

**Tecnologias sustentáveis na bovinocultura de leite visando a neutralidade de carbono:
práticas, instrumentos e incentivos**

***Sustainable technologies in dairy farming: production practices and policy instruments
towards carbon neutrality***

Guilherme Henrique Glänzel

Doutorando no Programa de Pós-graduação em Agronegócios
pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS). Porto Alegre, RS, Brasil.

guilhermeglanzel@gmail.com

Geovana Costa dos Santos

Doutorando no Programa de Pós-graduação em Agronegócios
pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS). Porto Alegre, RS, Brasil.

geovana.costa@acad.ufsm.br

Paula Nicolay

Mestranda no Programa de Pós-graduação em Agronegócios
pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS). Porto Alegre, RS, Brasil.

nicolaypaula@gmail.com

Letícia Fante Lorenzett

Mestranda no Programa de Pós-graduação em Agronegócios
pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS). Porto Alegre, RS, Brasil.

lorenzett.leti@gmail.com

Anna Elisa Petersen Gatelli

Mestranda no Programa de Pós-graduação em Agronegócios
pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS). Porto Alegre, RS, Brasil.

annagatelli@hotmail.com

GT 12 - Impactos socioambientais das novas tecnologias no agronegócio

Resumo: A bovinocultura de leite desempenha papel relevante no setor agropecuário brasileiro, sendo o Rio Grande do Sul o terceiro maior produtor nacional, responsável por cerca de 12% do volume total. Entretanto, o setor lácteo enfrenta desafios crescentes, sobretudo no que se refere à competitividade, às exigências ambientais e à redução das emissões de gases de efeito estufa. A consolidação da sustentabilidade na pecuária leiteira exige a integração de tecnologias e práticas ao longo de toda a cadeia produtiva. Nesse sentido, o presente estudo tem como objetivo analisar as tecnologias e práticas produtivas que possuem potencial para promover a transformação da produção leiteira no Rio Grande do Sul em direção à neutralidade de carbono. Para tanto, adotou-se a pesquisa bibliográfica como metodologia central, complementada pela análise de conteúdo, com base na seleção e exame de artigos relacionados às categorias de análise previamente definidas. Os resultados identificados destacam o uso de tecnologias ligadas à redução de emissões, especialmente na produção de bovinos de leite. Observa-se que existem diversos aspectos que são considerados importantes, entre os quais se destacam os critérios ESG (ambientais, sociais e de governança), os sistemas de Integração Lavoura-Pecuária-Floresta (ILPF), a agricultura regenerativa, o bem-estar animal e a agricultura de precisão. Além disso, analisam-se os instrumentos de política pública de crédito rural que viabilizam a adoção dessas tecnologias, com ênfase no Programa Nacional de Fortalecimento da Agricultura Familiar (PRONAF) e em iniciativas estaduais de subvenção ao investimento na pecuária leiteira. As análises indicam que a bovinocultura

leiteira possui um potencial significativo para a redução dos impactos ambientais, desde que sejam adotadas práticas integradas e eficientes.

Palavras-chave: Cadeia produtiva; Gases de efeito estufa; Sustentabilidade; Crédito rural.

Abstract: Dairy farming plays a significant role in the Brazilian agricultural sector, with Rio Grande do Sul being the third-largest national producer, accounting for approximately 12% of the total volume. However, the dairy sector faces growing challenges, particularly regarding competitiveness, environmental requirements, and the reduction of greenhouse gas emissions. Consolidating sustainability in dairy farming requires the integration of technologies and practices throughout the entire production chain. Therefore, this study aims to analyze the technologies and production practices that have the potential to promote the transformation of dairy production in Rio Grande do Sul toward carbon neutrality. To this end, bibliographic research was adopted as the central methodology, complemented by content analysis, based on the selection and examination of articles related to the previously defined analysis categories. The results highlighted the use of technologies related to emissions reduction, especially in dairy cattle production. Several aspects are considered important, including ESG (environmental, social, and governance) criteria, Integrated Crop-Livestock-Forestry (ICLF) systems, regenerative agriculture, animal welfare, and precision agriculture. Furthermore, the study examines the rural credit policy instruments that enable the adoption of these technologies, with emphasis on the National Program for Strengthening Family Farming (PRONAF) and state-level subsidy initiatives for investment in dairy farming. The analyses indicate that dairy cattle farming has significant potential for reducing environmental impacts, provided integrated and efficient practices are adopted.

Keywords: Production chain, greenhouse gases, decarbonization, sustainability, rural credit.

1. Introdução

A bovinocultura de leite possui grande importância para o setor agropecuário brasileiro, sendo responsável por significativa geração de renda e pelo abastecimento do mercado interno e externo. O Brasil figura como o quarto maior produtor de leite em âmbito mundial (EMBRAPA, 2024). No contexto interno, o estado do Rio Grande do Sul ocupa a terceira posição no ranking nacional, com uma produção média anual estimada em 4,1 bilhões de litros, correspondendo a aproximadamente 12% do total produzido no país (IBGE, 2023).

A cadeia produtiva do leite no Rio Grande do Sul apresenta solidez financeira e econômica, destacando-se pelo contínuo aumento da produtividade, que se aproxima dos índices registrados nos principais países produtores. Em 2021 a produtividade média estadual alcançou 4.129 litros por vaca ao ano (RIO GRANDE DO SUL, 2022), valor aproximadamente 65% superior à média nacional. A produção leiteira ocorre majoritariamente em pequenos e médios estabelecimentos rurais, mobilizando a força de trabalho da agricultura familiar.

Atualmente, o setor lácteo enfrenta desafios cada vez mais complexos, relacionados à competitividade, ao atendimento das demandas ambientais e à urgência de reduzir as emissões de gases de efeito estufa (GEE), em especial o metano entérico e os resíduos oriundos do manejo (BROSE; NAVARRO, 2025). Deste modo, o setor agropecuário se encontra em um momento de dualidade: de um lado, os agricultores têm a missão de alimentar o mundo; de outro, enfrentam desafios relacionados aos impactos ambientais de sua produção. Frente a

isso, pesquisas recentes sobre práticas mais sustentáveis apontam para a possibilidade de produzir leite reduzindo significativamente a emissão de metano (CH₄), um dos principais gases responsáveis pelo efeito estufa.

