso de cama em instalações (item 12), manuseio de carcaças (item 14), uso de coprodutos e subprodutos (item 17) e uso de fertilizantes produzidos com o esterco (item 18), conforme justificativas baseadas em estudos da EMBRAPA (2020) e FAO (2018).

Figura 2 - Fluxograma dos 13 passos do inventário de emissões na produção suinícola brasileira



Fonte: Adaptado da FAO, 2018.

A Figura 2 ilustra o fluxograma metodológico adaptado, consolidando essas 13 etapas essenciais para estimar as emissões de GEE em sistemas brasileiros de suinocultura, priorizando os fluxos zootécnicos diretamente controlados pelo produtor. Cada etapa gera saídas específicas que alimentam os cálculos subsequentes, promovendo rastreabilidade e precisão:

- Definição do sistema e unidade funcional: estabelece o referencial de comparação (kg de peso vivo ou kg de carcaça quente) para normalização dos resultados.
- Delimitação dos limites do sistema: conforme detalhado na Seção 3.2, com foco na fase *cradle to farm gate*.
- Caracterização da população animal: define número, categorias produtivas, taxa de reposição e índices zootécnicos.
- Classificação do sistema de manejo de dejetos: identifica o tipo predominante (lagoas abertas, biodigestores, compostagem, etc.).
- Produção anual por categoria animal: inclui número de lotes por ano, taxa de parição e produtividade média.
- Cálculo das necessidades energéticas e ingestão de matéria seca (MS): baseado no peso, fase e exigências nutricionais (Agrocere PIC, 2020).
- Consumo de matéria seca (MS) efetivo: calculado por fase com base em coeficientes técnicos validados pela EMBRAPA.

- Excreção de sólidos voláteis (SV): estimados como proporção da MS não digerida, com digestibilidade média de 70%.
- Ingestão total de nitrogênio (N): calculada a partir do teor proteico da dieta e do consumo de MS.
- N incorporado nos produtos animais: nitrogênio retido no crescimento corporal, definido por categoria animal.
- Nitrogênio excretado: diferença entre N ingerido e N retido, base para estimativas de emissões de N₂O.
- Distribuição dos dejetos nos diferentes sistemas de manejo: com base em dados do Censo Agropecuário e literatura técnica brasileira.
- Consumo de energia (elétrica e térmica): estimado em kWh e litros de diesel por unidade funcional.

As equações associadas às estimativas foram implementadas com base no Tier 2 do IPCC (2019), adaptadas com coeficientes técnicos específicos da suinocultura brasileira (EMBRAPA Suínos e Aves e Agroceres PIC, 2021), o que confere maior acurácia em comparação ao Tier 1 (Wiedemann et al., 2010). A coerência entre os fluxos de massa e energia foi assegurada em cada etapa, garantindo o fechamento dos balanços e a rastreabilidade dos resultados. Essa abordagem sistêmica e integradora permite identificar pontos críticos de emissão e oportunidades de mitigação.

3.4 Modelagem Matemática e Equações-Chave

Esta seção detalha as equações fundamentais para o cálculo das emissões de GEE, organizadas em cinco blocos essenciais para o inventário de emissões, conforme as diretrizes da FAO (2018) e IPCC (2006/2019).

3.4.1. Balanço de Nitrogênio (N)

As equações a seguir calculam a quantidade de nitrogênio ingerido, retido nos produtos animais e excretado. O nitrogênio excretado é um precursor relevante das emissões de N₂O, um potente gás de efeito estufa.

Ingestão de nitrogênio (N_{ing}): $N_{ing} = (PB \times C_{fase}) / 6,25$

Estima o total de nitrogênio consumido, convertendo a proteína bruta (PB) em nitrogênio.

$$\text{Retenção de nitrogênio (N}_{\text{ret}}\text{): } N_{\text{ret}} = N_{\text{ing}} \times ER_{\text{N}}$$

Calcula a fração do nitrogênio incorporado nos tecidos corporais dos animais (eficiência de retenção).

$$\text{Excreção de nitrogênio (N}_{\text{exc}}\text{): } N_{\text{exc}} = N_{\text{ing}} - N_{\text{ret}}$$

Determina o excesso de nitrogênio eliminado nas excretas, base para o cálculo das emissões de N_2O .

Onde:

N_{E-T} é a excreção total de nitrogênio por fase ou grupo de animais, expressa em gramas por fase (g N/fase).

N_{I-T} é o consumo total de nitrogênio por fase ou grupo de animais, expresso em gramas por fase (g N/fase).

N_{R-T} é a retenção total de nitrogênio nos tecidos dos animais durante a fase, também em gramas por fase (g N/fase).

3.4.2. Balanço de Fósforo (P)

Seguindo a lógica do balanço de nitrogênio, estas equações focam no fósforo, que também impacta a qualidade ambiental via eutrofização.

$$\text{Ingestão de fósforo (P}_{\text{ing}}\text{): } P_{\text{ing}} = \text{Teor}_{\text{P}} \times C_{\text{fase}}$$

Quantifica o fósforo consumido com base no teor da dieta.

$$\text{Retenção de fósforo (P}_{\text{ret}}\text{): } P_{\text{ret}} = P_{\text{ing}} \times ER_{\text{P}}$$

Estima o fósforo incorporado nos tecidos animais.

$$\text{Excreção de fósforo (P}_{\text{exc}}\text{): } P_{\text{exc}} = P_{\text{ing}} - P_{\text{ret}}$$

Calcula a quantidade de fósforo eliminada, importante para o manejo de resíduos.

Onde:

P_{E-T} é a excreção total de fósforo por fase ou grupo de animais, expressa em gramas por fase (g P/fase).

P_{I-T} é o consumo total de fósforo por fase ou grupo de animais, em gramas por fase (g P/fase).

P_{R-T} é a retenção total de fósforo nos tecidos durante a fase, em gramas por fase (g P/fase).

3.4.3. Excreção de Sólidos Voláteis (SV) e Metano (CH_4) dos Dejetos

Estas fórmulas estimam a quantidade de sólidos voláteis excretados (substrato para fermentação anaeróbia) e o metano resultante de sua digestão.

$$\text{Excreção de SV: } SV_{exc} = C_{forn} \times (1 - DMD) \times (1 - A) + VSWF$$

Calcula a fração não digerida da ração que se transforma em substrato orgânico nos dejetos.

$$\text{Emissão de } CH_4 \text{ de dejetos: } CH_{4_dej} = SV_{exc} \times B_0 \times MCF$$

Estima o metano gerado pela decomposição anaeróbia dos SV, utilizando o potencial de produção de metano (B_0) e o fator de conversão (MCF) específico do sistema de manejo.

Onde:

SV é a quantidade total de sólidos voláteis excretados por fase, expressa em quilogramas (kgVS/fase).

FI_{PH} representa o consumo de ração durante a fase específica, também em quilogramas.

DMD é a digestibilidade da matéria seca, um valor constante que varia entre 0,6 e 0,8.

A é o fator de absorção associado ao metabolismo animal, com valores constantes entre 0,1 e 0,2.

VS_{WF} corresponde à quantidade de ração não consumida, também expressa em quilogramas.

3.4.4. Metano Entérico

Essas equações avaliam o metano gerado diretamente na digestão dos alimentos (fermentação entérica), sendo mais relevantes para suínos adultos.

$$\text{Matrizes: } CH_4_{ent} = (\text{ResD} \times 1340) / 55,65 \times 10^6$$

Aplica fator específico para matrizes reprodutoras, baseado no consumo energético diário.

Onde:

CH_4 é a quantidade de metano emitida, expressa em quilogramas por ano (kg/ano).

ResD representa a quantidade de fibra digerida pelos animais ao longo do ano, em quilogramas (kg).

1340J/kgResD é uma constante que indica a energia gerada por quilograma de fibra digerida (Joules por quilograma de ResD).

5.665×10^7 J/kg CH_4 é uma constante que representa o valor energético do metano em Joules por quilograma de metano (J/kg CH_4).

$$\text{Outras categorias: } CH_4_{ent} = (\text{ResD} \times 670) / 55,65 \times 10^6$$

Fator reduzido aplicado a leitões e suínos em crescimento.

Onde:

CH_4 é a quantidade de metano emitida, expressa em quilogramas por ano (kg/ano).

ResD representa a quantidade de fibra digerida pelos animais ao longo do ano, em quilogramas (kg).

670 J/kgResD é uma constante que indica a energia gerada por quilograma de fibra digerida (Joules por quilograma de ResD).

5.665×10^7 J/kgCH₄ é uma constante que representa o valor energético do metano em Joules por quilograma de metano (J/kgCH₄).

