JOURNAL OF EDUCATION, SCIENCE AND HEALTH – JESH
Revista de Educação, Ciência e Saúde
DOI: https://www.doi.org/10.52832/jesh.v5i3.600
Home page: https://bio10publicacao.com.br/jesh
e-ISSN: 2763-6119

PROTÓTIPO DE APLICATIVO PARA ESTIMATIVA DE EMISSÕES DE GASES DE EFEITO ESTUFA NA SUINOCULTURA BRASILEIRA

PROTOTYPE APPLICATION FOR ESTIMATING GREENHOUSE GAS EMISSIONS IN BRAZILIAN PIG FARMING

APLICACIÓN PROTOTIPO PARA LA ESTIMACIÓN DE EMISIONES DE GASES DE EFECTO INVERNADERO EN LA PORCICULTURA BRASILEÑA

Cármem Lúcia Marques Martins [1*]; Clandio Favarini Ruviaro [2]; Maurício Hiroyuki Kubo [3]; Lethicia Camila Dorce [4];

[1]Especialista em Avaliação de Impactos Ambientais e Processos de Licenciamento Ambiental pelo SENAC, Aluna de mestrado pela UFGD, Resende, RJ, Brasil; [2]Doutor em agronegócios pela UFRGS, professor da UFGD, Dourados, MS, Brasil; [3]Mestre em Agronegócios pela UFGD, Aluno de Doutorado pela UFGD, Naviraí, MS, Brasil; [4]Doutora em agronegócios pela UFGD, professora da UFGD, Dourados, MS, Brasil.
*Autor correspondente: carmemlmmartins@icloud.com.

Recebido: 10/08/2025 | **Aprovado**: 25/08/2025 | **Publicado**: 06/09/2025

Resumo: Este estudo apresenta o desenvolvimento de um modelo metodológico e de um protótipo de aplicativo voltado à estimativa de emissões de gases de efeito estufa (GEE) na suinocultura brasileira, com base nas diretrizes da FAO (2018). A metodologia segue os princípios da Avaliação do Ciclo de Vida (ACV), abrangendo reprodução, crescimento e terminação, do berço ao portão da fazenda. Foram utilizados dados de 2013 a 2023 e cálculos baseados em equações adaptadas do IPCC (2006/2019). Identificou-se que a alimentação e o manejo de dejetos são os principais pontos de emissão. O protótipo, desenvolvido em R Shiny, auxilia na tomada de decisão e adoção de práticas sustentáveis. Conclui-se que a ACV, aliada a tecnologias digitais, é ferramenta eficaz para mitigar impactos ambientais no setor.

Palavras-chave: Sustentabilidade. ACV. Bioeconomia. Suinocultura. GEE.

Abstract: This study presents the development of a methodological model and a prototype application aimed at estimating greenhouse gas (GHG) emissions in Brazilian pig farming, based on FAO (2018) guidelines. The methodology follows the principles of Life Cycle Assessment (LCA), covering reproduction, growth, and finishing stages from cradle to farm gate. Data from 2013 to 2023 and calculations adapted from IPCC (2006/2019) equations were used. Feeding and manure management were identified as the main emission sources. The prototype, developed in R Shiny, supports decision-making and the adoption of sustainable practices. It is concluded that LCA, combined with digital technologies, is an effective tool to mitigate environmental impacts in the sector.

Keywords: Sustainability. LCA. Bioeconomy. Pig farming. GHG.

Resumen: Este estudio presenta el desarrollo de un modelo metodológico y de un prototipo de aplicación orientado a la estimación de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) en la porcicultura brasileña, basado en las directrices de la FAO (2018). La metodología sigue los principios de la Evaluación del Ciclo de Vida (ECV), abarcando las etapas de reproducción, crecimiento y engorde, desde la cuna hasta la puerta de la granja. Se utilizaron datos del período de 2013 a 2023 y cálculos basados en ecuaciones adaptadas del IPCC (2006/2019). Se identificó que la alimentación y la gestión de los desechos son los principales puntos de emisión. El prototipo, desarrollado en R Shiny, ayuda en la toma de decisiones y en la adopción de prácticas sostenibles. Se concluye que la ECV, aliada a tecnologías digitales, es una herramienta eficaz para mitigar los impactos ambientales en el sector.

Palabras-clave: Sostenibilidad. ECV. Bioeconomía. Porcicultura. GEI.

1 INTRODUÇÃO

A suinocultura brasileira desempenha um papel estratégico no agronegócio, posicionando-se como um dos segmentos mais competitivos e relevantes da produção de proteína animal no mundo (FAO, 2023; ABPA, 2024). Com um rebanho que ultrapassa 40 milhões de cabeças, o Brasil figura entre os maiores produtores e exportadores de carne suína globalmente, destinando 76% da produção ao consumo interno e 24% à exportação. Em 2023, as exportações alcançaram 1,230 milhão de toneladas, refletindo um aumento de 9,8% em relação ao ano anterior e consolidando o país como o quarto maior exportador mundial (ABPA, 2024).