A consolidação da sustentabilidade na pecuária leiteira requer a integração de inovações técnicas e práticas produtivas ao longo de toda a cadeia produtiva. Nesse contexto, o presente estudo tem como objetivo analisar as tecnologias e práticas produtivas que possuem potencial para promover a transformação da produção leiteira no Rio Grande do Sul em direção à neutralidade de carbono. Adicionalmente, examina-se o papel das políticas públicas de crédito rural como instrumentos de fomento à adoção dessas tecnologias, considerando que a produção leiteira gaúcha é predominantemente familiar e dependente de financiamento subsidiado para a modernização produtiva.

A pesquisa está estruturada em cinco seções: após esta introdução, apresenta-se a revisão teórica que fundamenta o trabalho; em seguida, detalham-se os procedimentos metodológicos adotados; a seção subsequente apresenta a análise dos resultados e a discussão à luz da literatura; e, por fim, são expostas as considerações finais do estudo.

2. Revisão da Literatura

2.1 Sustentabilidade e redução de emissões na bovinocultura leiteira

O crescimento da pecuária leiteira decorre da intensificação e especialização dos sistemas produtivos, impulsionadas por fatores como expansão econômica, urbanização e aumento populacional, o que elevou a produção e a produtividade para atender à demanda crescente (SILVA, 2020). Desse modo, a sustentabilidade produtiva e ambiental é fundamental não apenas para a continuidade da pecuária, mas também para atender às exigências dos mercados, principalmente as internacionais.

Segundo o Banco Mundial (2022), o Brasil ocupou a 12^a posição entre os maiores emissores de gases de efeito estufa em 2019, totalizando cerca de 434,3 milhões de toneladas de carbono equivalente (MtCO₂e). Conforme o Sistema de Estimativas de Emissões e Remoções de Gases de Efeito Estufa (SEEG, 2022) em 2020, as mudanças no uso da terra e a agropecuária responderam por cerca de 70% das emissões totais do Brasil. As mudanças no uso da terra respondem por 46% das emissões de GEE no Brasil, seguidas pela agropecuária, com 27%.

De acordo com a Organização das Nações Unidas para Agricultura e Alimentação (FAO, 2025) às emissões de fermentação entérica de gado para carne e laticínios são responsáveis por 44% das emissões de GEE de fontes agrícolas. O setor agropecuário enfrenta o desafio de conciliar a produção de alimentos com a redução de impactos ambientais, principalmente, os relacionados às emissões de metano, como é o caso da produção de bovinos de leite (MARTINS-COSTA, 2015). Conforme o IPCC (2019) esse gás, produzido principalmente pela fermentação ruminal dos alimentos, tem potencial de aquecimento global 21 vezes superior ao do carbono.

A pecuária bovina, tanto de corte como de leite, contribui para as emissões de GEE principalmente pela fermentação entérica, além das emissões do solo e das pastagens degradadas (MARGULIS, 2018). Além disso, os sistemas intensivos de gado leiteiro geram grande concentração de resíduos (urina, fezes, restos de alimentos, resíduos de cama e de higienização do ambiente) que podem superar 88,4 kg por animal/dia (OSHIRO et al., 2016). Estes demandam novas estratégias de aproveitamento para reduzir as emissões de GEE.

Com a preocupação de uma produção mais consciente ao longo dos anos veio também a revolução agrícola trazendo uma oportunidade de coletar grandes volumes de informações da fazenda com a ajuda de tecnologias como: robótica, sensores, internet, etc. (NEETHIRAJAN e KEMP, 2021). As novas formas de produção dentro da pecuária proporcionaram meios de mensurar e quantificar a produção de metano no animal. Além de ser benéfico para o meio ambiente, a preocupação de melhores aditivos alimentares gera uma melhora no estado de saúde do rebanho.

Para Lackner (2022) a diminuição de produção de GEE pode caminhar paralelamente com qualidade de vida dos animais, mostrando assim que redução de gases e bem-estar caminham na mesma direção. Ademais, o uso de novas tecnologias em todos os elos do setor agropecuário pode alavancar a redução de emissões de GEE em toda a cadeia produtiva do leite.

2.2 Tecnologias digitais / Pecuária de Precisão (PLF)

Ao longo dos anos, observa-se que a tecnologia tem assumido um papel cada vez mais relevante nos estabelecimentos rurais, onde por meio de sua utilização os produtores conseguem obter insights reais sobre seus rebanhos, possibilitando a formulação de estratégias alinhadas à realidade de cada sistema produtivo. Conforme destacam Marku, Jahja e Maurmann (2024) o desenvolvimento e a adoção dessas tecnologias contribuem para

melhorias no bem-estar animal, na eficiência e na sustentabilidade da produção, embora ainda apresentem desafios significativos para o setor pecuário.

Nesse sentido, Tommasino e Hegedüs (2006) ressaltam que a adoção de tecnologias não ocorre de forma isolada, mas está inserida em sistemas agrários complexos, onde aspectos econômicos, sociais, culturais e institucionais interagem. Conforme Ruzzante, Lagarta e Bilton (2021) as percepções da adoção ou não de alguma tecnologia possuem diversas variáveis para serem adotadas e consideradas. Embora os benefícios percebidos sejam expressivos, ainda persistem lacunas que dificultam a efetiva incorporação dessas inovações no cotidiano dos produtores, sobretudo quando consideradas suas necessidades específicas e condições socioeconômicas.

Tecnologias como monitoramento de saúde do rebanho, detecção de cio, análise nutricional e comportamento levando em consideração a rotina do animal, são algumas das funções das tecnologias disponíveis no mercado. Essas soluções apresentam-se em diferentes formatos e dispositivos, como sensores, colares, brincos eletrônicos, pedômetros, drones e câmeras de infravermelho, que permitem desde a coleta de dados fisiológicos até o mapeamento de áreas de pastagem e a observação remota dos animais. No entanto, o grande desafio para os produtores consiste em identificar, entre tantas inovações, aquelas que melhor se ajustam à sua realidade produtiva e socioeconômica, garantindo que a adoção tecnológica traga benefícios concretos e sustentáveis para o sistema de produção.