3.4.5. Conversão de N₂O a partir de N

Esta etapa converte a quantidade de nitrogênio excretado em emissão de óxido nitroso (N₂O), seguindo a abordagem Tier 1 do IPCC.

$$\text{Emissão de N}_2\text{O indireto: } \text{N}_2\text{O} = \text{N}_{\text{exc}} \times 0,01$$

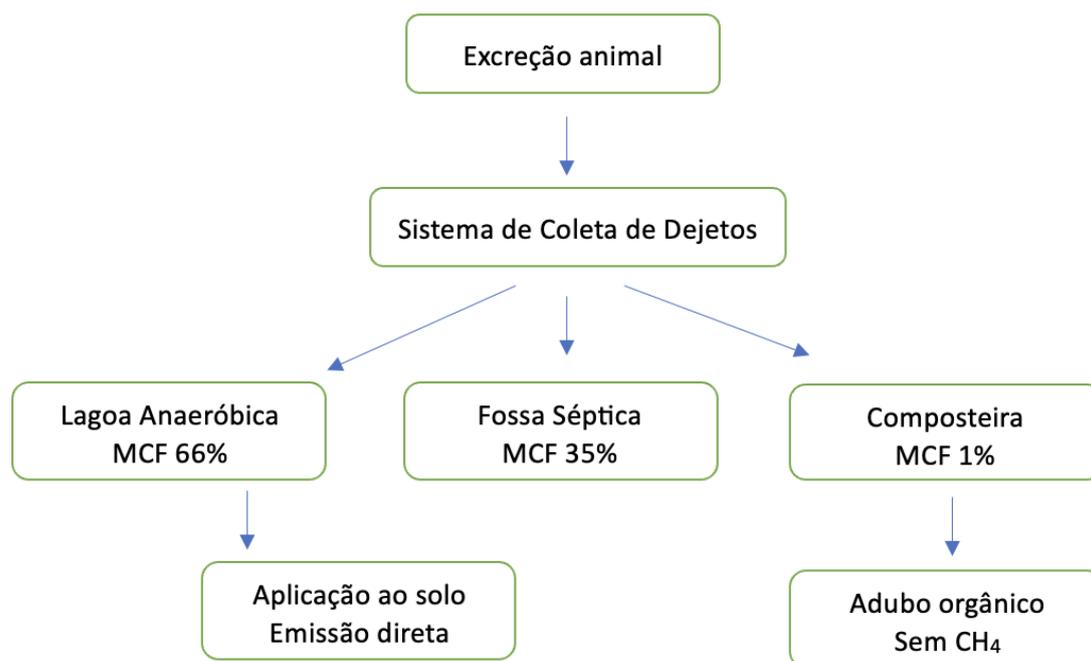
Assume que 1% do nitrogênio excretado volatiliza como N₂O, aplicado ao solo como fertilizante orgânico.

Todas as constantes e fatores utilizados nessas equações foram extraídos de fontes consolidadas, como FAO (2018), IPCC (2006/2019) e literatura técnica especializada, e são integradas na lógica do protótipo computacional para cada fase da produção, conforme os dados de entrada do rebanho e das características alimentares.

3.5. Sistemas de Manejo de Dejetos e Fatores MCF

O tratamento e armazenamento de dejetos representam uma das variáveis mais sensíveis na estimativa de emissões de metano (CH₄). Para cada Sistema de Manejo de Dejetos (*Manure Management System - MMS*), o IPCC (2006) atribui um Fator de Conversão de Metano (MCF), que expressa a fração dos Sólidos Voláteis (SV) potencialmente convertida em CH₄ sob condições médias anuais. A escolha do MMS e sua participação relativa na granja alteram significativamente o resultado do inventário.

Figura 3 - Fluxograma das principais rotas de dejetos na suinocultura brasileira



Fonte: Adaptado IPCC 2006/2019.

A Figura 2 apresenta o fluxograma IPCC adaptado às principais rotas de dejetos observadas na suinocultura brasileira. A Tabela 1 sumariza o peso de cada sistema e o MCF adotado neste estudo:

Tabela 1 - Distribuição dos sistemas de manejo de dejetos e fatores MCF adotados

Sistema (MMS)	Participação nas granjas-modelo*	MCF médio (%)	Contexto técnico-econômico	Referência
Lagoa aberta (anaeróbica)	50 %	17	Solução de baixo CAPEX amplamente utilizada em granjas de médio e grande porte nas regiões Sul e Centro-Oeste; requer área disponível e apresenta elevada produção de CH ₄ por ausência de cobertura.	Ribas et al., 2018; IBGE 2017

Sistema (MMS)	Participação nas granjas-modelo*	MCF médio (%)	Contexto econômico técnico-	Referência
Biodigestor de lagoa coberta ou CSTR	30 %	80	Sistemas com incentivo do Plano ABC+ (2022); capturam biogás para geração de energia e reduzem emissões líquidas; demandam maior investimento e gestão técnica.	Medeiros et al., 2020; MAPA 2022
Compostagem aeróbica	20 %	0	Predominante em pequenas propriedades e sistemas orgânicos; manejo em leiras reduz CH ₄ , mas pode aumentar N ₂ O se mal arejada.	Costa et al., 2019

*Valores de participação definidos a partir do Censo Agropecuário (IBGE, 2017) e de levantamentos regionais da EMBRAPA (2021).

A média ponderada dos MCF ($MCF_{pond} = 32,5 \%$) resulta da aplicação da Equação A (IPCC, 2006):

$$MCF_{pond} = \frac{\sum (MCF_i \times Proporção_i)}{\sum Proporção_i}$$

onde i representa cada MMS presente na granja. Este valor único alimenta a Equação 8 (item 3.4.3) para conversão de SV em CH₄ quando o produtor não dispõe de informações detalhadas sobre cada sistema.

A escolha ou combinação entre esses sistemas impacta não apenas o inventário de GEE, mas também indicadores econômicos (custo de energia, receita com créditos de carbono) e sanitários. O aplicativo desenvolvido permite ao usuário ajustar as proporções reais do seu sistema, recalculando automaticamente o MCF ponderado e suas repercussões nas emissões totais.

3.6. Parâmetros Zootécnicos e Consumo de Ração

A acurácia da estimativa de emissões de GEE depende diretamente da qualidade dos dados zootécnicos inseridos no modelo. Entre eles, o consumo diário de ração por categoria animal é um dos mais relevantes, pois influencia diretamente os cálculos de ingestão de nitrogênio, fósforo, sólidos voláteis e as subsequentes emissões de metano e óxidos de nitrogênio.

Os valores de referência adotados neste estudo são baseados nos dados da Agrocere PIC (2018), uma das principais fontes de *benchmarks* nutricionais para a suinocultura comercial brasileira:

- Matrizes em pré-cobertura: 2,7–4,3 kg de ração/dia;
- Matrizes em gestação: 2,5–3,5 kg/dia;
- Matrizes em lactação: 5,64 kg/dia (média padronizada).

Esses intervalos refletem variações fisiológicas, genéticas e ambientais, sendo considerados representativos para granjas tecnificadas com controle nutricional. Para outras categorias (leitões na creche, crescimento e terminação), os valores médios foram extraídos de dados empíricos de uma granja-estudo acompanhada entre 2022 e 2024 (Pietramale, 2024), com suplementação de dados do sistema Suinutri® (EMBRAPA Suínos e Aves, 2021).

No ambiente do aplicativo, os usuários podem editar diretamente os valores de consumo diário, permitindo adaptações à realidade de diferentes sistemas produtivos. Caso esses dados não sejam informados pelo usuário, o sistema utiliza as médias empíricas da base validada. A consideração de consumos reais e ajustáveis reforça a customização do inventário para cada sistema produtivo, melhorando a precisão dos resultados e a eficácia das recomendações de mitigação. Além disso, o acompanhamento do consumo alimentar é essencial para o manejo nutricional eficiente, reduzindo perdas e emissões associadas ao excesso de nutrientes na dieta. Essa abordagem está alinhada às recomendações da FAO (2018), que destaca a necessidade de refletir as condições locais e os coeficientes zootécnicos nacionais na aplicação de ACV na pecuária.

3.7. Desenvolvimento do Protótipo em R Shiny

O protótipo do aplicativo para estimativa de emissões de GEE foi desenvolvido utilizando o *framework* R Shiny, reconhecido por sua flexibilidade na criação de interfaces interativas e manipulação dinâmica de dados científicos.

A estrutura do sistema está dividida em dois blocos principais: Interface do Usuário (UI) e Lógica de Servidor (Server):

3.7.1. Interface do Usuário

Composta por oito abas funcionais, projetadas para cobrir desde a entrada de dados até a geração de relatórios finais:

- Input Data: upload de planilhas (.xlsx) com parâmetros técnicos.
- Fórmulas: exibição das equações de cálculo utilizadas (Equações 1–10).
- Phase Results: visualização dos resultados por fase do ciclo produtivo (reprodução, creche, terminação).
- Global Summary: consolidação dos resultados totais por categoria e indicador.
- Scenarios: simulação de cenários alternativos (ex. diferentes consumos ou sistemas de manejo).
- Reports: exportação de resultados em formatos PDF e CSV.
- Help: orientações de uso e conceitos técnicos.
- Credits: informações sobre os autores, bases utilizadas e instituições parceiras.

3.7.2. Lógica de Servidor

Executa as rotinas internas em tempo real, com as seguintes funções:

- Leitura e *parsing* automático dos dados inseridos pelo usuário via arquivos Excel.
- Execução das equações matemáticas (Equações 1–10), utilizando os parâmetros definidos.
- Armazenamento dos resultados em estruturas reativas (*reactive values*), para atualização instantânea da interface.

- Geração de tabelas interativas utilizando o pacote DT e gráficos dinâmicos com ggplot2.