Essa evolução, contudo, vem acompanhada de desafios crescentes no campo ambiental, com destaque para as emissões de gases de efeito estufa (GEE), a pressão sobre recursos naturais e a necessidade de modernização dos sistemas produtivos. Segundo a FAO (2018) e o IPCC (2019), a produção animal está entre as principais fontes de emissões de metano (CH_4) e óxido nitroso (N_2O), gases que possuem alto potencial de aquecimento global e são diretamente relacionados à fermentação entérica, produção de ração e manejo de dejetos.

A suinocultura, como atividade intensiva, exige soluções que conciliem produtividade, sustentabilidade e conformidade com compromissos internacionais, como o Acordo de Paris (UNFCCC, 2015) e as Contribuições Nacionalmente Determinadas (NDCs), pelas quais o Brasil se compromete a reduzir em 50% suas emissões até 2030. Nesse sentido, ferramentas de avaliação ambiental, como a Avaliação do Ciclo de Vida (ACV), têm se mostrado fundamentais para inventariar e quantificar os impactos ambientais ao longo da cadeia produtiva, especialmente na fase "do berço ao portão da fazenda", que engloba reprodução, crescimento e terminação.

Estudos como os de Gerber et al. (2013) destacam a importância da ACV na mensuração de impactos da pecuária, fornecendo subsídios técnicos para políticas públicas e estratégias de mitigação de emissões. No Brasil, iniciativas como o Plano ABC+ e os programas de incentivo ao uso de biodigestores reforçam esse movimento em direção à agropecuária de baixo carbono (EMBRAPA, 2021).

Nesse contexto, torna-se urgente o desenvolvimento de ferramentas que possibilitem o monitoramento e a quantificação das emissões de GEE, com base em metodologias robustas e adaptadas à realidade brasileira. A Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) destaca-se como uma abordagem eficiente para estimar os impactos ambientais ao longo da cadeia produtiva, oferecendo subsídios para a tomada de decisão técnica e política.

A suinocultura brasileira passou por significativas transformações nas últimas décadas, consolidando-se como uma atividade tecnificada, voltada tanto ao mercado interno quanto à exportação. Esse processo foi impulsionado por políticas públicas, inovações zootécnicas e exigências crescentes de mercados consumidores em relação à rastreabilidade e sustentabilidade ambiental.

Nesse cenário, as emissões de gases de efeito estufa (GEE) tornam-se um dos principais pontos de atenção, pois comprometem a imagem ambiental do setor e exigem a adoção de métricas e ferramentas que quantifiquem e mitiguem esses impactos. A Avaliação do Ciclo de Vida (ACV), além de ser uma ferramenta robusta de quantificação, oferece uma base comparativa entre sistemas de produção e práticas distintas.

Estudos conduzidos pela FAO e IPCC vêm apontando a necessidade de metodologias cada vez mais integradas e regionais, que possam captar as singularidades dos sistemas pecuários brasileiros. É nesse contexto que a presente proposta se insere, articulando dados produtivos, ambientais e tecnológicos em uma aplicação computacional voltada ao campo.

Diante do exposto, este estudo tem como objetivo propor um modelo metodológico, baseado na ACV, para estimativa de emissões de GEE na suinocultura brasileira. O foco recai sobre as fases produtivas mais críticas do ciclo de vida dos suínos e o desenvolvimento de um protótipo computacional em R Shiny, capaz de simular fluxos de produção e calcular automaticamente as emissões por categoria animal e tipo de manejo. A proposta visa contribuir com a gestão ambiental no setor, fortalecendo a adoção de práticas sustentáveis e o alinhamento da suinocultura às exigências da bioeconomia e da governança climática internacional.

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Caracterização da pesquisa

Esta pesquisa apresenta natureza aplicada, com abordagem quantitativa e caráter exploratório-descritivo. Foi estruturada com base nos fundamentos da Avaliação do Ciclo de Vida (ACV), uma metodologia amplamente reconhecida e consolidada para mensuração de impactos ambientais em sistemas produtivos, especialmente no setor agropecuário. A fundamentação teórica adotada seguiu as diretrizes metodológicas da Organização das Nações Unidas para Alimentação e Agricultura (FAO, 2018) e do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC, 2006; 2019), protocolos esses que garantem comparabilidade internacional, rigor científico e robustez na elaboração de inventários de emissões de gases de efeito estufa (GEE).