Segundo Addorisio, Spadoni e Maesano (2025) a distribuição geográfica mostra que a maioria dos estabelecimentos rurais que utilizam algum tipo de tecnologia, voltada à criação animal ou à produção vegetal, concentra-se principalmente na Europa, em especial Itália e Alemanha. Entre essas inovações, a técnica de modelagem de dispersão inversa (IDM) tem se mostrado relevante por permitir o cálculo das emissões de metano a partir da concentração do gás gerado pelos animais dentro do rebanho. De acordo com Mei Bai et al. (2021) a IDM constitui uma ferramenta precisa e acessível para mensurar as emissões de gases provenientes da bovinocultura, garantindo maior segurança e simplicidade no processo de avaliação.

Já a micrometeorologia é um meio de medição que possibilita visualizar a redução ou não de emissão de metano em bovinos confinados considerando a avaliação alimentar implementada nestes animais. De acordo com McGinn (2019) estudos que analisaram a suplementação de gado de corte confinado com 3-nitrooxipropanol demonstraram uma redução aproximada de 18% nas emissões de metano do rebanho. Nesse contexto, é fundamental que as tecnologias adotadas pelo setor pecuário produzam resultados efetivos,

permitindo não apenas a produção de alimentos para atender à demanda populacional, mas também possibilitando que os produtores alinhem suas práticas à sustentabilidade.

2.3 Pegada de carbono e Avaliação do Ciclo de Vida do leite do Brasil e comparáveis

A avaliação da pegada de carbono na produção leiteira tem recebido crescente atenção devido às pressões sociais e de mercado por práticas mais sustentáveis. Entre os principais impactos ambientais frequentemente associados à cadeia produtiva do leite destacam-se as emissões de gases de efeito estufa, o manejo inadequado de dejetos e o desmatamento. Nos últimos anos, alguns produtores e empresas têm adotado uma postura cada vez mais proativa, buscando atender à demanda dos consumidores por alimentos produzidos de acordo com critérios ambientais rigorosos e responsáveis.

Segundo a Embrapa (2025) a classificação das fazendas leiteiras em diferentes níveis de pegada de carbono está relacionada ao esforço necessário para reduzir as emissões, considerando a implementação de práticas e tecnologias mitigadoras. Entre os fatores críticos que influenciam essa avaliação, destacam-se a produção de grãos, o uso de fertilizantes e o manejo das pastagens, que podem ser planejados e otimizados para minimizar a emissão de carbono ao longo de todo o ciclo produtivo. Além disso, a integração de estratégias como a rotação de culturas, a fertirrigação eficiente e a utilização de resíduos orgânicos como fertilizantes naturais contribui para a redução da pegada de carbono, promovendo um sistema produtivo mais sustentável.

Nesse contexto, Carvalho et al. (2021) ressaltam que as emissões associadas à produção de leite são convertidas em carbono-equivalente por meio de fatores de aquecimento global (GWP). A metodologia de Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) tem se consolidado como uma ferramenta essencial para quantificar os impactos em diferentes etapas do sistema produtivo, possibilitando a identificação de pontos críticos e de oportunidades de mitigação. Estudos internacionais sobre ACV reforçam a centralidade do carbono nas análises, mas também evidenciam a necessidade de ampliar a avaliação para outras categorias de impacto, com o objetivo de obter uma compreensão mais abrangente da sustentabilidade da atividade leiteira (YAN et al., 2013).

A aplicação da ACV no setor leiteiro permite orientar estratégias de mitigação que abrangem desde ajustes diários no manejo até alterações mais amplas na gestão dos estabelecimentos. Quando analisadas sob a perspectiva do ciclo de vida, mesmo pequenas

ações implementadas pelos produtores podem gerar impactos ambientais significativos, promovendo benefícios ao longo de toda a cadeia produtiva.

2.4 Estratégias integradas de descarbonização na cadeia leiteira

A redução das emissões de gases de efeito estufa é uma preocupação global, e o setor agrário, um dos maiores emissores, têm buscado adotar práticas mais responsáveis. Na atividade leiteira, essa pressão é ainda maior, devido à emissão direta de metano pelos animais e às emissões indiretas relacionadas ao transporte, insumos e processamento, exigindo estratégias integradas de mitigação em toda a cadeia produtiva. Conforme evidenciam pesquisas realizadas por diversos autores ao longo do tempo, não há uma “receita de bolo”; cada sistema produtivo apresenta particularidades que requerem soluções específicas.

O processo de descarbonização na cadeia produtiva do leite resulta da combinação de diversas ações, que, em conjunto, promovem ganhos em eficiência e competitividade. Segundo o ICUSD (2024) existe uma iniciativa para alcançar emissões líquidas zero na produção de laticínios nos Estados Unidos, com metas ambientais ambiciosas, incluindo a neutralidade de gases de efeito estufa até 2050. Tais esforços evidenciam o crescente comprometimento de diferentes países em produzir de maneira mais eficiente, sustentável e com qualidade.

Embora haja avanços promissores na redução das emissões de gases de efeito estufa, ainda é necessário desenvolver estratégias mais assertivas e avaliadas de forma qualitativa. Para alcançar resultados significativos, é fundamental que todos os elos da cadeia produtiva estejam alinhados; pequenas ações cotidianas realizadas dentro dos estabelecimentos podem gerar impactos positivos. Alguns estudos mostram que a utilização de aditivos como (óleos essenciais, algas vermelhas, taninos) podem reduzir o metano entérico.