3.7.3. Saídas do Sistema

As informações processadas são transformadas em indicadores visuais e relatórios técnicos:

- Gráficos interativos em formato de pizza (distribuição de fontes de emissão) e barras (comparativo por fase).
- Relatórios em PDF ou CSV, organizados por indicador e categoria produtiva.
- Painel de indicadores com métricas como: emissões totais de GEE (kg CO₂e/kg PV), metano capturado (CH₄), energia potencial gerada (MJ).

Essa organização técnica permite que o usuário realize diagnósticos ambientais personalizados, visualizando pontos críticos da produção e simulando ganhos ambientais com melhorias operacionais. A construção do protótipo fundamenta-se nos princípios de transparência, modularidade e acessibilidade técnica, conforme orientações da FAO (2018), IPCC (2006/2019) e boas práticas de modelagem ambiental interativa (González-Mejía et al., 2021). A integração entre dados zootécnicos, equações de emissão e ferramentas de visualização confere ao sistema o potencial de ser replicado, ampliado ou incorporado a plataformas de governança ambiental e relatórios ESG.

4. RESULTADOS

Esta seção apresenta os principais resultados obtidos a partir da aplicação da metodologia de ACV na suinocultura brasileira, focando na descrição do ciclo produtivo, nos cálculos de consumo de ração e no inventário de emissões de GEE, incluindo balanços de nutrientes e modelagem de metano entérico.

4.1. Caracterização do Ciclo de Produção de Suínos

O ciclo de produção de suínos, fundamental para a estruturação do inventário de GEE, foi detalhadamente caracterizado em suas diferentes etapas, otimizando o desenvolvimento e manejo dos animais. A Tabela 2 sumariza as fases do ciclo produtivo, suas durações e os fluxos de entrada e saída de biomassa, servindo como base para os cálculos subsequentes.

Tabela 2 - Etapas, duração e fluxos de entrada e saída no ciclo produtivo da suinocultura brasileira

Etapa	Duração	Entrada	Saída
Reprodução			
Pré-cobertura de matriz	2 a 7 dias		
Pré-cobertura de marrã	21 dias		
Gestação	115 dias		
Lactação	21 a 28 dias		
Creche (pós-desmamados)	35 dias	28 dias	63 dias
		6 quilos	30 quilos
Terminação	77 dias	63 dias	140 dias
		30 quilos	100 a 125 quilos

Fonte: Adaptado da FAO (2018) e AGROCERES PIC (2018).

Os dados para essa caracterização foram obtidos de fontes renomadas, como FAO (2018) e AGROCERES PIC (2018), adaptados às particularidades da suinocultura brasileira. A organização do ciclo produtivo em etapas bem definidas (reprodução, creche e terminação) é crucial para compreender as demandas específicas de cada fase, os insumos requeridos e os impactos ambientais associados. Essa estruturação permite avaliar a produtividade e a eficiência geral do sistema, além de subsidiar o desenvolvimento de estratégias

para a sustentabilidade econômica e ambiental do setor (FAO, 2018; AGROCERES PIC, 2018; Pietramale, 2024).

4.2. Cálculo do Consumo de Ração

A quantificação precisa do consumo de ração pelos animais é um componente crítico para a construção do inventário de emissões de GEE, uma vez que a alimentação representa um dos principais fatores de emissão no setor. Os cálculos foram realizados conforme as equações detalhadas na Seção 3.4.

Para as matrizes em fase de pré-cobertura, o consumo diário de ração varia entre 2,7 e 4,3 kg/dia (Santos et al., 2020). O consumo total para esta fase foi determinado utilizando a Equação 1 (Seção 3.4.1), que relaciona o consumo médio diário com a duração da fase. Essa estimativa é fundamental para a avaliação das emissões de GEE associadas à alimentação e para o cálculo da eficiência alimentar.

A Tabela 3 apresenta a composição nutricional média das rações utilizadas em cada fase produtiva da suinocultura, incluindo valores de matéria seca, proteína bruta, energia metabolizável, fósforo total, lisina digestível e fibra bruta. Esses dados são fundamentais para estimar a ingestão diária de nutrientes pelos animais, etapa essencial na construção do inventário de emissões de gases de efeito estufa (GEE). Conforme recomendado pela FAO (2018) e pelo IPCC (2006; 2019), a composição da dieta influencia diretamente os cálculos de excreção de nitrogênio e sólidos voláteis, os quais são utilizados na estimativa de emissões de óxido nitroso (N_2O) e metano (CH_4), respectivamente. Assim, essa tabela fornece a base técnico-nutricional necessária para garantir a coerência e a rastreabilidade do modelo de Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) aplicado, permitindo ainda simulações comparativas entre cenários alimentares e estratégias de mitigação (Reap et al., 2008; Mello et al., 2019; Agrocere PIC, 2018; Rostagno et al., 2024).

Tabela 3 - Composição nutricional média da ração nas diferentes fases da suinocultura brasileira.

Fase produtiva	Matéria Seca (kg/dia)	Proteína bruta (%)	Energia Metabolizável (kcal/kg)	Fósforo Total (%)	Lisina digestível (%)	Fibra bruta (%)
----------------	-----------------------	--------------------	---------------------------------	-------------------	-----------------------	-----------------

Marrãs pré-cobertura	2,5-3,0	16 -17,5	3.200 – 3.250	0,55 – 0,60	0,80 – 0,85	3,5 – 4,0
Matrizes gestação	1,8-2,2	13-14,5	3.050 – 3.150	0,45 – 0,50	0,60 – 0,65	4,0 – 5,0
Matrizes lactação	5,0-6,0	17,5 -19	3.250 – 3.400	0,60 – 0,65	1,00 – 1,10	3,0 – 3,5
Leitões (creche)	0,6-1,2	19 -21	3.400 – 3.500	0,55 – 0,6	1,30 – 1,50	2,5 – 3,0
Terminação inicial	2,0-2,8	16 -17	3.250 – 3.350	0,45 – 0,50	0,85 – 0,90	3,5 – 4,0
Terminação final	2,8-3,4	13,5 -15	3.200 – 3.300	0,40 –0,45	0,70 – 0,75	4,0 – 4,5

Fonte: Adaptado de Agrocere PIC (2018), EMBRAPA Suínos e Aves (2021), IBGE (2023).

No caso das marrãs em pré-cobertura, o consumo total de ração foi estimado em aproximadamente 42 kg, para uma duração de 14 dias, sendo o consumo diário baseado em 3kg/dia segundo a EMBRAPA (2021), pois o indicado é que a ração seja dada à vontade, conforme a Equação 2 (Seção 3.4.1). O fornecimento adequado de alimentação nessa fase é crucial para a maturidade reprodutiva e o desempenho subsequente.

Para as matrizes em gestação, o consumo total de ração anual foi estimado entre 660 e 700 kg, conforme Mello et al. (2019), utilizando a Equação 3 (Seção 3.4.1). Essa faixa reflete as demandas nutricionais para o desenvolvimento saudável dos leitões e impacta diretamente o cálculo das emissões.

Na fase de lactação, o consumo médio diário de ração foi de aproximadamente 5,64 kg/dia (Main et al., 2017), embora o fornecimento seja *ad libitum*. O consumo total foi calculado pela Equação 4 (Seção 3.4.1), considerando o consumo diário médio e o número de dias de lactação. Esse consumo é vital para a produção de leite e o crescimento da leitegada, sendo um fator relevante para o cálculo das GEE e a análise da eficiência alimentar no modelo de ACV.

Para detalhes completos das quantidades de consumo por categoria e fase produtiva, bem como os parâmetros zootécnicos utilizados nos cálculos, consultar o Apêndice A.

4.3. Inventário de Emissões de GEE da Suinocultura Brasileira

O inventário de emissões de GEE foi construído a partir de balanços de nutrientes e modelagens específicas para metano e óxido nitroso, conforme as equações apresentadas na Seção 3.4.

4.3.1. Cálculo da Excreção Total de Nitrogênio e Fósforo

A excreção total de N e P gerados pela produção de esterco foi calculada utilizando as Equações 5 (Seção 3.4.1). Essas equações consideram o consumo alimentar, a eficiência de absorção e a retenção dos nutrientes nos tecidos dos animais, permitindo estimar com precisão a quantidade de nutrientes excretados. Os valores obtidos são cruciais para a avaliação das emissões de N e P no manejo de dejetos e para o cálculo do potencial de poluição ambiental, seguindo as diretrizes da FAO (2018).

4.3.2. Excreção de Sólidos Voláteis

A excreção de VS, um componente crucial para o cálculo de emissões de GEE no manejo de dejetos, foi determinada pela Equação 6 (Seção 3.4.3). Esta equação considera o consumo efetivo de ração, a digestibilidade da matéria seca (DMD) e o fator de absorção (A), proporcionando uma estimativa detalhada dos sólidos voláteis gerados em cada fase do ciclo produtivo.

4.3.3. Sólidos Voláteis Provenientes da Ração Não Consumida (VSWF)

A quantidade de sólidos voláteis oriundos da ração não consumida (VSWF) foi calculada pela Equação 7 (Seção 3.4.3). Essa equação considera que parte da ração destinada aos animais não é ingerida, contribuindo para o volume de sólidos voláteis no sistema de manejo de dejetos. O cálculo do VSWF é essencial para a estimativa de emissões de CH₄, que é produzido durante a degradação de matéria orgânica.