2.2 Área de Estudo e Público-alvo

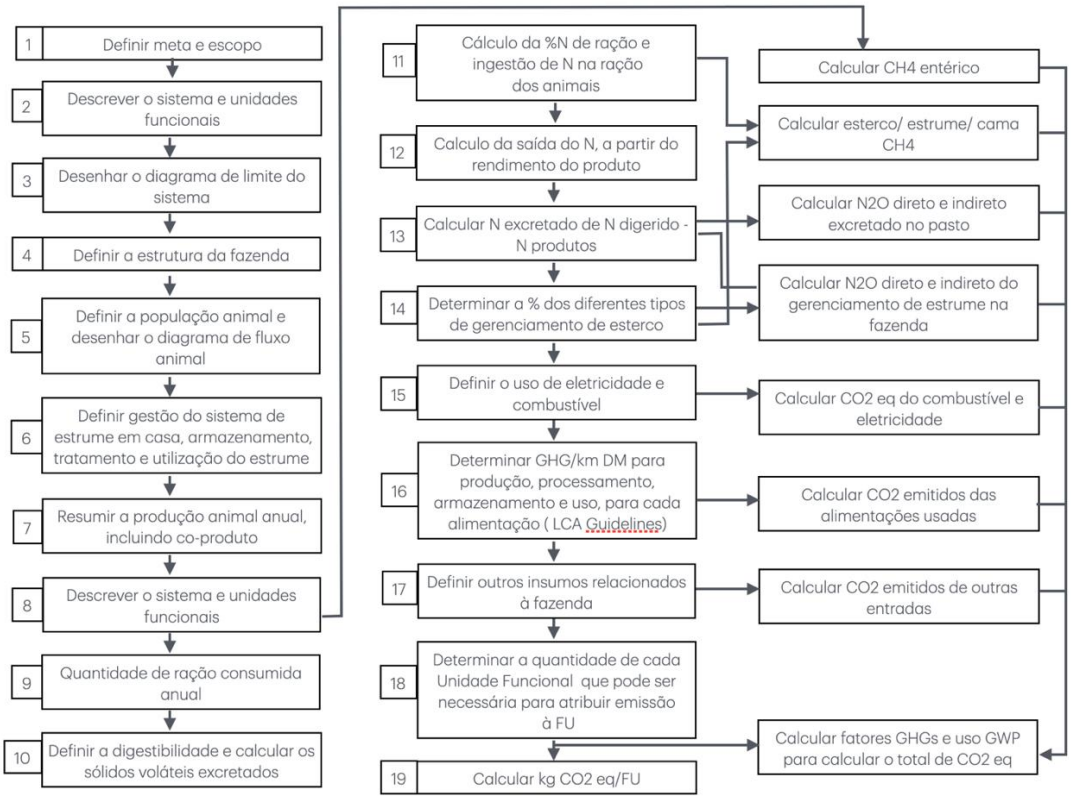
O estudo foi desenvolvido com foco na fase dois da cadeia produtiva da suinocultura, abrangendo as etapas de reprodução, crescimento e terminação dos suínos, conforme o escopo definido como "do berço ao portão da fazenda". Foram utilizadas informações secundárias obtidas junto a bases nacionais e internacionais, incluindo dados da EMBRAPA, IBGE, AGROCERES PIC, FAO e IPCC, cobrindo o período de 2013 a 2023. Como exemplo prático para desenvolvimento e validação do modelo proposto, adotou-se um sistema de produção teórico com 1.000 matrizes, representativo de granjas tecnificadas do Brasil. A ferramenta desenvolvida destina-se a suinocultores, técnicos, pesquisadores e tomadores de decisão, sendo adaptável a diferentes contextos regionais e produtivos.

2.3 Metodologia da pesquisa

A metodologia utilizada foi composta por treze etapas principais, incluindo: descrição dos sistemas produtivos, caracterização das fases produtivas, cálculo do consumo de ração, estimativas de ingestão e excreção de nutrientes (como nitrogênio e fósforo), digestibilidade dos alimentos, retenção de nutrientes nos tecidos, produção de sólidos voláteis (VS), quantificação das emissões de metano (CH_4) por fermentação entérica e

armazenamento de dejetos, quantificação das emissões de óxido nitroso (N_2O), além de estimativas de consumo de água e energia. As etapas relacionadas à logística, transporte e abate foram propositalmente excluídas, a fim de concentrar a análise na parte produtiva intrafazenda. Todas as fórmulas e coeficientes adotados foram baseados nas recomendações do IPCC (2006/2019), sendo devidamente ajustados às condições técnicas da suinocultura brasileira. Os cálculos iniciais foram realizados em planilhas eletrônicas e, posteriormente, integrados ao desenvolvimento de um protótipo computacional construído em RStudio, com uso da biblioteca Shiny. O aplicativo desenvolvido permite realizar simulações interativas, possibilitando a visualização automática das emissões por categoria animal, fase produtiva e tipo de manejo adotado em cada cenário modelado.

Figura 1 – Cadeia produtiva da suinocultura brasileira.



Fonte: Adaptado de FAO (2018).

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Resultados detalhados por fase produtiva

A modelagem proposta permitiu detalhar a emissão de gases de efeito estufa por fase do ciclo de produção. Na fase de reprodução (gestação e lactação), observou-se elevado consumo energético devido às necessidades metabólicas das matrizes e ao manejo intensivo. A fase de crescimento, por sua vez, apresentou emissões intermediárias, diretamente proporcionais ao ganho de peso e à ingestão alimentar.

Na fase de terminação, os suínos consomem entre 240 e 260 kg de ração, o que gera considerável produção de dejetos. Utilizando a equação de excreção de nutrientes adaptada da FAO (2018), foi possível calcular a quantidade de nitrogênio e fósforo excretados. Com base nos coeficientes de digestibilidade, também foi possível estimar os sólidos voláteis (VS) gerados, insumo essencial para a projeção das emissões de metano (CH_4) por via anaeróbia.