Essas ações devem ser acompanhadas de um balanceamento nutricional que maximize a eficiência digestiva dos animais. Estratégias como o melhoramento genético também se configuram como aliadas importantes na descarbonização, uma vez que a seleção de vacas com maior produtividade contribui para reduzir as emissões de gases de efeito estufa por litro de leite produzido. A implementação de biodigestores para a geração de biogás e biofertilizantes representa uma alternativa sustentável, capaz de reduzir impactos ambientais enquanto produz energia, podendo ser complementada pela cobertura de esterqueiras, que contribui para a minimização das emissões fugitivas de metano.

Estratégias integradas de descarbonização na cadeia leiteira combinam genética, nutrição, manejo de dejetos, sistemas integrados de lavoura-pecuária-floresta, energias renováveis, logística sustentável e certificações ambientais, formando uma abordagem sistêmica capaz de reduzir emissões e promover uma produção mais competitiva e sustentável.

2.5 Métodos, fatores de emissão e políticas no Brasil

A combinação entre métodos de mensurar a emissão com políticas no país ajuda no avanço do tema discutido ao longo deste estudo. Existe uma variedade de métodos de mensuração, cada técnica com uma finalidade e com um meio de analisar a emissão dos gases. Na tabela abaixo, pode-se compreender melhor os métodos mais comuns e suas funções.

Tabela 1: Comparativo de métodos de avaliação de emissões na produção de leite.

Tipo	Descrição	Referência	Vantagens	Limitações
Técnica do gás traçador SF	Método direto para mensurar emissões entéricas de CH ₄ em bovinos por meio de gás marcador.	PEDREIRA, C. G. S. et al. Ruminant methane emission by dairy cattle in Southeast Brazil. <i>Scientia Agricola</i> , Piracicaba, v. 66, n. 6, p. 771-780, 2009.	Alta precisão na medição individual; útil em experimentos científicos.	Custo elevado; uso restrito a poucos animais; difícil aplicação em larga escala.
Tier 1 do IPCC	Metodologia do IPCC que utiliza fatores de emissão genéricos para estimar emissões de metano.	MARTINS-COSTA, L. P. Emissão de metano entérico em bovinos no Rio Grande do Sul: aplicação da metodologia Tier 1 do IPCC. <i>Arq. Bras. Med. Vet. Zootecnia</i> , v. 67, n. 6, p. 1583-1592, 2015.	Aplicação simples permite estimativas regionais e nacionais; baixo custo.	Baixa especificidade; não capta variações de dieta, manejo ou genética locais.
Life Cycle Assessment (LCA)	Avaliação do ciclo de vida do leite (cradle-to-gate), quantificando os impactos ambientais da produção à indústria.	LIMA, R. P. et al. Life Cycle Assessment of dairy production in Minas Gerais. <i>Journal of Cleaner Production</i> , v. 351, p. 131573, 2022.	Visão sistêmica dos impactos; considera toda a cadeia produtiva.	Exige grande volume de dados; alto custo computacional e metodológico.

Fonte: Elaborado pelos autores.

2.6 Contexto Gaúcho / brasileiro (diagnóstico e caminhos práticos)

O Rio Grande do Sul é um dos principais estados produtores de leite do Brasil, concentrando grande número de estabelecimentos rurais familiares e sistemas semi-intensivos, responsáveis por parcela significativa do volume nacional (EMBRAPA, 2024). Essa heterogeneidade de sistemas implica diferentes níveis de produtividade e de pegada de carbono, o que exige estratégias de mitigação adaptadas à realidade regional.

Entre os caminhos práticos para reduzir os impactos ambientais da cadeia leiteira, destacam-se a melhoria do manejo de pastagens, o uso eficiente de insumos, a adoção de aditivos nutricionais como o 3-NOP e sistemas integrados de produção (ILPF), além da utilização da Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) como ferramenta para identificar pontos críticos de emissão (CARVALHO et al., 2021; LACKNER, 2022). Essas ações, quando aplicadas em escala regional, podem reduzir significativamente a intensidade de emissões por litro de leite, fortalecendo a competitividade do setor frente às novas demandas de mercado.

2.7 Políticas públicas de crédito rural e incentivos à adoção de tecnologias sustentáveis

A adoção das tecnologias e práticas discutidas nas seções anteriores depende, em grande medida, da disponibilidade de instrumentos financeiros acessíveis ao produtor. No Brasil, o crédito rural constitui o principal mecanismo de política pública agrícola para viabilizar investimentos no campo, atuando como indutor da modernização tecnológica e, mais recentemente, da transição para sistemas de produção de baixa emissão de carbono (BRASIL, 1965; BRASIL, 2006).

O Sistema Nacional de Crédito Rural (SNCR), instituído pela Lei nº 4.829/1965 e regulamentado pelo Conselho Monetário Nacional (CMN), estabeleceu as bases do financiamento agrícola no país, com o objetivo de fornecer recursos a produtores rurais e cooperativas para atividades alinhadas ao desenvolvimento nacional (BRASIL, 1965). Contudo, a estrutura original do SNCR favorecia grandes estabelecimentos rurais e a produção de commodities, criando assimetrias de acesso que excluía a massa de pequenos produtores do sistema financeiro formal (GUANZIROLI, 2007).

A diferenciação institucional da agricultura familiar como segmento com necessidades específicas de crédito ocorreu somente na década de 1990, com a criação do Programa Nacional de Fortalecimento da Agricultura Familiar (PRONAF), instituído pela Resolução CMN nº 2.191/1995 e regulamentado pelo Decreto nº 1.946/1996 (BRASIL, 1995; BRASIL, 1996). A consolidação jurídica dessa categoria se deu com a Lei nº 11.326/2006, que definiu os critérios de enquadramento do agricultor familiar, com o limite de quatro módulos fiscais,

predominância de mão de obra familiar, renda originada no estabelecimento e gestão autônoma da família (BRASIL, 2006). Essa legislação conferiu segurança jurídica ao PRONAF e legitimou uma parcela expressiva dos produtores de leite no Rio Grande do Sul, cuja produção ocorreu majoritariamente em pequenos e médios estabelecimentos familiares, conforme apontado na seção anterior.