4.3.4. Emissões de Metano a Partir de Sólidos Voláteis

As emissões de CH_4 provenientes da degradação de sólidos voláteis (VS) no manejo de dejetos foram calculadas utilizando a Equação 8 (Seção 3.4.3). Esta equação integra variáveis como a quantidade de sólidos voláteis excretados, o potencial máximo de produção de metano (B_0) e o fator de conversão de metano (MCF), que reflete a eficiência do sistema de manejo. Essa abordagem é fundamental para estimar com precisão as emissões de metano e identificar pontos críticos para a adoção de tecnologias de mitigação, como biodigestores ou sistemas de compostagem otimizados (FAO, 2018; IPCC, 2019).

4.3.5. Emissões de Óxido Nitroso no Manejo de Dejetos

As emissões de N_2O provenientes do manejo de dejetos foram calculadas pela Equação 9 (Seção 3.4.5). Esta equação incorpora fatores como a quantidade de nitrogênio excretado e o fator de emissão de óxido nitroso associado a cada sistema de manejo de dejetos (MMS). A utilização dessa abordagem contribui para identificar os sistemas de manejo mais eficientes e desenvolver estratégias de mitigação direcionadas, dado que o manejo inadequado pode levar a emissões significativas de N_2O , um GEE com elevado potencial de aquecimento global (FAO, 2018; IPCC, 2019).

4.4. Modelagem das Emissões de Metano Entérico na Suinocultura

Para o cálculo das emissões de metano entérico, foram utilizadas duas equações distintas, adaptadas às características específicas das categorias de suínos, conforme detalhado na Seção 3.4.4. A Equação 10 foi aplicada exclusivamente às matrizes, enquanto a Equação 11 foi destinada aos demais suínos do sistema produtivo. Essa abordagem diferenciada é essencial para garantir a precisão das estimativas, uma vez que as emissões de metano são influenciadas por padrões de consumo, composição da dieta e metabolismo entre as categorias.

Essas equações consideram a energia derivada da digestão de fibras (ResD) e sua conversão em emissões de metano, com fatores específicos para cada categoria. O menor valor da constante energética para outras categorias de suínos (670 J/kgResD) em comparação às matrizes (1340 J/kgResD) reflete diferenças metabólicas e de produção de energia associada à digestão de fibras. O cálculo é fundamentado nas diretrizes da FAO (2018), garantindo precisão nas estimativas de emissões entéricas para suínos, e é fundamental para análises de ciclo de vida e estratégias de mitigação no setor suinícola.

4.5. Interface e Funcionalidades do Protótipo Computacional

Figura 4 - Layout inicial do aplicativo



Fonte: Autora.

Figura 5" - Aba "Tabela de Resultados"

Cálculo de Emissões e Excreções na Produção de Suínos

Carregar Planilha Excel

Browse... Reduzindo Colunas3.xlsx

Upload complete

Calcular & Baixar Resultados

[Tabela de Resultados](#)
[Gráficos de Barras](#)
[Gráficos de Pizza](#)
[Resumo Detalhado](#)
[Detalhes de Todos os Cálculos](#)

[Fórmulas Detalhadas](#)
[Tabela de Debug](#)
[Resumo Estatístico](#)
[Ajuda](#)

Show 25 entries Search:

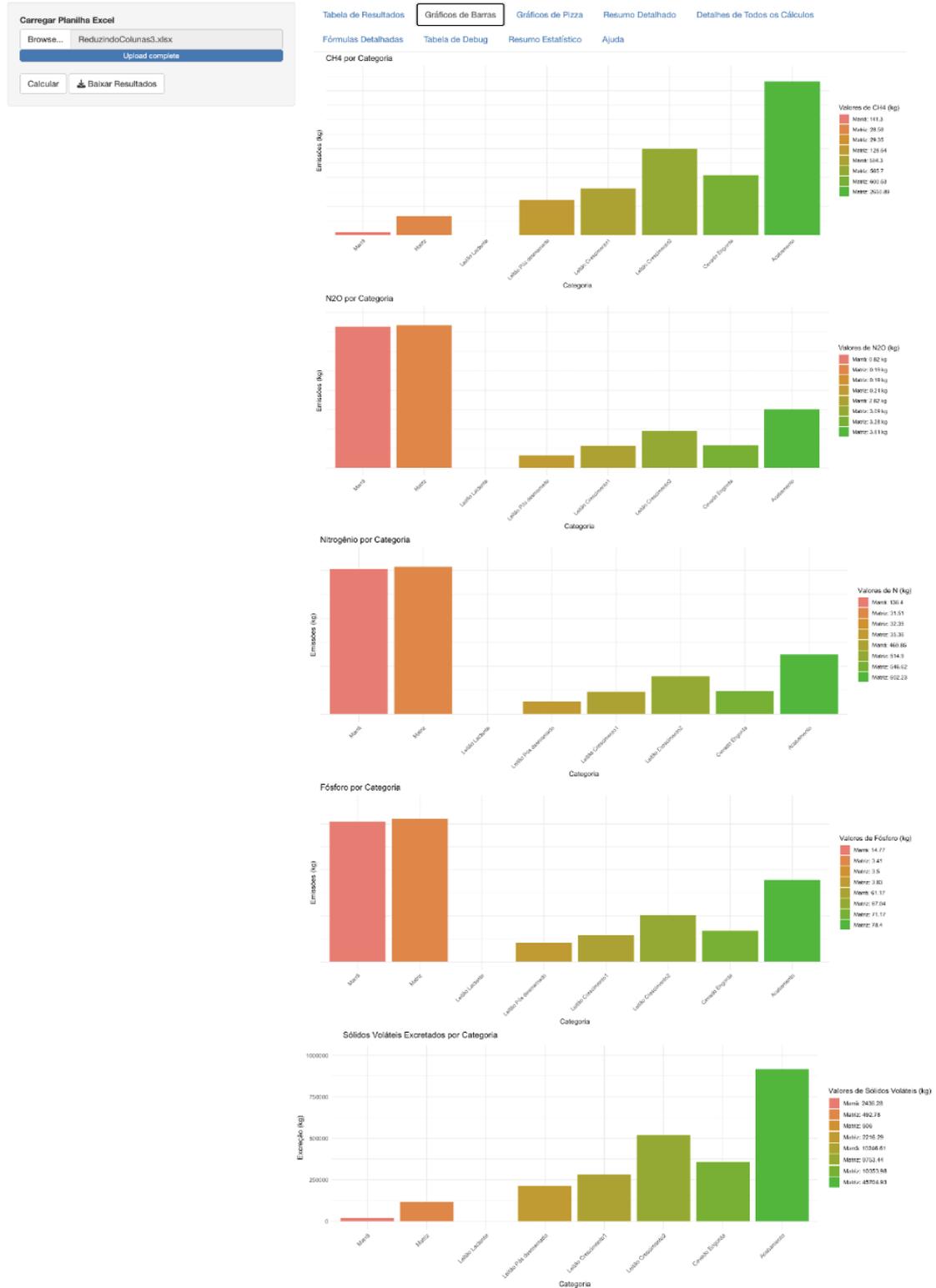
Id	Categoria	FaseProducao	ER_N	ER_P	N_ingrido	N_retido	N_excretado	F_ingrido	F_retido	F_excretado	VS_excretado	CH4_excretado	N2O_excretado
1	Mamã	PréCobertura	0.25	0.4	181.87	45.47	136.4	24.61	9.84	14.77	2436.28	141.3	0.82
2	Mamã	PréCobertura	0.25	0.4	42.01	10.5	31.51	5.68	2.27	3.41	482.78	28.58	0.19
3	Mamã	PréCobertura	0.25	0.4	43.13	10.78	32.35	5.84	2.34	3.5	506	29.35	0.19
4	Mamã	PréCobertura	0.25	0.4	47.15	11.79	35.36	6.38	2.55	3.83	2218.29	128.54	0.21
5	Mamã	Gestação	0.25	0.4	626.47	156.62	469.85	101.95	40.78	61.17	10246.61	594.3	2.82
6	Mamã	Gestação	0.25	0.4	686.54	171.64	514.9	111.73	44.69	67.04	9753.44	565.7	3.09
7	Mamã	Gestação	0.25	0.4	728.83	182.21	546.62	118.61	47.44	71.17	10553.96	600.53	3.28
8	Mamã	Gestação	0.25	0.4	802.97	200.74	602.23	130.67	52.27	78.4	45704.93	2650.89	3.61
9	Mamã	Lactante	0.25	0.4	829.31	132.33	396.98	71.63	28.65	42.98	12897.83	748.07	2.38
10	Mamã	Lactante	0.25	0.4	570.73	142.68	428.05	77.24	30.9	46.34	6435.51	373.26	2.57
11	Mamã	Lactante	0.25	0.4	613.38	153.34	460.04	83.01	33.2	49.81	27712.1	1607.3	2.76
12	Mamã	PrimeiraFase	0.25	0.4	290.66	72.67	217.99	39.33	15.73	23.6	4839.28	280.88	1.31
13	Mamã	SegundaFase	0.25	0.4	109.4	27.35	82.05	14.8	5.92	8.88	1548.02	89.79	0.49
14	Leitão Lactente	Maternidade	0.25	0.4							0	0	
15	Leitão Pós desmamado	Creche (Pré inicial1)	0.45	0.25	2.65	1.19	1.46	0.53	0.13	0.4	9071.69	578.36	0.01
16	Leitão Pós desmamado	Creche (Pré inicial2)	0.45	0.25	9.85	4.43	5.42	1.8	0.45	1.35	31620.41	1821.22	0.03
17	Leitão Pós desmamado	Creche (inicial1)	0.45	0.25	27.91	12.56	15.35	4.04	1.01	3.03	98478.44	3391.75	0.09
18	Leitão Pós desmamado	Creche (inicial2)	0.45	0.25	58.87	25.59	31.28	7.61	1.9	5.71	111899.14	6490.15	0.19
19	Leitão Crescimento1	Terminação	0.35	0.25	145.88	51.06	94.82	19.37	4.94	14.53	281323.09	16316.74	0.57
20	Leitão Crescimento2	Terminação	0.35	0.25	242.85	85	157.85	34	8.5	25.5	517504.03	30015.23	0.95
21	Cevado Engorda	Terminação	0.35	0.25	149.52	52.33	97.19	22.48	5.62	16.86	358904.07	20816.44	0.58
22	Acabamento	Terminação	0.35	0.25	383.95	134.38	249.57	58.41	14.85	44.56	917869.73	53236.44	1.5