Além disso, o modelo simulou a eficiência de diferentes sistemas de manejo de dejetos, como lagoas anaeróbias, compostagem e biodigestores, apontando reduções potenciais de até 70% nas emissões quando tecnologias apropriadas são aplicadas.

3.2 Modelos matemáticos utilizados

Com o objetivo de garantir rigor técnico-científico e permitir a replicação do modelo proposto, esta seção apresenta as principais equações utilizadas na simulação das emissões de gases de efeito estufa (GEE) na suinocultura brasileira. As fórmulas foram adaptadas a partir das diretrizes metodológicas do IPCC (2006; 2019) e da FAO (2018), considerando os aspectos fisiológicos dos animais, o consumo alimentar, a digestibilidade da dieta e a produção e manejo dos dejetos. A aplicação dessas fórmulas permitiu a quantificação das emissões de metano (CH_4) e óxido nitroso (N_2O), associadas às diferentes fases da produção suinícola. A seguir, apresentam-se as equações fundamentais e suas respectivas variáveis.

- Cálculo do consumo de ração por fase:

$$Ctotal = Cdiário \times Ndias$$

Onde:

Ctotal = Consumo total de ração na fase;

Cdiário = consumo médio diário;

Ndias = Número de dias em que o animal permanece na fase;

- Excreção de nitrogênio:

$$Ne = (Ning - Nret) \times QtdeAnimais$$

Onde:

Ne = Nitrogênio excretado;

Ning = Ingestão de nitrogênio;

Nret = Retenção de nitrogênio.

- Emissão de metano por manejo de dejetos:

$$CH_4 = VS \times B_0 \times MCF \times 0.67$$

Onde:

CH_4 = Emissão de metano (kg/ano);

VS = Sólidos voláteis;

B_0 = Potencial de produção de biogás (m^3/kg VS), assumido o valor típico para suínos de 0,29;

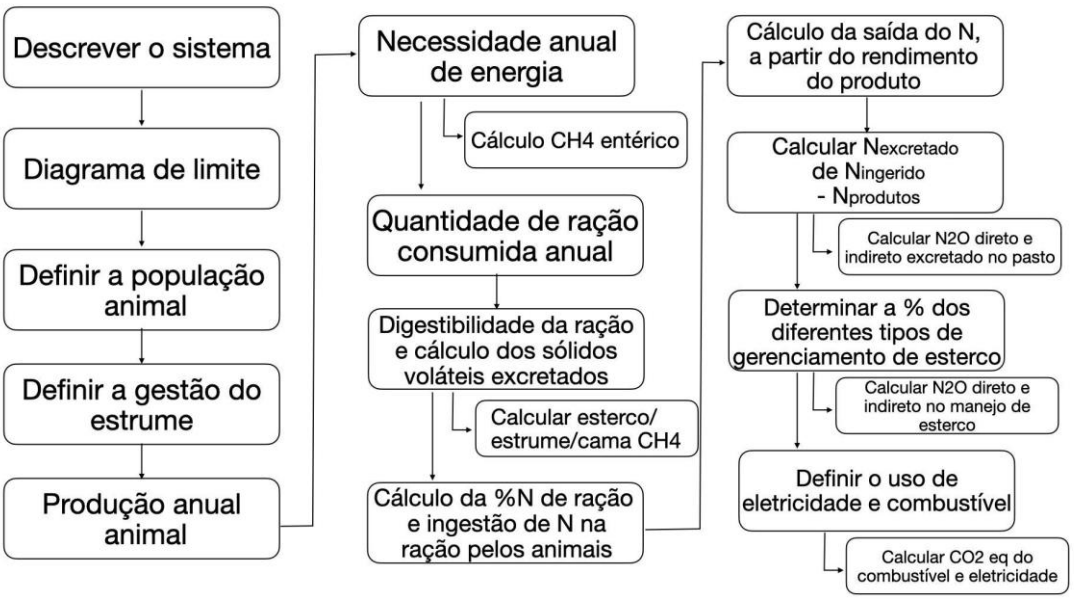
MCF = Fator de conversão metanogênica.

Essas equações foram implementadas em planilhas eletrônicas e validadas por meio de simulações computacionais no ambiente R, com uso do pacote Shiny para criação da interface.

3.3 Modelagem computacional do protótipo

Para operacionalizar as etapas metodológicas de estimativa de emissões de gases de efeito estufa (GEE) na suinocultura, foi desenvolvida uma modelagem computacional capaz de integrar dados zootécnicos, ambientais e energéticos em um sistema interativo. Essa modelagem foi implementada por meio do software RStudio, utilizando o pacote Shiny, o qual permite a construção de interfaces web dinâmicas para visualização de resultados em tempo real. O fluxo lógico da modelagem foi estruturado em 13 etapas, conforme ilustrado na Figura 2.

Figura 2 – Fluxograma das 13 etapas metodológicas do estudo.



