



Greenhouse Gas Mitigation in Goat and Sheep Farming: Assessment Technologies and Production Strategies

Mitigação de Gases de Efeito Estufa em Caprinos e Ovinos: Tecnologias e Estratégias Produtivas

ARAUJO, Cintia Mirely de⁽¹⁾; SILVA, Elves Oliveira da⁽²⁾; SIMÃO, Joanigo Fernando⁽³⁾; MOTA, Istefani Moreira⁽⁴⁾; GOIS, Glayciane Costa⁽⁵⁾; ARAÚJO, Cleyton de Almeida⁽⁶⁾

⁽¹⁾ 0000-0002-7035-7190; Universidade Estadual do Piauí. Corrente, PI, Brasil. Universidade Federal do Vale do São Francisco. Petrolina, PE, Brasil. cintia.m.araujo@gmail.com.

⁽²⁾ 0000-0001-6173-8517; Universidade Federal do Vale do São Francisco. Petrolina, PE, Brasil. elves.osenar@gmail.com.

⁽³⁾ 0009-0004-5663-4958; Universidade Federal do Vale do São Francisco. Petrolina, PE, Brasil. joanigosimao@gmail.com.

⁽⁴⁾ 0000-0002-9603-3899; Universidade Federal do Vale do São Francisco. Petrolina, PE, Brasil. istefanimoreira23@gmail.com.

⁽⁵⁾ 0000-0002-4624-1825; Universidade Federal do Maranhão. Chapadinha, MA, Brasil. glayciane_gois@yahoo.com.br.

⁽⁶⁾ 0000-0003-3636-2890; Universidade Federal do Vale do São Francisco. Petrolina, PE, Brasil. cleyton.araujo@univasf.edu.br.

O conteúdo expresso neste artigo é de inteira responsabilidade dos/as seus/as autores/as.

ABSTRACT

The escalating global demand for animal protein has intensified concerns over greenhouse gas (GHG) emissions from livestock production. Although sheep and goats contribute less to total emissions than cattle, targeted strategies are required to measure and mitigate their environmental impact. This review critically discusses the main methodologies for quantifying GHG emissions in small ruminants, outlining their advantages and limitations, and explores the most promising nutritional, genetic, and management-based mitigation strategies. Approaches such as respiratory calorimetry, sulfur hexafluoride tracing, in vitro techniques, and automated systems are addressed, alongside dietary manipulation, feed additives, genetic selection, and integrated farming systems. The study highlights the importance of tailored, integrated approaches that balance productivity with environmental sustainability.

RESUMO

O crescimento da demanda global por proteína animal tem intensificado a preocupação com as emissões de gases de efeito estufa (GEE) provenientes da produção pecuária. Ovinos e caprinos, embora com menor impacto absoluto que bovinos, demandam estratégias específicas de mitigação e mensuração de suas emissões. Esta revisão visa discutir criticamente os principais métodos utilizados para quantificação de GEE em pequenos ruminantes, destacando suas vantagens e limitações, bem como as estratégias nutricionais, genéticas e de manejo mais promissoras para a redução das emissões. Abordagens como calorimetria respirométrica, o uso de SF₆, técnicas *in vitro* e ferramentas automatizadas foram analisadas, assim como o uso de aditivos, manipulação dietética, melhoramento genético e sistemas integrados de produção. A revisão enfatiza a necessidade de soluções integradas e adaptadas à realidade dos sistemas produtivos, buscando conciliar produtividade e sustentabilidade ambiental. Ao reunir e sistematizar conhecimentos atualizados, este estudo contribui para embasar decisões técnicas e políticas públicas voltadas ao desenvolvimento na produção de caprinos e ovinos.

INFORMAÇÕES DO ARTIGO

Histórico do Artigo:

Submetido: 14/09/2025

Aprovado: 23/12/2025

Publicação: 25/12/2025



Keywords:

Feed efficiency, genetic improvement, nutritional additives, respiratory calorimetry, rumen fermentation.