No âmbito do Plano Safra, diversas linhas de crédito de investimento são direcionadas à modernização tecnológica da pecuária leiteira. O Programa de Incentivo à Inovação Tecnológica na Produção Agropecuária (Inovagro), coordenado pelo Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social (BNDES), financia a incorporação de automação, ordenha robotizada, softwares de gestão, conectividade e energia renovável, com limites de até R\$ 1,3 milhão por produtor (BNDES, 2025).

Para o agricultor familiar, o Pronaf Mais Alimentos permite a aquisição de tanques de resfriamento, ordenhadeiras mecânicas e a recuperação de pastagens, com taxas de juros entre 5% e 6% ao ano (BANRISUL, 2025). A substituição da ordenha manual pela mecânica, viabilizada por essas taxas subsidiadas, é apontada como fator determinante para a redução da penosidade do trabalho e para a sucessão familiar na atividade leiteira (RIO GRANDE DO SUL, 2025).

No eixo da sustentabilidade, o Programa de Financiamento a Sistemas de Produção Agropecuária Sustentáveis (RenovAgro), sucessor do Programa ABC, é a principal linha de fomento à pecuária de baixo carbono. O programa financia a recuperação de pastagens degradadas, a implantação de sistemas ILPF e o melhoramento genético sustentável, com taxas a partir de 7% ao ano para recuperação de solos (BNDES, 2025b).

A Resolução CMN nº 5.288 ampliou o acesso a recursos para aquisição de sêmen, óvulos e embriões dentro do RenovAgro, reconhecendo que vacas de alta genética possuem maior eficiência de conversão alimentar e menor pegada de carbono por litro de leite produzido (BRASIL, 2025). Complementarmente, o Pronaf Bioeconomia financia tecnologias de energia renovável e tratamento de dejetos para a agricultura familiar, com taxas a partir de 3% ao ano e limite de R\$250 mil por ano agrícola (BNDES, 2025). Produtores com o Cadastro Ambiental Rural (CAR) em conformidade podem obter redução adicional de até 1 ponto percentual na taxa de juros de custeio, criando um nexos financeiro direto entre preservação ambiental e custo operacional da atividade (BRASIL, 2023).

No âmbito estadual, o Rio Grande do Sul implementou o programa Bônus Mais Leite, financiado pelo Fundo do Plano Rio Grande (FUNRIGS), que oferece subvenções de até 25%

sobre o valor contratado em operações de investimento do Pronaf para produtores de leite enquadrados, com teto de R\$25.000,00 por unidade familiar (RIO GRANDE DO SUL, 2025).

O programa alcançou R\$133,1 milhões em contratos até o início de 2026, demonstrando a demanda dos agricultores familiares por recursos que permitam a qualificação técnica da produção (RIO GRANDE DO SUL, 2026). A subvenção atua como redutor de risco, facilitando a amortização de investimentos em tecnologias sustentáveis que possuem prazos de retorno mais longos, como a implantação de pastagens perenes e sistemas de gestão de rebanho.

Adicionalmente, a Operação Terra Forte, com investimento inicial de R\$300 milhões provenientes do Fundo de Reconstrução do Rio Grande do Sul, disponibiliza até R\$30 mil por produtor para planos que incluem práticas de Agricultura de Baixa Emissão de Carbono, como descompactação do solo, aumento da matéria orgânica e uso de energias renováveis (RIO GRANDE DO SUL, 2025). Essas iniciativas estaduais potencializam as linhas federais e evidenciam a complementaridade entre esferas de governo no fomento à descarbonização da cadeia leiteira.

3. Metodologia

Com a finalidade de atender ao propósito do estudo, adotou-se a pesquisa bibliográfica como metodologia central. De acordo com Gil (2008) a pesquisa bibliográfica fundamenta-se em materiais já elaborados, principalmente livros e artigos científicos, permitindo uma compreensão crítica das contribuições existentes sobre o tema em estudo. Complementarmente, recorreu-se à análise de conteúdo, que consiste na seleção e no exame de artigos alinhados às categorias de análise previamente definidas, de modo a auxiliar na resolução do problema de pesquisa.

Para garantir a relevância, atualidade e confiabilidade das informações, foram priorizadas publicações entre 2020 e 2025 que abordassem inovação tecnológica e sustentabilidade no setor leiteiro; as bases de dados, abrangendo Google Scholar, SciELO, CAPES Periódicos e Science Direct; e as palavras-chave utilizadas, como “produção leiteira”, “tecnologias digitais”, “sustentabilidade” e “neutralidade de carbono”. Complementarmente, foram consultadas fontes normativas e institucionais relativas ao crédito rural brasileiro, incluindo legislação federal, resoluções do Conselho Monetário Nacional (CMN) e documentos de programas de fomento do Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social (BNDES) e de órgãos estaduais, a fim de fundamentar a análise dos instrumentos de

política pública direcionados à pecuária leiteira sustentável. Foram incluídos estudos sobre a produção de leite no Rio Grande do Sul ou sobre o setor leiteiro em âmbito global, com foco em tecnologias digitais, práticas sustentáveis e estratégias de redução de emissões de carbono, enquanto materiais sem fundamentação científica, duplicados, opinativos ou sem relação direta com os eixos da pesquisa foram excluídos.

Após a seleção, os estudos foram organizados e analisados criticamente em três eixos principais: (i) produção leiteira no Rio Grande do Sul; (ii) tecnologias aplicadas ao setor; e (iii) práticas sustentáveis voltadas à neutralidade de carbono. Esse processo resultou em uma revisão integrativa, possibilitando identificar lacunas, desafios e oportunidades para a transformação da cadeia leiteira gaúcha em direção a um modelo mais sustentável.

4. Resultados

Ao analisar as emissões de GEE no setor agropecuário e o uso de tecnologias ligadas à redução de emissões destes, especialmente na produção de bovinos de leite, observa-se que diversos aspectos se mostram relevantes. Entre eles, destacam-se os critérios ESG (ambientais, sociais e de governança), os sistemas de Integração Lavoura-Pecuária-Floresta (ILPF), a agricultura regenerativa, o bem-estar animal e a agricultura de precisão, entre outros temas que vêm sendo discutidos com o objetivo de promover uma produção mais sustentável. De acordo com Oliveira et al. (2017) as emissões de gases de efeito estufa provenientes da atividade pecuária podem ser mitigadas, ou até mesmo neutralizadas, por meio da adoção destes sistemas integrados.