Fonte: Elaborado pela autora, adaptado da FAO (2018), 2025.

O fluxograma apresentado na Figura 2 organiza as etapas em três grandes blocos de análise:

- **Bloco inicial (caracterização do sistema):** abrange a descrição do sistema produtivo, definição da população animal, delimitação dos limites do sistema (fronteiras da ACV) e a caracterização da gestão dos dejetos. Esses elementos compõem o cenário-base da análise.

- **Bloco intermediário (cálculos principais):** contempla as estimativas de necessidades energéticas dos animais (para cálculo do CH_4 entérico), da quantidade total de ração consumida e da digestibilidade dos alimentos. A partir dessas variáveis, são calculados os sólidos voláteis (VS), os níveis de nitrogênio ingerido e excretado, e as emissões associadas à fermentação anaeróbia dos dejetos.

- **Bloco final (emissões e uso energético):** trata da quantificação das saídas de nitrogênio, emissões diretas e indiretas de óxido nitroso (N_2O) oriundas da excreta e da gestão dos dejetos além das emissões de dióxido de carbono equivalente (CO_2e) associadas ao uso de eletricidade e combustíveis fósseis.

Cada etapa do fluxograma alimenta diretamente os módulos do protótipo computacional, permitindo uma modelagem parametrizada e adaptável a diferentes realidades produtivas.

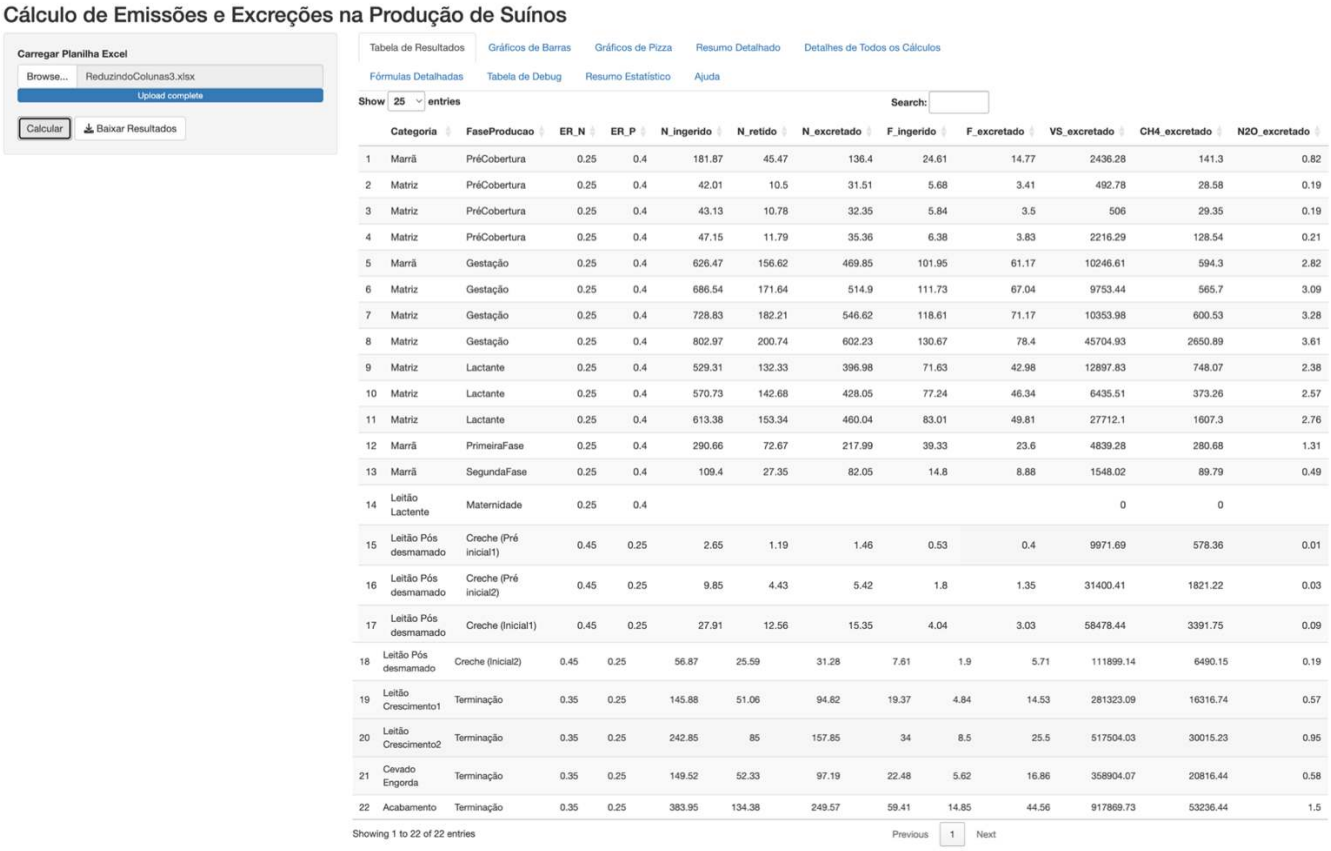
A estruturação computacional baseada no fluxograma da Figura 2 proporciona transparência, reprodutibilidade e escalabilidade ao modelo desenvolvido. O sequenciamento lógico das variáveis permite que o usuário insira dados com clareza, simulando cenários com diferentes tipos de manejo, consumo de ração e estratégias de destinação dos dejetos. Além disso, o modelo se alinha às boas práticas de Avaliação do Ciclo de

Vida (ACV), uma vez que considera entradas e saídas do sistema de forma sistemática, com base em protocolos internacionalmente reconhecidos. A possibilidade de calcular separadamente as emissões de CH_4, N_2O e CO_2e garante uma visão abrangente das fontes de emissão, permitindo comparações entre sistemas produtivos.