Palavras-Chave:

Aditivos nutricionais, calorimetria respirométrica, eficiência alimentar, fermentação ruminal, melhoramento genético.

Introdução

As projeções demográficas mais recentes da Organização das Nações Unidas, indicam que a população mundial, que alcançou 8 bilhões de pessoas no final de 2022, deverá atingir aproximadamente 9,7 bilhões em 2050 (ONU, 2022). Este crescimento populacional, associado ao aumento da renda per capita e à contínua urbanização, intensificam significativamente a demanda por proteína animal. Estimativas da Organização para Cooperação e Desenvolvimento Econômico, em conjunto com a Organização das Nações Unidas para a Alimentação e Agricultura, sugerem que a produção de proteína animal precisará aumentar entre 60 a 70% até 2050 para garantir a segurança alimentar global (FAO, 2009; OECD-FAO, 2024). Dentro deste panorama, o consumo de carne de ruminantes (bovinos, ovinos e caprinos) está projetado para crescer 88% entre 2010 e 2050, um dos aumentos mais expressivos entre as fontes de proteína (Ranganathan et al., 2018).

Neste contexto desafiador, os pequenos ruminantes surgem como alternativa estratégica para o atendimento de crescente demanda de forma a contribuir com a segurança alimentar mundial. Suas características únicas incluem eficiência no uso de recursos marginais, capacidade de adaptação a ambientes áridos e semiáridos, contribuição para sistemas de produção circulares, baixa demanda por insumos externos e menor competição por alimentos consumíveis por humanos. De acordo com os dados da FAO (2024), o efetivo mundial atual compreende 1,2 bilhão de ovinos e 1,1 bilhão de caprinos, representando conjuntamente 56% da população global de ruminantes.

Paralelamente ao crescimento da demanda por proteína animal, intensifica-se a preocupação com as emissões de gases de efeito estufa (GEE) provenientes da pecuária. O setor pecuário é responsável por volta de 14-18% das emissões antropogênicas globais, totalizando 4,3-8,1 Gt CO₂-equivalente (FAO, 2017; 2023). Os principais GEE emitidos pelas atividades pecuárias são o metano (CH₄), dióxido de carbono (CO₂) e óxido nitroso (N₂O), sendo o metano o mais significativo, originado principalmente da fermentação entérica (73%) e do manejo de dejetos (7%) (Ferraz et al., 2024).

Segundo avaliação global baseada em 415 estudos *in vivo*, ovinos e caprinos ocupam posições relativamente menores na contribuição para as emissões entéricas globais, correspondendo a 7% e 5%, respectivamente, em comparação com 75% dos bovinos (Della Rosa et al., 2022). Esta distribuição evidencia que os pequenos ruminantes apresentam menor impacto por unidade animal, com os caprinos demonstrando particular eficiência ao emitir menos metano por quilograma de peso vivo em comparação com outros ruminantes domésticos.

Diante deste contexto, esta revisão de literatura tem como objetivo analisar criticamente as principais técnicas disponíveis para mensuração das emissões de gases de efeito estufa em sistemas produtivos de ovinos e caprinos, bem como abordar as estratégias de mitigação mais promissoras, incluindo abordagens nutricionais, de manejo, genéticas e de sistemas integrados.

Fatores que Influenciam as Emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE) em Pequenos Ruminantes

Fatores Intrínsecos ao Animal

Fatores como o número de animais por categorias dentro do rebanho de caprinos e ovinos, o sistema de produção e, conseqüentemente, a qualidade da alimentação e o peso corporal de cada um influenciam o total de emissões para cada uma delas (Henrique, 2023). Estratégias de intensificação sustentável da produção de ruminantes têm como princípio central o aumento da eficiência produtiva aliado à redução das emissões de gases de efeito estufa por unidade de produto. Nesse contexto, a utilização de animais adaptados às condições ambientais locais, associada ao uso de forragens regionais, constitui uma estratégia-chave para a otimização da fermentação ruminal (Eisler et al., 2014; Molina-Botero et al., 2024).