De acordo com Da Cruz e De Miranda (2022) os sistemas integrados, como a lavoura-pecuária-floresta (ILPF), configuram-se como alternativas eficazes para a mitigação das emissões de gases de efeito estufa, ao mesmo tempo em que promovem o aumento da produtividade da pecuária. Além disso, os autores ressaltam que esse modelo pode ser aplicado de forma complementar para o cultivo de lavouras, como soja e milho, que também podem compor a ração dos animais, e para o plantio de florestas comerciais, como o eucalipto.

Ademais, o melhoramento genético aliado a novas práticas de manejo de animais e pastagens, pode contribuir para a redução dos impactos ambientais da atividade leiteira. De maneira geral, o manejo de pastagens que respeita o ponto de pastejo adequado para cada espécie de gramínea favorece a eficiência na utilização da forragem, melhora seu valor nutritivo e prolonga sua longevidade produtiva (ANJOS et al., 2016). Além disso, uma

alimentação adequada e balanceada dos animais contribui para a redução de emissões de metano, geradas no processo digestivo.

Knapp et al. (2014) conduziram uma metanálise sobre as emissões de metano entérico em vacas leiteiras, demonstrando que a combinação de melhoramento genético com estratégias de manejo do rebanho pode resultar em reduções de 15 a 30% na emissão de metano por quilograma de leite produzido. Entre as principais práticas apontadas pelos autores, destacam-se a diminuição do estresse térmico, o controle e a prevenção de doenças, a oferta de instalações adequadas e a ampliação da vida produtiva dos animais.

Conforme Arndt et al. (2022) diversos Aditivos Alimentares Mitigadores de Metano (AMFAs) têm sido avaliados quanto à sua eficácia na redução das emissões de metano. Nesse contexto, a produção pecuária sustentável torna-se cada vez mais viável, sendo a inclusão de algas marinhas na dieta animal apontada como uma alternativa promissora para diminuir essas emissões, conforme evidenciado por Lean et al. (2021).

Sobre as práticas ESG, a Global Sustainable Investment Alliance (GSIA) define-a em três fatores (ambiental, social e governança) (GSIA, 2020). Na pecuária leiteira, os fatores ambientais referem-se à gestão de recursos naturais, como água, solo e emissões de gases de efeito estufa; os fatores sociais envolvem a relação dos estabelecimentos com colaboradores, fornecedores, clientes e comunidades locais; e os fatores de governança avaliam a administração do estabelecimento ou empresa, incluindo compliance, remuneração de gestores e direitos de investidores ou sócios. Assim, esses fatores formam um conjunto de critérios para analisar, avaliar e orientar práticas sustentáveis no setor leiteiro.

Segundo a Embrapa (2025) os estabelecimentos leiteiros com pegada de carbono inferior a 0,7 kg de dióxido de carbono equivalente por quilograma de leite corrigido para gordura e proteína (FPCM) estão associadas a sistemas de produção de alta eficiência e elevado nível tecnológico. Entre as práticas adotadas, destacam-se a geração e o aproveitamento de energias renováveis, o uso racional da água, a fertirrigação e a produção de biogás. Paralelamente, vêm sendo implementadas estratégias de aumento da produtividade, como a otimização do uso da terra para obter maior produção de leite em áreas reduzidas.

Cabe destacar que a viabilização econômica dessas práticas e tecnologias está diretamente associada à disponibilidade de instrumentos de crédito adequados ao perfil do produtor. Conforme discutido na seção 2.7, programas como o PRONAF, o Inovagro e o RenovAgro oferecem condições financeiras diferenciadas que reduzem as barreiras de acesso à modernização tecnológica, enquanto iniciativas estaduais como o Bônus Mais Leite atuam

como redutores de risco ao subsidiar parcela do investimento. A articulação entre política creditícia e adoção tecnológica configura-se, assim, como condição estruturante para a transição da pecuária leiteira em direção à neutralidade de carbono.

5. Considerações finais

As análises realizadas indicam que a bovinocultura leiteira possui potencial significativo para a redução de impactos ambientais quando adotadas práticas integradas e eficientes. Estratégias como o manejo adequado da alimentação, a gestão eficiente de dejetos e adubos, a intensificação sustentável das pastagens e a integração de sistemas produtivos revelam-se fundamentais para aumentar a produtividade ao mesmo tempo em que se minimizem emissões de gases de efeito estufa. Além disso, o emprego de animais com maior mérito genético contribui para sistemas mais eficientes, promovendo maior produção de leite por unidade de alimento consumido.

Apesar dos avanços, é evidente que a implementação das tecnologias que auxiliem na mitigação deve ser contínua e adaptada às condições específicas de cada estabelecimento rural, considerando fatores como clima, tipo de solo, manejo e características genéticas do rebanho. Ademais, a comparação de resultados entre estudos exige cautela, dada a complexidade e a variabilidade dos sistemas produtivos. Nesse sentido, o acesso a instrumentos de crédito rural adequados, como as linhas do PRONAF e do RenovAgro, bem como iniciativas estaduais de subvenção ao investimento, constitui condição estruturante para que produtores familiares possam incorporar as tecnologias mitigadoras identificadas neste estudo. Dessa forma, a sustentabilidade da bovinocultura leiteira depende de abordagens integradas e contextualmente ajustadas, capazes de conciliar produtividade, eficiência e preservação ambiental, atendendo à crescente demanda por alimentos de forma responsável e sustentável.