A modelagem computacional, portanto, não apenas automatiza os cálculos, mas fortalece o processo decisório por parte de suinocultores, técnicos e formuladores de políticas públicas. A estrutura apresentada é flexível e poderá, futuramente, ser expandida para outras cadeias produtivas do agronegócio, como a bovinocultura e a avicultura.

Dando continuidade à estrutura metodológica apresentada no fluxograma (Figura 2), a Figura 3 exibe a interface operacional do protótipo computacional desenvolvido em R Shiny. Essa interface foi projetada para oferecer uma experiência interativa ao usuário, permitindo a simulação de cenários produtivos a partir da inserção de dados por categoria animal e fase de produção. O objetivo é facilitar a visualização das emissões de gases de efeito estufa (CH_4 e N_2O), bem como os fluxos de ingestão e excreção de nutrientes, viabilizando diagnósticos ambientais precisos e customizados para diferentes sistemas de suinocultura.

Figura 3 – Interface do protótipo em R Shiny, com simulação por categoria animal.



Fonte: Elaborado pela autora, 2025.

A Figura 3 exemplifica de forma prática a aplicação direta do fluxograma da Figura 2, demonstrando a operacionalização computacional de cada uma das 13 etapas metodológicas. A lógica do sistema é completamente orientada por dados e reproduz, com fidelidade, os cálculos de ACV adaptados à suinocultura brasileira. O diferencial da interface reside em sua capacidade de customização e interatividade, permitindo que diferentes perfis

de usuários — desde técnicos de campo até pesquisadores e formuladores de políticas públicas — explorem os resultados de forma intuitiva. A segmentação dos dados por categoria animal e fase de produção proporciona análises granulares, fundamentais para identificar pontos críticos de emissão.

Observa-se, por exemplo, que na fase de terminação, categorias como "Cevado Engorda" e "Acabamento" apresentam os maiores valores de CH_4_excretado e VS_excretado, evidenciando a concentração de impactos ambientais nas etapas finais do ciclo produtivo. Já as fases iniciais, como "Creche" e "Maternidade", embora apresentem menor volume de excreção, ainda contribuem de forma significativa para o total de N_2O, especialmente em razão do manejo inadequado dos resíduos.

A análise dos dados revelou que o consumo de ração representa a principal fonte de emissões na cadeia produtiva suinícola, seguido pelo manejo de dejetos. Na fase de terminação, os animais consomem entre 240 e 260 kg de ração, o que gera elevado volume de sólidos voláteis e excreção de nitrogênio. Esses resíduos, quando mal manejados, tornam-se fontes relevantes de metano (CH_4) e óxido nitroso (N_2O), conforme previsto nas equações baseadas nos protocolos da FAO e do IPCC. A modelagem indicou ainda que o uso de biodigestores pode reduzir até 70% das emissões de metano associadas aos dejetos, além de proporcionar benefícios econômicos com a geração de biogás.

Outro destaque foi a importância da digestibilidade da ração e da eficiência alimentar para mitigar impactos ambientais. Animais com melhor aproveitamento de nutrientes excretam menos nitrogênio e fósforo, o que reduz o potencial de emissão de GEE e a carga poluente nos solos e cursos d'água. A melhoria desses parâmetros pode ser alcançada com ajustes na formulação das dietas, uso de aditivos e manejo nutricional adequado.

A aplicação do modelo em um rebanho de 1.000 matrizes permitiu validar o funcionamento do aplicativo desenvolvido. A interface permite inserir parâmetros de consumo, manejo e produtividade, retornando gráficos e relatórios com os resultados por categoria, fase ou tipo de manejo. Essa funcionalidade torna o protótipo uma ferramenta útil para técnicos, produtores e formuladores de políticas públicas, promovendo decisões baseadas em dados concretos.

A operacionalização do protótipo computacional, demanda uma base de dados zootécnicos confiável, capaz de refletir as especificidades dos diferentes estágios de desenvolvimento dos suínos. A Tabela 1 apresenta os principais parâmetros produtivos utilizados no modelo, incluindo o tempo de permanência em cada fase, bem como os valores médios de peso vivo inicial e final, essenciais para os cálculos de consumo de ração, excreção de nutrientes e geração de resíduos orgânicos.

Tabela 1 – Parâmetros zootécnicos e produtivos utilizados no modelo: consumo médio de ração, peso inicial/final, duração das fases.