A seleção de animais mais eficientes, com melhor consumo e ganho residual, ou seja, que utilizam melhor os alimentos, com menor necessidade de nutrientes para cada unidade produtiva, levam menos tempo para terminarem o seu ciclo produtivo e gastam menos energia como manutenção e na perda como metano (CH₄), conseqüentemente emitindo menos CH₄. De maneira geral é interessante identificar e selecionar animais geneticamente mais eficientes, com menor consumo e maior ganho em peso, pois estas variáveis são importantes para redução dos custos de produção, além de produzir menos gases de efeito estufa (GEE) como o CH₄, tendo assim um impacto menos negativo sobre o meio ambiente (Nkrumah et al., 2006; Hegarty et al., 2007; Santana et al., 2014; Lima, 2016).

De acordo com FAO (2016) e Grossi et al. (2019), as principais fontes de emissão de CH₄ são a fermentação entérica derivada da digestão dos ruminantes (39,1%). O potencial de adoção de uma determinada estratégia de mitigação depende do sistema de produção, dos objetivos do produtor, do nível tecnológico e das condições regionais ou locais, incluindo políticas, incentivos e barreiras.

Os microrganismos presentes no rúmen fermentam os carboidratos presentes na celulose, produzindo ácidos graxos de cadeia curta (AGCC), o que garante mais de 70% da necessidade energética do animal (Van Soest, 1994). Essa produção de AGCC resulta na produção de hidrogênio, o qual acaba sendo convertido em metano pelos microrganismos metanogênicos (Vijn et al., 2020).

A redução da emissão de metano na produção animal pode ser obtida também por meio da promoção do melhoramento genético, promovendo nos cruzamentos a seleção de traços relacionados com menores níveis de emissão de metano por animal. Assim, pode-se garantir o contínuo aumento de produtividade, conciliando-o com a redução da intensidade das emissões dos produtos como carne e leite, juntamente com sistemas produtivos mais sustentáveis por possuírem animais mais eficientes e adaptados (Pickering et al., 2015; Pinto, 2019).

Fatores Nutricionais

A taxa de produção de CH₄ no rúmen é fortemente influenciada pela composição da dieta, particularmente pelo tipo de carboidrato fermentável (celulose ou amido), bem como pelos teores de proteína e lipídios, que afetam o padrão de fermentação ruminal e a disponibilidade de

hidrogênio para os microrganismos metanogênicos. Além disso, fatores fisiológicos, como o tempo de retenção da digesta no rúmen, e características genéticas do animal também têm um papel significativo nesse processo, ao modularem a eficiência da fermentação e a atividade microbiana (Ku-Vera et al., 2020). Nesse contexto, segundo Gerber et al. (2013), a manipulação da dieta, incluindo o uso de aditivos alimentares, tem sido apontada como uma das principais estratégias para a mitigação da produção entérica de CH₄. Estima-se que sua eficácia seja geralmente baixa considerando a média, mas pode ser substancialmente aumentada em termos de intensidade de emissão quando também resultam em maior eficiência alimentar e ganhos de produtividade

O consumo e a digestibilidade da dieta ofertada ao rebanho influenciam na produção de CH₄ entérico. A emissão de CH₄ por unidade de matéria seca ingerida pode aumentar ou diminuir de acordo com o nível de ingestão, o que pode ser explicado por um maior turnover ruminal, levando a uma menor digestibilidade da massa ingerida. Assim, uma dieta balanceada, com alta digestibilidade, tem o potencial de reduzir substancialmente as emissões de CH₄ (Meo Filho et al., 2022).