Showing 1 to 22 of 22 entries Previous Next

Fonte: Autora

Figura 6 - Aba "gráfico em barras"

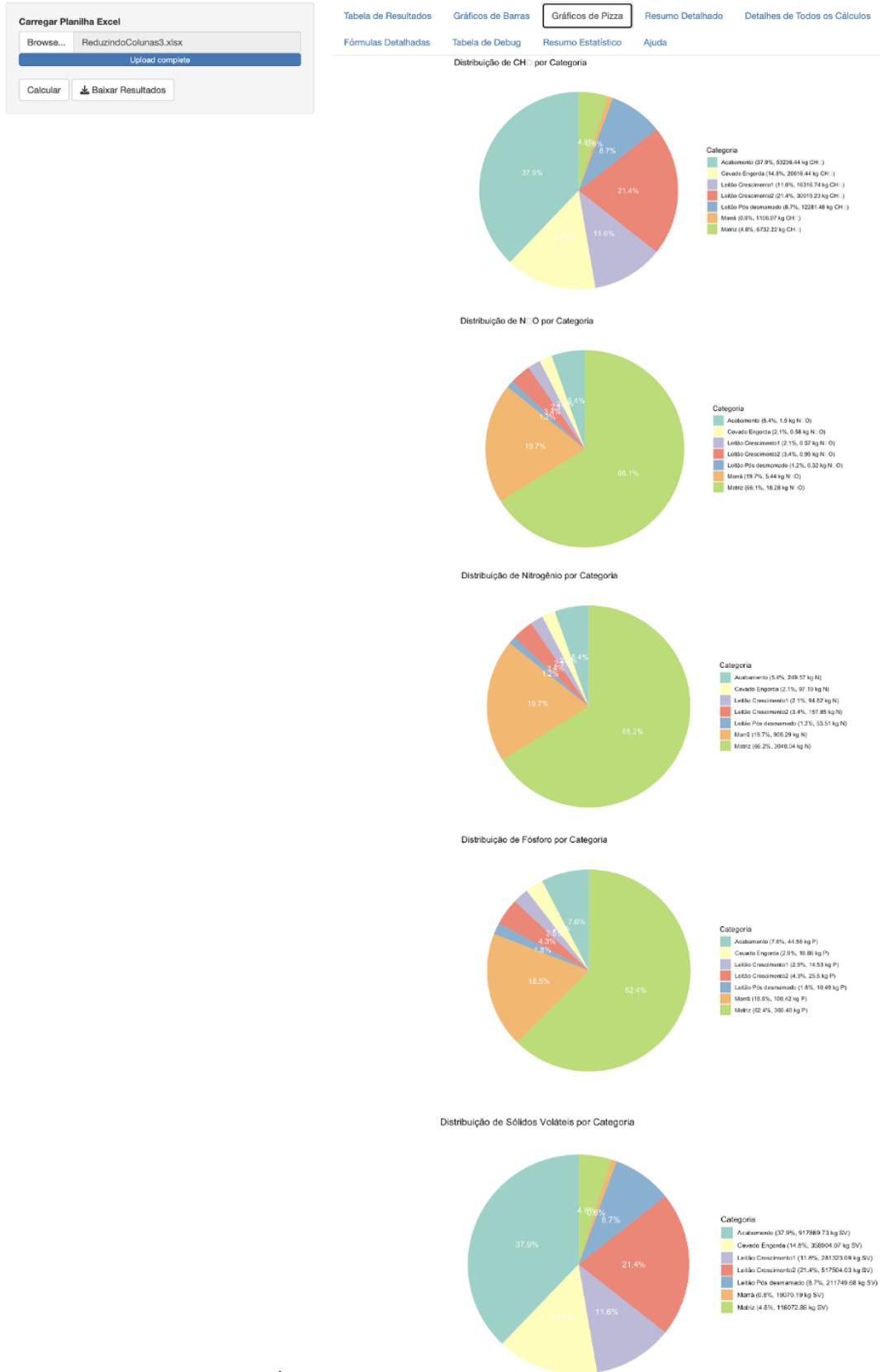
Cálculo de Emissões e Excreções na Produção de Suínos



Fonte: Autora.

Figura 7 - Aba "Gráficos em pizza"

Cálculo de Emissões e Excreções na Produção de Suínos



Fonte: Autora.

Figura 8 - Aba "Resumo detalhado"

Cálculo de Emissões e Excreções na Produção de Suínos

Carregar Planilha Excel
 Browse... ReduzindoColunas3.xlsx
 Upload complete
 Calcular Baixar Resultados

Tabela de Resultados Gráficos de Barras Gráficos de Pizza **Resumo Detalhado** Detalhes de Todos os Cálculos

Fórmulas Detalhadas Tabela de Debug Resumo Estatístico Ajuda

Show 25 entries Search:

Categoria	N_final	TaxaMortalidade	N_excretado	F_excretado	VS_excretado	CH4_excretado	N2O_excretado
1 Marrã	751.3299999999999	4.08	906.29	108.42	19070.19	1106.07	5.44
2 Matriz	2855.03	17.6	3048.04	366.48	116072.86	6732.22	18.28
3 Leite Lactente	30024.54	8.68	0	0	0	0	0
4 Leite Pós desmamado	113857.43	6.8	53.51000000000001	10.49	211749.68	12281.48	0.32
5 Leite Crescimento1	27932.95	0.32	94.82	14.53	281323.09	16316.74	0.57
6 Leite Crescimento2	27798.87	0.48	157.85	25.5	517504.03	30015.23	0.95
7 Cevado Engorda	27629.3	0.61	97.19	16.86	358904.07	20816.44	0.58
8 Acabamento	27388.93	0.87	249.57	44.56	917869.73	53236.44	1.5

Showing 1 to 8 of 8 entries Previous 1 Next

Fonte: Autora.

Figura 9 - Parte da aba "Fórmulas detalhadas"

Cálculo de Emissões e Excreções na Produção de Suínos

Carregar Planilha Excel
 Browse... ReduzindoColunas3.xlsx
 Upload complete
 Calcular Baixar Resultados

Tabela de Resultados Gráficos de Barras Gráficos de Pizza **Resumo Detalhado** Detalhes de Todos os Cálculos

Fórmulas Detalhadas Tabela de Debug Resumo Estatístico Ajuda

Show 25 entries Search:

Categoria	FaseProducao	EQ_N_final	N_final	EQ_TaxaMortalidade	TaxaMortalidade_Calculada
1 Marrã	PréCobertura	$N_{inicial} * (1 - TaxaMortalidade/100)$	175	$(N_{inicial} - N_{final}) / N_{inicial} * 100$	1.13
2 Matriz	PréCobertura	$N_{inicial} * (1 - TaxaMortalidade/100)$	151.99	$(N_{inicial} - N_{final}) / N_{inicial} * 100$	1.94
3 Matriz	PréCobertura	$N_{inicial} * (1 - TaxaMortalidade/100)$	151.99	$(N_{inicial} - N_{final}) / N_{inicial} * 100$	1.94
4 Matriz	PréCobertura	$N_{inicial} * (1 - TaxaMortalidade/100)$	609.01	$(N_{inicial} - N_{final}) / N_{inicial} * 100$	1.93
5 Marrã	Gestação	$N_{inicial} * (1 - TaxaMortalidade/100)$	173	$(N_{inicial} - N_{final}) / N_{inicial} * 100$	1.14
6 Matriz	Gestação	$N_{inicial} * (1 - TaxaMortalidade/100)$	149.01	$(N_{inicial} - N_{final}) / N_{inicial} * 100$	1.97
7 Matriz	Gestação	$N_{inicial} * (1 - TaxaMortalidade/100)$	149.01	$(N_{inicial} - N_{final}) / N_{inicial} * 100$	1.97
8 Matriz	Gestação	$N_{inicial} * (1 - TaxaMortalidade/100)$	597	$(N_{inicial} - N_{final}) / N_{inicial} * 100$	1.97
9 Matriz	Lactante	$N_{inicial} * (1 - TaxaMortalidade/100)$	316.01	$(N_{inicial} - N_{final}) / N_{inicial} * 100$	1.86

Fonte: Autora.