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 de AGROCERES PIC (2018).

Os dados apresentados na Tabela 1 são fundamentais para a construção dos fluxos internos do modelo computacional, pois determinam com precisão:

- A duração média de cada fase produtiva, essencial para o cálculo do consumo total de ração (kg/dia/animal);
- Os pesos iniciais e finais de cada estágio, utilizados para estimar o índice de conversão alimentar (IC), ingestão de nutrientes e taxa de excreção de nitrogênio (N);
- A alocação de emissões por categoria animal, uma vez que fases como terminação e gestação possuem exigências metabólicas distintas.

A fase de terminação, por exemplo, é caracterizada por elevada ingestão de ração e produção de dejetos, representando o maior volume de emissões de GEE no ciclo produtivo — conforme evidenciado nas simulações apresentadas na Figura 3. Já as fases iniciais, como creche e lactação, embora de menor duração, requerem alta atenção nutricional e sanitária, influenciando diretamente na eficiência zootécnica e nos coeficientes de digestibilidade.

Portanto, a definição acurada desses parâmetros reforça a robustez técnica do modelo, garantindo que as estimativas de emissões reflitam o comportamento real dos sistemas produtivos brasileiros. Além disso, possibilita ao usuário do protótipo ajustar os valores conforme a realidade da granja, tornando o sistema altamente adaptável e aplicável em diferentes contextos regionais.

Com base nos parâmetros zootécnicos apresentados na Tabela 1 e nas simulações operadas pela interface do protótipo (Figura 3), a Tabela 2 apresenta os resultados estimados de emissão de gases de efeito estufa (GEE) por fase produtiva da suinocultura brasileira. Os valores foram calculados a partir dos dados inseridos no modelo computacional e convertidos em equivalentes de dióxido de carbono (CO_2e), utilizando os Potenciais de Aquecimento Global (GWP) estabelecidos pelo IPCC (2019).

Tabela 2 – Emissões estimadas por fase produtiva (kg de CH_4 e N_2O por animal/ano).

Fase Produtiva	**CH_4 (kg/animal/ano)**	**N_2O (kg/animal/ano)**	**Total GEE (kg CO_2e/animal/ano)**
Pré-cobertura	50.24	0.35	1452.03

Gestação	1102.86	3.2	30650.82
Lactação	909.54	2.57	25259.19
Creche	3070.37	0.08	82921.83
Terminação	30096.21	0.9	812843.37

Fonte: Resultados do protótipo.

Essa Tabela 2 foi construída a partir dos dados extraídos diretamente da interface do protótipo em R Shiny, agrupando as categorias de suínos por fase produtiva. Para cada fase (pré-cobertura, gestação, lactação, creche e terminação), foram calculadas as médias das emissões de metano (CH_4) e óxido nitroso (N_2O) por animal ao ano, com base nas colunas CH_4_excretado e N_2O_excretado do sistema.

A estimativa do total de GEE por fase foi feita por meio da conversão dos valores em equivalentes de dióxido de carbono (CO_2e), aplicando-se os Potenciais de Aquecimento Global (GWP) estabelecidos pelo IPCC (2019): 27 para CH_4 e 273 para N_2O. A fórmula utilizada foi: GEE total (kg CO_2e/animal/ano) = ($CH_4 \times 27$) + ($N_2O \times 273$).

A interface do aplicativo foi organizada em abas que representam as fases produtivas (reprodução, crescimento e terminação), cada uma com campos específicos de entrada e visualização dos resultados. Ao final da inserção dos dados, o sistema retorna gráficos e tabelas com as emissões totais por categoria e por tipo de gás (CH_4 e N_2O), além da possibilidade de exportar os relatórios em PDF.

O diferencial da ferramenta está na sua capacidade de adaptação ao contexto produtivo de cada propriedade, permitindo simulações comparativas entre diferentes sistemas de manejo e estratégias de alimentação. Dessa forma, o aplicativo se apresenta como um instrumento útil de apoio à decisão, tanto para suinocultores quanto para consultores técnicos e formuladores de políticas públicas.

A análise dos dados revelou que o consumo de ração representa a principal fonte de emissões na cadeia produtiva suinícola, seguido pelo manejo de dejetos. Na fase de terminação, os animais consomem entre 240 a 260 kg de ração, o que gera elevado volume de sólidos voláteis e excreção de nitrogênio. Esses resíduos, quando mal manejados, tornam-se fontes relevantes de metano (CH_4) e óxido nitroso (N_2O), conforme previsto nas equações baseadas nos protocolos da FAO e do IPCC. A modelagem indicou ainda que o uso de biodigestores pode reduzir até 70% das emissões de metano associadas aos dejetos, além de proporcionar benefícios econômicos com a geração de biogás.

Outro destaque foi a importância da digestibilidade da ração e da eficiência alimentar para mitigar impactos ambientais. Animais com melhor aproveitamento de nutrientes excretam menos nitrogênio e fósforo, o que reduz o potencial de emissão de GEE e a carga poluente nos solos e cursos d'água. A melhoria desses parâmetros pode ser alcançada com ajustes na formulação das dietas, uso de aditivos e manejo nutricional adequado.