A manipulação da dieta atua diretamente sobre a fermentação e opções como o uso de aditivos alimentares, muitos ainda em fase de pesquisa, como taninos, óleos essenciais, adição de óleos e gorduras saturadas e insaturadas, ionóforos, nitrato, leveduras e probióticos (Sakamoto et al., 2013) vêm sendo empregados como alternativas para redução da produção de CH₄ entérico. Esses compostos agem afetando arqueas metanogênicas diretamente ou indiretamente rompendo a membrana dos protozoários do rúmen, Ku-Vera(2020).

No Brasil, uma parcela expressiva da soja e do milho destinados à alimentação animal é produzida em áreas de fronteira agrícola, especialmente nos biomas Amazônia e Cerrado, onde a expansão dessas culturas tem ocorrido, em parte, à custa da conversão de vegetação nativa, onde a soja proveniente dessas regiões apresenta pegada de carbono substancialmente superior à média nacional, em função das emissões derivadas do desmatamento e da perda de estoques de carbono do solo e da vegetação (Escobar et al., 2020).

Desta forma, a produção de alimentos para os animais dentro da propriedade e/ou a sua aquisição de áreas consolidadas (onde não ocorre desmatamento) reduz as emissões secundárias do sistema de produção. Além disso, subprodutos agroindustriais, como o resíduo úmido de cervejaria, a polpa cítrica, subprodutos das indústrias de milho e mandioca são alternativas de baixa intensidade de emissões que podem ser utilizadas na alimentação dos animais. Levando em consideração que é necessário aumentar a eficiência dos sistemas de produção animal, os subprodutos precisam ser incorporados em uma dieta balanceada de acordo com a categoria e produtividade animal, pois os ruminantes têm a capacidade de converter alimentos fibrosos inadequados para humanos em alimento de alto valor biológico como carne, leite, couro, etc. (Beauchemin et al., 2022).

A suplementação é feita através da disponibilização de rações concentradas, quando se busca garantir o atendimento da demanda nutricional em situações que o pasto não consegue suprir, especialmente em períodos mais secos ou quando se deseja potencializar o desempenho animal. Assim, o desempenho animal é melhorado pelo maior consumo de forragem, na melhoria

da digestibilidade e absorção de nutrientes, reduzindo a idade de abate e contribuindo com uma quantidade e qualidade na produção de carcaça maior e, consequentemente, redução da emissão de metano por produto (Anjos e Sene, 2019).

Fatores de Manejo e Sistema Produtivo

A adoção de sistemas de produção animal mais intensivos, como a terminação intensiva a pasto e confinamento, bem como o uso do melhoramento genético animal, reduz a idade ao abate de animais de corte e antecipa a idade ao primeiro parto das fêmeas. Isso, por sua vez, contribui para a intensificação da produção de carne e leite gerando, dessa forma, emissão de CH₄ por quilograma de produto produzido até 30% menor, mesmo havendo um possível aumento nas emissões diárias de CH₄ (Meo Filho et al., 2022).

A intensificação dos sistemas de produção animal deve estar alinhada com a sustentabilidade, em que o aumento da produção de alimentos ocorrerá em menores áreas disponíveis para o plantio e com a utilização mais eficiente de insumos. Como formas indiretas de reduzir a produção de CH₄ entérico, tem-se o uso de diversas práticas de produção e reprodução, como a seleção de animais mais eficientes, manejo adequado da nutrição, promoção do bem-estar e sanidade de forma a promover o aumento da produtividade por animal e por área com grande potencial mitigatório, uma vez que, para uma mesma quantidade de produto comercializado, menos recursos serão utilizados e menos GEE serão emitidos reduzindo, assim, a intensidade de emissões (Beauchemin et al., 2022).

Henderson et al. (2017) apresentaram práticas potencializadoras da redução de GEE, como manejo de pastagem, plantio de leguminosas, adubação nitrogenada, utilização de óleos e nitratos. No caso de alimentação de pequenos ruminantes, a melhoria do uso da pastagem e a utilização de aditivos seriam os principais meios de mitigação. Os autores ainda indicam que a combinação dessas práticas pode reduzir 39% em bovinos de corte, 43% em bovinos leiteiros e 18% em pequenos ruminantes.