Figura 10 - Aba "Instruções de uso"



Fonte: Autora.

O protótipo computacional desenvolvido em R Shiny apresenta uma interface intuitiva e segmentada por blocos funcionais, permitindo ao usuário inserir parâmetros zootécnicos específicos, selecionar fases produtivas e visualizar os resultados em tempo real. As figuras a seguir ilustram as principais telas do aplicativo, que incluem: (i) o painel de entrada de dados, onde são informadas variáveis como consumo de ração, número de animais e duração das fases produtivas; (ii) a área de processamento dos cálculos, que aplica os modelos matemáticos baseados na metodologia da Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) e no protocolo da FAO (2018); (iii) os resultados consolidados em forma de indicadores técnicos e ambientais, como emissões de CH₄, N₂O e CO₂ equivalente por fase e por categoria animal; e (iv) os gráficos e relatórios gerados automaticamente, facilitando a interpretação dos dados e subsidiando a tomada de decisão. O aplicativo também permite a simulação de diferentes cenários produtivos, como a adoção de dietas otimizadas ou sistemas de tratamento de dejetos, tornando-se uma ferramenta prática e versátil para produtores, técnicos e gestores interessados em avaliar e mitigar os impactos ambientais da suinocultura.

5. DISCUSSÃO

Os resultados obtidos por meio da simulação dos cenários no protótipo indicam que as maiores contribuições para as emissões de GEE na suinocultura brasileira concentram-se na fase de produção de ração e no manejo de dejetos, confirmando os padrões já apontados na literatura internacional (Rigolot et al., 2010; Wiedemann et al., 2010; McAuliffe et al., 2017; Hollas et al., 2022). A

alimentação demonstrou ser o principal fator emissor devido à elevada participação de milho e soja na composição das dietas, culturas essas associadas a cadeias produtivas intensivas em fertilizantes nitrogenados e combustíveis fósseis (Ratz, 2014; Umesha, 2017). As estimativas de ingestão de nutrientes, com base na Tabela 4 e no inventário do Apêndice A, permitiram quantificar emissões indiretas associadas à excreção e ao metabolismo, evidenciando a importância de ajustes nutricionais. Em especial, cenários com redução no teor de proteína bruta indicaram potencial de mitigação relevante nas emissões de N_2O , sem comprometer a eficiência produtiva, corroborando estratégias defendidas por Cheng et al. (2024) e Ripple et al. (2020). Dessa forma, os resultados reforçam que intervenções no plano alimentar representam uma frente prioritária e tecnicamente viável para a transição da suinocultura para sistemas de menor impacto ambiental.

Do mesmo modo, o manejo de dejetos demonstrou ser um dos principais pontos críticos de emissão de CH_4 e N_2O , sobretudo em sistemas que ainda utilizam lagoas abertas sem tratamento adequado (Inoue et al., 2016; Song et al., 2023). A adoção de tecnologias como biodigestores de lagoa coberta, que já apresentam maturidade tecnológica e respaldo normativo no Brasil, revela-se como medida estratégica não apenas para mitigação, mas também para geração de energia renovável e valorização dos resíduos na forma de biofertilizantes (Chozhavendhan et al., 2022). Neste sentido, os resultados obtidos com a simulação de cenários no protótipo desenvolvido reforçam que a transição para sistemas com maior controle ambiental é viável e desejável, especialmente quando articulada com políticas de incentivo como o Plano ABC+.

A aplicação da ACV, estruturada em 13 etapas adaptadas do protocolo da FAO (2018), mostrou-se fundamental para a identificação sistemática de fluxos de emissão em cada fase produtiva. Ao contrário de inventários simplificados ou abordagens de escopo único, a ACV permitiu evidenciar os trade-offs entre estratégias de mitigação, como o deslocamento do impacto de CH_4 para N_2O em determinadas práticas, ou o ganho energético versus o custo operacional na adoção de biodigestores (Moreno et al., 2022; Reis et al., 2023). Esse tipo de análise integrada é essencial para a tomada de decisões informadas e sustentáveis, tanto no nível do produtor quanto no planejamento de políticas públicas.

O desenvolvimento do protótipo computacional em R Shiny constitui uma contribuição inovadora ao aliar robustez metodológica, flexibilidade analítica e usabilidade prática. A possibilidade de simular cenários, personalizar entradas zootécnicas e gerar relatórios técnicos, fortalece a capacidade de diagnóstico ambiental em tempo real. Essa funcionalidade é particularmente relevante para pequenos e médios produtores, que frequentemente carecem de ferramentas acessíveis para mensurar seus impactos e atender a exigências de programas de certificação ambiental e relatórios ESG (Li, 2020).

Adicionalmente, os resultados deste estudo apontam caminhos para uma maior integração da suinocultura brasileira a mercados de carbono e programas de bioeconomia (Andretta et al., 2017). A quantificação precisa das emissões permite estimar créditos de carbono potenciais, enquanto a produção de biogás pode ser incorporada a modelos de negócio circulares. Nesse contexto, a combinação entre práticas nutricionais otimizadas, tecnologias de tratamento de resíduos e ferramentas digitais de monitoramento pode reposicionar o setor como referência em sustentabilidade, reforçando seu papel na agenda climática global (De Souza et al., 2021; Savian et al., 2023).

Por fim, embora os achados reforcem a relevância da suinocultura brasileira como foco de estratégias de mitigação, também evidenciam limitações estruturais e informacionais que devem ser enfrentadas. A necessidade de ampliar bancos de dados regionais, padronizar indicadores e garantir suporte técnico à adoção das tecnologias sugeridas são desafios ainda presentes. Assim, este estudo propõe uma agenda integrada de pesquisa, inovação e políticas públicas, capaz de fomentar a transição da suinocultura para modelos de produção de baixo carbono, socialmente justos e economicamente viáveis.

5.1. Limitações do Estudo e Perspectivas Futuras

Apesar da solidez da abordagem metodológica adotada, é fundamental reconhecer algumas limitações inerentes a este estudo, as quais servem como base para futuras melhorias e aprofundamentos.

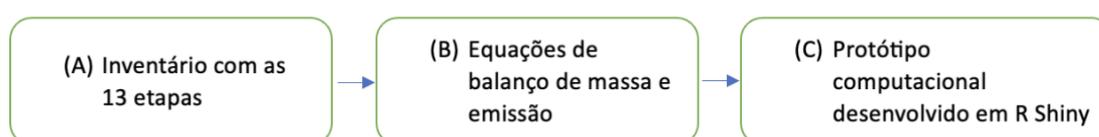
Primeiramente, o modelo desenvolvido assume uma dieta padrão baseada na região Centro-Sul do Brasil, utilizando dados médios de consumo e composição de ração. Essa premissa pode impactar a acurácia das estimativas

em sistemas de alimentação alternativos ou em regiões com insumos e manejos significativamente distintos.

Adicionalmente, o escopo atual do modelo não contempla a volatilização de NH_3 oriunda da excreta. Este é um processo que pode resultar em perdas significativas de nitrogênio e contribuir indiretamente para as emissões de N_2O , conforme descrito pelo IPCC (2006). Outras emissões não abrangidas incluem aquelas provenientes da fermentação prolongada de dejetos sólidos mal manejados, que podem gerar emissões de CH_4 e N_2O superiores às previstas, e as emissões de CO_2 de origem fóssil associadas ao transporte, geralmente categorizadas como Escopo 3 em inventários corporativos.

Entretanto, a flexibilidade e a modularidade do modelo desenvolvido permitem sua expansão futura. Já estão previstas versões subsequentes que buscarão integrar sensores IoT (Internet das Coisas) para a leitura em tempo real de parâmetros como temperatura, pH e sólidos dos dejetos. Essa integração tem o potencial de aprimorar substancialmente a precisão dos fatores de emissão. Da mesma forma, o protótipo será preparado para acoplamento direto a inventários corporativos em plataformas ESG, especialmente para apoiar estimativas de Escopo 3, ampliando sua aplicabilidade no contexto da governança ambiental.

Figura 11 - Integração entre os principais blocos metodológicos



Fonte: Autor.

A Figura 3 ilustra a integração entre os principais blocos da metodologia: (A) o Inventário estruturado em 13 etapas, (B) as Equações de balanço de massa e emissão, e (C) o Protótipo computacional desenvolvido em R Shiny. Essa estrutura modular facilita a retroalimentação contínua e a atualização incremental do sistema, à medida que novas evidências, parâmetros regionais ou avanços tecnológicos se tornam disponíveis.

As perspectivas futuras incluem, portanto, aprimorar a granularidade dos dados de entrada, expandir o escopo das emissões consideradas e integrar o protótipo a ecossistemas de dados mais amplos. Essas direções de pesquisa e desenvolvimento visam não apenas refinar as estimativas de GEE na suinocultura brasileira, mas também fortalecer sua capacidade de participar de mercados de crédito de carbono e biogás, e de cumprir as metas estabelecidas em pactos climáticos internacionais, como o Acordo de Paris e as Contribuições Nacionalmente Determinadas.