Por fim, este estudo deve ser continuado com investigações que explorem outras tecnologias de mitigação e avaliem a eficiência de diferentes estratégias de manejo e alimentação nos sistemas produtivos e em diferentes regiões. Por meio destes estudos será possível gerar um conhecimento robusto que oriente práticas capazes de apoiar produtores, políticas públicas e iniciativas voltadas à descarbonização da produção leiteira. Investigações futuras devem também avaliar as barreiras institucionais e burocráticas que limitam o acesso dos produtores familiares às linhas de crédito sustentável, como a irregularidade fundiária, as

pendências no Cadastro Ambiental Rural e o endividamento setorial, a despeito da disponibilidade formal desses instrumentos.

Referências

ADDORISIO, R.; SPADONI, R.; MAESANO, G. Adoção de tecnologias inovadoras para a agricultura sustentável: uma revisão de escopo do domínio do sistema. *Sustentabilidade*, v. 17, n. 9, p. 4224, 2025.

ANJOS, A. J. dos et al. Forage mass and morphological composition of Marandu palisade grass pasture under rest periods. *Ciência e Agrotecnologia*, v. 40, n. 1, p. 76-86, fev. 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/s1413-70542016000100007>. Acesso em: 12 set. 2025.

ARNDT, C. et al. Full adoption of the most effective strategies to mitigate methane emissions by ruminants can help meet the 1.5°C target by 2030 but not 2050. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, v. 119, n. 20, p. e2111294119, 2022.

BAI, M. et al. Emissões de metano em bovinos de corte medidas com técnicas de modelagem de razão traçadora e dispersão inversa. *Atmospheric Measurement Techniques*, v. 14, n. 5, p. 3469–3479, 2021.

BANCO MUNDIAL. CO2 emissions (kt). Disponível em: https://data.worldbank.org/indicator/EN.ATM.CO2E.KT?name_desc=false&view=map. Acesso em: 14 set. 2025.

BANRISUL. *Plano Safra 2025/26*. Porto Alegre: Banrisul, 2025. Disponível em: <https://www.banrisul.com.br/planosafra>. Acesso em: 29 mar. 2026.

BNDES. *Inovagro - Programa de Incentivo à Modernização e à Inovação Tecnológica na Produção Agropecuária*. Rio de Janeiro: BNDES, 2025. Disponível em: <https://www.bndes.gov.br/wps/portal/site/home/financiamento/produto/inovagro>. Acesso em: 29 mar. 2026.

BNDES. *Renovagro - Programa de Financiamento a Sistemas de Produção Agropecuária Sustentáveis*. Rio de Janeiro: BNDES, 2025. Disponível em: <https://www.bndes.gov.br/wps/portal/site/home/financiamento/produto/renovagro>. Acesso em: 29 mar. 2026.

BNDES. *Pronaf Bioeconomia*. Rio de Janeiro: BNDES, 2025. Disponível em: <https://www.bndes.gov.br/wps/portal/site/home/financiamento/produto/pronaf-bioeconomia>. Acesso em: 29 mar. 2026.

BRASIL. *Lei nº 4.829, de 5 de novembro de 1965*. Institucionaliza o crédito rural. Brasília, DF: Diário Oficial da União, 1965. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/l4829.htm. Acesso em: 29 mar. 2026.

BRASIL. *Resolução CMN nº 2.191, de 24 de agosto de 1995*. Cria o Programa Nacional de Fortalecimento da Agricultura Familiar (PRONAF). Brasília, DF: Banco Central do Brasil, 1995. Disponível em:

https://www.bcb.gov.br/pre/normativos/res/1995/pdf/res_2191_v3_l.pdf. Acesso em: 29 mar. 2026.

BRASIL. *Decreto nº 1.946, de 28 de junho de 1996*. Cria o Programa Nacional de Fortalecimento da Agricultura Familiar - PRONAF. Brasília, DF: Diário Oficial da União, 1996. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/decreto/d1946.htm. Acesso em: 29 mar. 2026.

BRASIL. *Lei nº 11.326, de 24 de julho de 2006*. Estabelece as diretrizes para a formulação da Política Nacional da Agricultura Familiar e Empreendimentos Familiares Rurais. Brasília, DF: Diário Oficial da União, 2006. Disponível em:

https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2004-2006/2006/lei/111326.htm. Acesso em: 29 mar. 2026.

BRASIL. *Plano Safra 2023/2024*. Brasília, DF: Ministério da Fazenda, 2023. Disponível em: <https://static.poder360.com.br/2025/06/plano-safra-2023-2024.pdf>. Acesso em: 29 mar. 2026.

BRASIL. *Resolução CMN nº 5.288, de 26 de março de 2026*. Ajusta normas do Programa Nacional de Fortalecimento da Agricultura Familiar - Pronaf e do Programa de Financiamento a Sistemas de Produção Agropecuária Sustentáveis - RenovAgro. Brasília, DF: Banco Central do Brasil, 2026. Disponível em:

<https://www.bcb.gov.br/estabilidadefinanceira/exibenormativo?tipo=Resolu%C3%A7%C3%A3o%20CMN&numero=5288>. Acesso em: 31 mar. 2026.

BROSE, M. E.; NAVARRO, R. S. Transição rumo à sustentabilidade: desafios da descarbonização da cadeia produtiva do leite no Rio Grande do Sul. *Revista Estudo & Debate*, v. 32, n. 2, 2025.

CARVALHO, Laurine Santos; WILLERS, Camila Daniele; SOARES, Bruna Borges; NOGUEIRA, Alex Rodrigues; ALMEIDA NETO, José Adolfo de; RODRIGUES, Luciano Brito. Avaliação de ciclo de vida do leite de vaca em um sistema de produção semi-intensivo convencional brasileiro. *Environmental Science and Pollution Research International*, v. 29, n. 15, p. 21259–21274, 2022. DOI: 10.1007/s11356-021-17317-5. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11356-021-17317-5>. Acesso em: 12 set. 2025.

DA CRUZ, G. M.; DE MIRANDA, S. H. G. Reflexões para uma pecuária mais sustentável. *Revista de Política Agrícola*, v. 31, n. 4, p. 152–152, 2022.