A aplicação do modelo em um rebanho de 1.000 matrizes permitiu validar o funcionamento do aplicativo desenvolvido. A interface permite inserir parâmetros de consumo, manejo e produtividade, retornando gráficos e

relatórios com os resultados por categoria, fase ou tipo de manejo. Essa funcionalidade torna o protótipo uma ferramenta útil para técnicos, produtores e formuladores de políticas públicas, promovendo decisões baseadas em dados concretos.

4 CONCLUSÃO

A presente pesquisa contribuiu significativamente para o desenvolvimento de ferramentas que auxiliam no monitoramento e na mitigação das emissões de gases de efeito estufa na suinocultura brasileira. Através da aplicação da Avaliação do Ciclo de Vida (ACV), foi possível identificar os pontos críticos de emissão e propor estratégias para a redução dos impactos ambientais do setor. O protótipo de aplicativo desenvolvido neste estudo representa uma inovação tecnológica acessível, com potencial de transformação para o setor produtivo. Ele oferece aos produtores uma solução prática para mensurar suas emissões, facilitando a adoção de boas práticas ambientais, o cumprimento de exigências legais e o acesso a mercados mais exigentes do ponto de vista da sustentabilidade.

Conclui-se que a aplicação de metodologias internacionalmente reconhecidas, quando adaptadas às condições locais, pode gerar soluções eficazes e viáveis. O fortalecimento da suinocultura como atividade de baixo carbono depende da integração entre ciência, tecnologia, políticas públicas e o engajamento dos produtores. Este estudo, portanto, oferece um caminho promissor para o aprimoramento ambiental do agronegócio brasileiro. Este estudo demonstrou que é possível desenvolver uma ferramenta prática, baseada em Avaliação do Ciclo de Vida, para estimar as emissões de GEE na suinocultura brasileira. O aplicativo proposto contribui para a gestão ambiental das granjas e para o cumprimento de metas de sustentabilidade, como aquelas previstas pelo Acordo de Paris.

A adoção de práticas sustentáveis, aliada ao uso de tecnologias digitais, pode transformar a suinocultura em uma atividade mais eficiente e de menor impacto ambiental. O modelo desenvolvido é adaptável a outras realidades produtivas e pode ser ampliado para outras cadeias do agronegócio.

Agradecimentos

Os autores agradecem à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo apoio financeiro por meio da concessão de bolsas de estudo, que contribuíram para o desenvolvimento desta pesquisa. Esta publicação contou com o apoio da CAPES – Código de Financiamento 001

Conflitos de interesses

Os autores declaram que não há conflitos de interesse. Todos os autores estão cientes da submissão do artigo.

Contribuições dos autores

Cármem Lúcia Marques Martins: concepção, desenvolvimento metodológico, redação do artigo e desenvolvimento do aplicativo.

Clandio Favarini Ruviaro: revisão da redação, apoio metodológico.

Maurício Hiroyuki Kubo: revisão da redação, apoio metodológico, análise de dados.

Lethicia Camila Dorce: apoio metodológico, levantamento bibliográfico.

REFERÊNCIAS

Associação Brasileira de Proteína Animal. (2024). Relatório anual 2023. https://abpa-br.org/
Agroceres PIC. (2018). Manual de produção de suínos. Campinas, SP: Agroceres PIC.

Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. (2021). Emissões de gases de efeito estufa na suinocultura brasileira. Brasília, DF: Embrapa Suínos e Aves.

Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2018). Environmental performance of animal feed supply chains: Guidelines for assessment. Livestock Environmental Assessment and Performance Partnership (LEAP). Rome: FAO.

Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2023). FAOSTAT: Livestock Primary. https://www.fao.org/faostat/en/#data/QL

Gerber, P. J., Steinfeld, H., Henderson, B., Mottet, A., Opio, C., Dijkman, J., Falcucci, A., & Tempio, G. (2013). Tackling climate change through livestock: A global assessment of emissions and mitigation opportunities. Rome: FAO. https://www.fao.org/3/i3437e/i3437e.pdf

Intergovernmental Panel on Climate Change. (2006). 2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories: Volume 4 – Agriculture, Forestry and Other Land Use. Geneva: IPCC. https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/index.html

Intergovernmental Panel on Climate Change. (2019). 2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Geneva: IPCC. https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2019rf/index.html

Main, R. G., Dritz, S. S., Tokach, M. D., & Goodband, R. D. (2017). Nutritional management of sows during lactation. In J. J. Zimmerman, L. A. Karriker, A. Ramirez, K. J. Schwartz, & G. W. Stevenson (Eds.), Diseases of swine (11th ed., pp. 905–918). Ames, IA: Wiley-Blackwell.

Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. (2020). Plano setorial para adaptação à mudança do clima e baixa emissão de carbono na agropecuária – Plano ABC+. https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/sustentabilidade/plano-abc

United Nations Framework Convention on Climate Change. (2015). Paris Agreement. https://unfccc.int/process-and-meetings/the-paris-agreement/the-paris-agreement