Segundo Beauchemin et al. (2022), em sistemas pastoris, a digestibilidade pode ser melhorada otimizando o manejo do pastejo para diminuir a maturidade da forragem, aumentando a digestibilidade da matéria seca e o consumo e melhorando o desempenho animal. O uso de pastagens consorciadas com leguminosas ou uso de bancos de proteínas podem contribuir para melhorar o desempenho animal e diminuir a intensidade de produção de CH₄. A possibilidade de melhoria na dieta animal e a reciclagem de nutrientes resultam em maior produção por animal e por área.

As leguminosas possuem maior teor de proteína bruta, melhor digestibilidade e menor teor de fibra do que as gramíneas tropicais, além de algumas possuírem compostos secundários, como taninos e saponinas, que têm ação sobre as metanogênicas (Beauchemin et al., 2008; Tedeschi et al., 2011). As leguminosas também têm potencial para aumentar o teor de nitrogênio no sistema solo/planta em ambiente consorciado com pastagem, fornecendo uma importante fonte de nitrogênio para as gramíneas e favorecendo o aumento da produtividade vegetal e animal, de forma

a minimizar a emissão de CH₄ e N₂O, pois há redução de fertilizantes químicos nitrogenados (Berndt, et al., 2021).

Métodos de Mensuração da Emissão de GEE em Pequenos Ruminantes

A diversidade de técnicas disponíveis para quantificação da emissão de GEE por caprinos e ovinos pode ser categorizada em dois grandes grupos: Métodos diretos de mensuração *in vivo*, que capturam as emissões durante os processos fisiológicos naturais, e técnicas laboratoriais *in vitro*, que simulam a fermentação ruminal sob condições controladas. Cada técnica apresenta vantagens e limitações, cuja compreensão é fundamental para a seleção da metodologia mais adequada.

Métodos Diretos de Mensuração In Vivo

Calorimetria Respirométrica em Câmaras Metabólicas

A calorimetria respirométrica em câmaras metabólicas é amplamente reconhecida como o método de referência (*gold standard*) para a quantificação das emissões de gases de efeito estufa (GEE) em ruminantes, devido à sua elevada precisão, controle experimental rigoroso e capacidade de mensuração direta das trocas gasosas associadas ao metabolismo animal, fundamentando-se nos princípios da calorimetria indireta para determinação simultânea do gasto energético e da produção de metano (Reynolds et al., 2010; Storm et al., 2012). O sistema baseia-se na mensuração contínua das trocas gasosas respiratórias (O₂, CO₂, CH₄) em ambiente hermeticamente controlado, aplicando a equação de Brouwer para cálculo do metabolismo energético (Reynolds, 2000), conforme descrito abaixo:

Produção de calor (kJ) = (16,18 x O₂) + (5,02 x CO₂) - (2,17 x CH₄) - (5,99 x N); em que: O₂, CO₂ e CH₄ correspondem aos volumes dos gases (L) consumidos ou produzidos, e N representa a excreção de nitrogênio urinário (g), possibilitando a estimativa precisa do gasto energético animal.

Os sistemas modernos empregam sensores infravermelhos não-dispersivos (NDIR) para quantificação de CH₄ e CO₂, combinados com sensores paramagnéticos para mensuração de O₂, garantindo precisão analítica superior a 98% (Rios Rado et al., 2023). Para pequenos ruminantes, as configurações técnicas foram especificamente adaptadas, utilizando câmaras de menor volume (1,8–5,0 m³) e vazões de ar ajustadas (40–300 L/min), visando minimizar o estresse do confinamento sem comprometer a acurácia das medições.