EMBRAPA Gado de Leite. *Anuário Leite 2024*. Juiz de Fora: Embrapa Gado de Leite, 2024. 140 p. Disponível em:

<https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/1164754/1/Anuario-Leite-2024.pdf>. Acesso em: 12 set. 2025.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (EMBRAPA). *Anuário Leite 2024: avaliação genética multirracial*. Juiz de Fora: Embrapa Gado de Leite, 2024.

FAO. *Pathways towards lower emissions: a global assessment of greenhouse gas mitigation options in livestock agrifood systems*. Rome: FAO, 2023. Disponível em: <https://www.fao.org>. Acesso em: 5 set. 2025.

GERBER, P. J. et al. *Tackling climate change through livestock: a global assessment of emissions and mitigation opportunities*. Rome: FAO, 2013.

- GIL, A. C. *Como elaborar projetos de pesquisa*. 4. ed. São Paulo: Atlas, 2008.
- GUANZIROLI, C. E. PRONAF dez anos depois: resultados e perspectivas para o desenvolvimento rural. *Revista de Economia e Sociologia Rural*, v. 45, n. 2, p. 301-328, 2007.
- GSIA. *Global Sustainable Investment Review 2020*. 2021. Disponível em: <https://www.gsialliance.org/wp-content/uploads/2021/08/GSIR-20201.pdf>. Acesso em: 9 set. 2025.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). Produção de leite. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/explica/producao-agropecuaria/leite/br>. Acesso em: 8 set. 2025.
- IPCC. *2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*. 2019. Disponível em: <https://www.ipcc.ch/report/2019-refinement-to-the-2006-ipcc-guidelines-for-national-greenhouse-use-gas-inventories/>. Acesso em: 9 set. 2025.
- KNAPP, J. R. et al. Invited review: enteric methane in dairy cattle production: quantifying the opportunities and impact of reducing emissions. *Journal of Dairy Science*, v. 97, n. 6, p. 3231–3261, jun. 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.3168/jds.2013-7234>. Acesso em: 12 set. 2025.
- LACKNER, T. Management of enteric methane emissions in ruminants using feed additives: a review. *Animals*, Basel, v. 12, n. 24, art. 3452, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/ani12243452>. Acesso em: 12 set. 2025.
- LIMA, R. P. et al. Life Cycle Assessment of dairy production in Minas Gerais. *Journal of Cleaner Production*, v. 351, p. 131573, 2022.
- LEAN, I. J. et al. Uma meta-análise dos efeitos de algas marinhas na dieta sobre o desempenho de bovinos de corte e leite e a produção de metano. *PLoS ONE*, v. 16, n. 7, art. e0249053, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0249053>. Acesso em: 12 set. 2025.
- MARGULIS, S. (Coord.). *Elaboração de estudos setoriais (energia elétrica, combustíveis, indústria e agropecuária) e proposição de opções de desenho de instrumentos de precificação de carbono: produto 2: diagnóstico de agropecuária: relatório final*. 2018. Projeto PMR Brasil. Disponível em: <http://mediadrawer.gvces.com.br/pmrbrasil/original/relatorio-para-consulta-p4-agropecuaria.pdf>. Acesso em: 9 set. 2025.
- MARKU, D.; HOXHA-JAHJA, A.; MAURMANN, I. The impact of digital technologies on farm operational activities: a case study analysis between Germany and Finland. In: *Proceedings of the International Conference on Research in Business, Management and Finance*, v. 1, n. 1, p. 17–24, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.33422/icrbmf.v1i1.519>. Acesso em: 12 set. 2025.
- MARTINS-COSTA, T. V. A. Produção de leite e emissões de metano na região do Corede, RS. *Arquivo Brasileiro de Medicina Veterinária e Zootecnia*, v. 67, n. 5, p. 1381-1389, 2015.
- McGINN, S. M. et al. Micrometeorological methods for measuring methane emission reduction at beef cattle feedlots: evaluation of 3-Nitrooxypropanol feed additive. *Journal of Environmental Quality*, v. 48, n. 5, p. 1454-1461, set. 2019. DOI:

<10.2134/jeq2018.11.0412>. PMID: 31589722.

NEETHIRAJAN, S.; KEMP, B. Digital livestock farming. *Sensing and Bio-Sensing Research*, v. 32, art. 100408, 2021. DOI: <10.1016/j.sbsr.2021.100408>.

OLIVEIRA, P. P. A. et al. Balanço e emissões de gases de efeito estufa em sistemas integrados. In: *CONGRESSO BRASILEIRO DE SISTEMAS INTEGRADOS DE PRODUÇÃO AGROPECUÁRIA*, 1.; *ENCONTRO DE INTEGRAÇÃO LAVOURA-PECUÁRIA NO SUL DO BRASIL*, 4., 2017, Pato Branco. *Intensificação com sustentabilidade*. Cascavel: UTFPR, 2017. p. 23-32.

PEDREIRA, C. G. S. et al. Ruminant methane emission by dairy cattle in Southeast Brazil. *Scientia Agricola*, Piracicaba, v. 66, n. 6, p. 771-780, 2009.

RIO GRANDE DO SUL. *Bônus Mais Leite*. Porto Alegre: Secretaria de Desenvolvimento Rural, 2025. Disponível em: <https://www.sdr.rs.gov.br/bonus-mais-leite>. Acesso em: 29 mar. 2026.

RIO GRANDE DO SUL. *Operação Terra Forte e Milho 100%*. Porto Alegre: Portal do Estado, 2025. Disponível em: <https://estado.rs.gov.br/leite-lanca-programas-operacao-terra-forte-e-milho-100-para-recupera-cao-produtiva-da-agricultura-familiar>. Acesso em: 29 mar. 2026.

RIO GRANDE DO SUL. *Governo do Estado ultrapassa R\$ 133 milhões em contratos no Programa Bônus Mais Leite*. Porto Alegre: Portal do Estado, 2026. Disponível em: <https://www.estado.rs.gov.br/governo-do-estado-ultrapassa-r-133-milhoes-em-contratos-no-programa-bonus-mais-leite-com-mais-de-2-mil-declaracoes-assinadas>. Acesso em: 29 mar. 2026.