6. CONCLUSÃO

Este estudo demonstrou a viabilidade e a necessidade da adaptação de protocolos globais, como o da FAO (2018), às condições específicas da suinocultura brasileira para a quantificação robusta e contextualizada das emissões de gases de efeito estufa. Ao identificar pontos críticos e subsidiar o desenvolvimento de ferramentas digitais, a pesquisa respondeu à questão central de como a Avaliação do Ciclo de Vida pode ser aplicada para otimizar a gestão ambiental do setor.

Os resultados confirmaram que as principais fontes de impacto ambiental na suinocultura brasileira residem na produção de ração e no manejo de dejetos, alinhando-se à literatura existente (Rigolot et al., 2010; McAuliffe et al., 2017). A aplicação da ACV revelou-se eficaz na identificação desses pontos críticos, permitindo a alocação precisa de recursos para mitigação e fornecendo diretrizes para a criação de modelos matemáticos avançados.

A contribuição central desta dissertação reside no desenvolvimento de um modelo matemático e de um protótipo de aplicativo em R Shiny. Essa inovação tecnológica oferece uma ferramenta prática e cientificamente validada para estimar as emissões de GEE ao longo da cadeia produtiva da suinocultura brasileira. O protótipo capacita produtores e gestores a monitorar indicadores, simular cenários e tomar decisões fundamentadas em dados, promovendo a eficiência e a sustentabilidade do setor. Estratégias como o manejo eficiente da alimentação e o uso de biodigestores no tratamento de dejetos são elementos-

chave para a redução de emissões, reforçando a posição do Brasil como líder na produção de carne suína sustentável.

Apesar das significativas contribuições, o estudo reconhece suas limitações, como a exclusão de algumas etapas do ciclo produtivo e a volatilização de amônia, conforme detalhado na Seção 6. Contudo, a flexibilidade e modularidade do modelo abrem diversas perspectivas futuras, incluindo a integração com sensores IoT e plataformas ESG, visando aprimorar a precisão das estimativas e expandir a aplicabilidade da ferramenta.

Em suma, a adaptação de protocolos globais ao contexto brasileiro é uma estratégia essencial para a suinocultura. Ao fortalecer a integração entre políticas públicas e práticas do setor privado, e ao investir na disseminação de tecnologias e ferramentas baseadas em ACV, o setor poderá não apenas atender às crescentes demandas por proteína animal sustentável, mas também liderar os esforços globais em direção a uma economia de baixo carbono.

7. REFERÊNCIAS

ABPA. Relatório anual 2024. São Paulo: ABPA, 2024. Disponível em: <https://abpa-br.org>. Acesso em: 28 dez. 2024.

AGROCERES PIC. Catálogo técnico de produtos. Rio Claro: Agrocere PIC, 2020. Disponível em: <https://www.agroceres.com.br/catalogo>. Acesso em: 29 jul. 2024.

AGROCERES PIC. Manual de manejo de suínos: matrizes e marrãs. Rio Claro: Agrocere PIC, 2018.

AGROCERES PIC. Manual técnico de suinocultura: manejo, nutrição e reprodução. Ribeirão Preto: Agrocere PIC, 2018.

AGROCERES PIC. Produtividade do rebanho de suinocultura brasileira. 2018.

ANDRETTA, I. et al. Environmental impacts of precision feeding programs applied in pig production. *Animal: an international journal of animal bioscience*, v.

12, n. 9, p. 1990-1998, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1017/S1751731117003159>. Acesso em: 29 jul. 2024.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DOS CRIADORES DE SUÍNOS. Produção de suínos: teoria e prática. Brasília: ABCS, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 14040: Environmental management- Life Cycle Assessment- Principles and Structure. Rio de Janeiro, 2014a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 14044: Environmental management- Life Cycle Assessment- Requirements and Guidelines. Rio de Janeiro, 2014b

BPEX. Pig yearbook 2014. Warwickshire: AHDB Pork, 2014. Disponível em: <https://pork.ahdb.org.uk/media/271123/pigyearbook2014.pdf>. Acesso em: 29 jul. 2024.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Plano ABC (Agricultura de Baixa Emissão de Carbono). Brasília: MAPA, 2021. Disponível em: <http://www.agricultura.gov.br/assuntos/sustentabilidade/plano-abc>. Acesso em: 5 ago. 2024.

Brasil. Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações (MCTI). *Estimativas anuais de emissões de gases de efeito estufa no Brasil*. 6. ed., 2022. Relatório da Coordenação-Geral de Ciência do Clima e Sustentabilidade, Brasília, 2022. Disponível em: repositorio.mcti.gov.br/handle/mctic/4966

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Plano Nacional sobre Mudança do Clima. Brasília: MMA, 2021. Disponível em: <http://www.mma.gov.br/clima/politica-nacional-sobre-mudanca-do-clima>. Acesso em: 5 ago. 2024.

CEDERBERG, C.; FLYSJÖ, A. Life cycle inventory of 23 dairy farms in south-western Sweden. The Swedish Institute for Food and Biotechnology, 2004. Disponível em: <https://www.sik.se>. Acesso em: 12 nov. 2023.

CHERUBINI, F.; BARGIGLI, S.; ULGIATI, S. Life cycle assessment of urban waste management: energy performances and environmental impacts. The case of Rome, Italy. *Waste Management*, v. 29, n. 1, p. 40-51, 2009. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0956053X08003719>. Acesso em: 29 jul. 2024.

CHOZHAVENDHAN, S. et al. Current and prognostic overview on the strategic exploitation of anaerobic digestion and digestate: a review. *Environmental Research*, v. 216, 114526, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.envres.2022.114526>. Acesso em: 29 jul. 2024.

DE SOUZA, N.; JUNQUEIRA, T.; CAVALETT, O. Opportunities and challenges for bioenergy-livestock integrated systems in Brazil. *Industrial Crops and Products*, v. 174, 114091, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2021.114091>. Acesso em: 29 jul. 2024.

DONG, H. et al. 2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories: volume 4 – agriculture, forestry and other land use. Hayama, Japan: IGES, 2006. Disponível em: <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/vol4.html>. Acesso em: 20 ago. 2024.

EMBRAPA. Dados de suinocultura. Brasília: EMBRAPA, 2024. Disponível em: <https://www.embrapa.br/suinocultura>. Acesso em: 29 jul. 2024.

EMBRAPA. Relatório anual de atividades 2021. Brasília: EMBRAPA, 2021. Disponível em: <https://www.embrapa.br/relatorios>. Acesso em: 29 jul. 2024.

FAO. FAO statistical yearbook 2023. Rome: FAO, 2023. Disponível em: <http://www.fao.org/statistics/yearbook>. Acesso em: 5 ago. 2024.

FAO. Greenhouse gas emissions from pig and chicken supply chains - guidelines for quantification. Rome: FAO, 2013. Disponível em: <https://www.fao.org/3/i3460e/i3460e.pdf>. Acesso em: 29 jul. 2024.

FAO. Livestock's long shadow: environmental issues and options. Rome: FAO, 2006. Disponível em: <https://www.fao.org/3/a0701e/a0701e.pdf>. Acesso em: 29 jul. 2024.

FAO. Statistics. Rome: FAO, 2024. Disponível em: <https://www.fao.org/statistics/en/>. Acesso em: 29 jul. 2024.

FAO. Transforming food and agriculture to achieve the SDGs. Rome: FAO, 2018. Disponível em: <https://www.fao.org/3/I9900EN/i9900en.pdf>. Acesso em: 29 jul. 2024.

HOLLAS, C. E. et al. Life cycle assessment of waste management from the Brazilian pig chain residues in two perspectives: electricity and biomethane production. *Journal of Cleaner Production*, v. 354, 131654, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.131654>. Acesso em: 29 jul. 2024.

IBGE. Produção da pecuária municipal 2019. Rio de Janeiro: IBGE, 2019. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/estatisticas/economicas/agricultura-e-pecuaria/9107-producao-da-pecuaria-municipal.html?=&t=o-que-e>. Acesso em: 29 jul. 2024.

INOUE, K. R. A. et al. Potential of reduction in the emission of methane and nitrous oxide from swine wastewater after treated by two different systems. *Engenharia Agrícola*, v. 36, n. 6, p. 1198-1205, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/1809-4430-Eng.Agric.v36n6p1198-1205/2016>. Acesso em: 29 jul. 2024.

IPCC. Climate change 2021: the physical science basis. Geneva: IPCC, 2021. Disponível em: <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/>. Acesso em: 29 jul. 2024.

IPCC. Climate change and land: an IPCC special report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems. Geneva: IPCC, 2019.

Disponível em: <https://www.ipcc.ch/srccl-report-download-page/>. Acesso em: 29 jul. 2024.

IPCC. Guidelines for national greenhouse gas inventories: volume 4 - agriculture, forestry and other land use. Geneva: IPCC, 2006. Disponível em: <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/vol4.html>. Acesso em: 29 jul. 2024.

LI, Y. Towards fast prototyping of cloud-based environmental decision support systems for environmental scientists using R Shiny and Docker. *Environmental Modelling & Software*, v. 132, 104797, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2020.104797>. Acesso em: 29 jul. 2024.

MAIN, R. G. et al. Impact of lactation feed intake on sow productivity and subsequent growth performance of offspring. *Journal of Animal Science*, v. 95, n. 6, p. 2367-2378, 2017.

MAIN, R. G. et al. Lactation nutrition and its effects on sow milk production and litter growth. *Journal of Animal Science*, v. 95, n. 3, p. 1057-1067, 2017.

McAULIFFE, G. A. et al. Assessing the environmental impact of ruminant systems using a life cycle approach: a case study of the United Kingdom beef sector. *Journal of Agricultural Science*, v. 155, n. 7, p. 1159-1174, 2017. Disponível em: <https://www.cambridge.org/core/journals/journal-of-agricultural-science/article/abs/assessing-the-environmental-impact-of-ruminant-systems-using-a-life-cycle-approach-a-case-study-of-the-united-kingdom-beef-sector/B38A2FDD7B2C3C7DA3467D33B14DA8C2>. Acesso em: 29 jul. 2024.

McAULIFFE, G. A. et al. Environmental trade-offs of pig production systems under varied operational efficiencies. *Journal of Cleaner Production*, v. 165, p. 1163-1173, 2017.

MEDEIROS, M. et al. Biogas production from animal residues: case studies from Brazil. *Renewable Energy*, v. 148, p. 659-667, 2020.

MELLO, R. M. et al. Gestational feed requirements in modern sows and the impact on productivity. *Livestock Science*, v. 230, p. 55-64, 2019.

MORENO, J. et al. Assessing synergies and trade-offs of diverging Paris-compliant mitigation strategies with long-term SDG objectives. *Global Environmental Change*, v. 78, 102624, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2022.102624>. Acesso em: 29 jul. 2024.

RATZ, R. J. Uso de bactérias do gênero *Bacillus* como promotoras de crescimento para a cultura do milho e da soja. 2014. Dissertação (Mestrado em Ciências Agrárias) – Universidade do Oeste do Paraná, Cascavel, 2014. Disponível em: <http://tede.unioeste.br/bitstream/tede/1855/1/Raquel%20Jackeline%20Ratz.pdf>. Acesso em: 29 jul. 2024.

REIS, J. et al. Economic and environmental impacts of integrated systems adoption in Brazilian agriculture-forest frontier. *Agroforestry Systems*, v. 97, p. 847-863, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10457-023-00831-5>. Acesso em: 29 jul. 2024.

RIGOLLOT, C. et al. Modelling GHG emissions from pig production systems. *Agricultural Systems*, v. 103, p. 117-126, 2010.

RIGOLLOT, C. et al. Modelling of manure management strategies to reduce GHG emissions from pig houses and outdoor storage based on a combination of experimental data and IPCC guidelines. *Animal Feed Science and Technology*, v. 166-167, p. 441-451, 2010. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0377840110001834>. Acesso em: 29 jul. 2024.

RIGOLLOT, C. et al. Modelling of manure production by pigs and NH₃, N₂O and CH₄ emissions. Part I: animal excretion and enteric CH₄, effect of feeding and performance. *Animal*, v. 4, n. 8, p. 1401-1412, 2010.

ROSTAGNO, H. S. et al. Tabela Brasileira para Aves e Suínos: Composição de Alimentos e Exigências Nutricionais. 5. ed. Viçosa: UFV, 2024.

SANTOS, E. A.; SILVA, R. F.; RIBEIRO, S. M. Estratégias nutricionais para suínos: impactos na produção e no ambiente. *Revista Brasileira de Zootecnia*, v. 49, n. 5, p. 1025-1032, 2020.

x

SANTOS, V. C. et al. Nutritional management and feed intake in pre-breeding sows: implications on reproductive performance. *Brazilian Journal of Animal Science*, v. 49, n. 10, p. 1-15, 2020.

SAVIAN, M.; DA PENHA SIMON, C.; HOLDEN, N. Evaluating environmental, economic, and social aspects of an intensive pig production farm in the south of Brazil: a case study. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, v. 28, p. 1544-1560, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11367-023-02223-4>. Acesso em: 29 jul. 2024.

SONG, C. et al. Methane emissions from municipal wastewater collection and treatment systems. *Environmental Science & Technology*, v. 57, n. 6, p. 2248-2261, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1021/acs.est.2c04388>. Acesso em: 29 jul. 2024.

SUMNER, T.; SHEPHARD, E.; BOGLE, I. D. L. A methodology for global sensitivity analysis of time-dependent outputs in systems biology modelling. *Journal of The Royal Society Interface*, v. 9, n. 74, p. 2156-2166, 4 abr. 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1098/rsif.2011.0891>.

UMESHA, C. Recent forms of fertilizers and their use to improve nutrient use efficiency and to minimize environmental impacts. *International Journal of Pure & Applied Bioscience*, v. 5, n. 2, p. 858-863, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.18782/2320-7051.2739>. Acesso em: 29 jul. 2024.

UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE (USDA). *Livestock and poultry: world markets and trade*. Washington: USDA, 2024.

UNFCCC. Adoption of the Paris Agreement. Paris: UNFCCC, 2015. Disponível em: <https://unfccc.int/resource/docs>. Acesso em: 29 jul. 2024.

VECHI, Nathalia T.; JENSEN, Nina S.; SCHEUTZ, Charlotte. Methane emissions from five Danish pig farms: Mitigation strategies and inventory estimated emissions. **Journal of Environmental Management**, v. 317, p. 115319, 2022.

WIEDEMANN, S. G. et al. Environmental impacts of Australian pig farming using a life cycle assessment approach. *Animal Production Science*, v. 50, n. 8, p. 748-759, 2010.

Apêndice A

Colunas necessárias para que o aplicativo funcione:

Categoria	FaseProducao	N_inicial	TaxaMortalidade	PesoInicial.kg	PesoFinal.kg	DiasCadaFase	Racao_Indicada	Consumo_fase	ProteinaDieta	N_ingrido	Fosforo_na_racao	P_ingrido	Racao_fornecida_animal
Marrã	PréCobertura	177,00	1,13	140,00	160,00	21,00	3,08	64,77	17,55	181,90	0,38	24,73	11464,85
Matriz	PréCobertura	155,00	1,94	172,00	175,00	6,34	2,36	14,96	17,55	42,02	0,38	5,71	2318,96
Matriz	PréCobertura	155,00	1,94	182,00	185,00	6,34	2,42	15,36	17,55	43,14	0,38	5,86	2381,19
Matriz	PréCobertura	621,00	1,93	219,00	222,00	6,34	2,65	16,79	17,55	47,17	0,38	6,41	10429,62
Marrã	Gestação	175,00	1,14	150,00	213,00	115,00	2,40	275,54	14,21	626,66	0,37	101,29	48219,36
Matriz	Gestação	152,00	1,97	172,00	240,00	115,00	2,63	301,96	14,21	686,76	0,37	111,01	45898,52
Matriz	Gestação	152,00	1,97	182,00	260,00	115,00	2,79	320,56	14,21	729,05	0,37	117,84	48724,63
Matriz	Gestação	609,00	1,97	219,00	280,00	115,00	3,07	353,17	14,21	803,23	0,37	129,83	215082,03
Matriz	Lactante	322,00	1,86	213,00	185,00	25,38	7,43	188,50	17,55	529,36	0,38	71,96	60695,67
Matriz	Lactante	149,00	2,01	240,00	210,00	25,38	8,01	203,25	17,55	570,80	0,38	77,59	30284,74
Matriz	Lactante	597,00	2,01	280,00	240,00	25,38	8,61	218,44	17,55	613,45	0,38	83,39	130409,86
Marrã	PrimeiraFase	220,00	0,85	98,00	130,00	35,00	2,96	103,51	17,55	290,70	0,38	39,52	22773,09
Marrã	SegundaFase	187,00	0,96	130,00	140,00	14,00	2,78	38,96	17,55	109,40	0,38	14,87	7284,81
Leitão Lactente	Maternidade	32878,38	8,68	1,36	5,17	25,38	NA	NA	17,55	0,00	0,38	0,00	0,00
Leitão Pós desmamado	Creche (Pré inicial1)	30024,54	4,10	5,17	6,06	7,00	0,22	1,56	10,62	2,66	0,34	0,53	46925,60
Leitão Pós desmamado	Creche (Pré inicial2)	28793,53	0,50	6,06	10,08	12,00	0,43	5,13	12,00	9,85	0,35	1,78	147766,62
Leitão Pós desmamado	Creche (Inicial1)	28649,56	0,90	10,08	17,16	13,00	0,74	9,61	18,15	27,90	0,42	4,07	275192,65
Leitão Pós desmamado	Creche (Inicial2)	28391,72	1,30	17,16	28,60	19,00	0,98	18,55	19,16	56,85	0,41	7,63	526584,21
Leitão Crescimento1	Terminação	28022,62	0,32	28,60	51,50	27,00	1,75	47,24	19,30	145,92	0,41	19,56	1323873,38
Leitão Crescimento2	Terminação	27932,95	0,48	51,50	82,10	29,00	3,01	87,18	17,41	242,89	0,39	34,15	2435313,06
Cevado Engorda	Terminação	27798,87	0,61	82,10	98,60	14,00	4,34	60,76	15,38	149,48	0,37	22,53	1688960,33
Acabamento	Terminação	27629,30	0,87	98,60	130,00	30,00	5,21	156,33	15,35	383,86	0,38	58,89	4319386,96

Fonte: Autora.