A validação recente da técnica por Tadesse et al. (2024) em caprinos demonstrou coeficientes de variação de 17,5%, estabelecendo-a como método de referência para calibração de sistemas alternativos. Contudo, o método apresenta limitações operacionais significativas, incluindo custos elevados de implantação e manutenção, baixa capacidade experimental e potencial redução do consumo alimentar devido ao confinamento (Battelli, 2024).

Técnica do Hexafluoreto de Enxofre (SF₆)

A técnica do SF₆ foi desenvolvida como alternativa para mensuração de metano em condições de campo, utilizando o hexafluoreto de enxofre como gás traçador inerte. O método baseia-se na premissa de que o SF₆, liberado continuamente no rúmen através de tubos de

permeação, é eructado proporcionalmente ao metano sem ser metabolizado pelo animal (Pinares-Patiño e Clark, 2008). A metodologia envolve a coleta contínua do ar exalado por períodos de 24 horas em canisters, seguida da análise das concentrações de CH₄ e SF₆ por cromatografia gasosa. A emissão diária de metano é calculada pela fórmula: CH₄ (L/dia) = (concentração CH₄ / concentração SF₆) × taxa de liberação SF₆ (L/dia) (Hammond et al., 2016).

Estudos de validação revelaram correlações moderadas com métodos de referência ($r = 0,67-0,76$), porém com tendência à superestimação das emissões (McGinn et al., 2006; Pinares-Patiño et al., 2013). Aplicações recentes da técnica em camelídeos sul-americanos demonstraram sua utilidade para estudos comparativos entre espécies, registrando emissões menores em alpacas (1,42 kg CH₄/kg^{0.75}) comparativamente aos ovinos (1,81 kg CH₄/kg^{0.75}) (Gómez-Oquendo et al., 2024).

Sistemas Automatizados de Medição

Sistema GreenFeed

O GreenFeed representa uma evolução tecnológica na mensuração automatizada de GEE, operando através de comedouros inteligentes equipados com sensores NDIR para CH₄ e CO₂, além de sensores paramagnéticos para O₂ (Tadesse et al., 2024). O sistema registra as emissões durante visitas espontâneas dos animais, oferecendo maior praticidade operacional comparativamente às câmaras respirométricas.

A validação em caprinos por Tadesse et al. (2024) demonstrou correlações satisfatórias com calorimetria de referência ($r = 0,62-0,76$), embora com maior variabilidade (CV = 22,5–26,1% vs. 17,5%). Para obtenção de dados confiáveis, recomenda-se mínimo de quatro medições diárias por animal, com intervalos regulares de seis horas.

Detector de Metano a Laser (LMD)

O LMD utiliza espectroscopia de absorção infravermelha mediante laser direcionado às narinas durante a eructação, mensurando a densidade de coluna de CH₄. Embora apresente portabilidade e operação não-invasiva, o método limita-se à mensuração de concentrações instantâneas, não quantificando fluxos totais de emissão (Sorg, 2021).

A técnica demonstrou correlações variáveis com métodos de referência ($r = 0,47-0,82$), sendo particularmente útil em estudos de campo onde outras metodologias são inviáveis, como em sistemas extensivos de pastejo (Maraveas et al., 2023).

Métodos Laboratoriais in vitro

Ensaio de Produção de Gases

Os ensaios de produção de gases in vitro constituem ferramentas fundamentais para avaliação da fermentação ruminal e predição de emissões de metano, baseando-se na incubação anaeróbica de substratos alimentares com fluido ruminal tamponado. A técnica fundamenta-se no princípio estequiométrico de que a fermentação de carboidratos em Ácidos Graxos de Cadeia Curta (AGCC) gera quantidades definidas de CO₂ e CH₄ (Getachew et al., 1998).

A evolução metodológica progrediu desde sistemas manuais com seringas graduadas (Menke e Steingass, 1988) até técnicas semiautomatizadas como o Reading Pressure Technique (RPT) e sistemas totalmente automatizados como o AnkomRF, que demonstrou precisão superior a 99% na conversão pressão-volume (Silva et al., 2024).

A padronização rigorosa do inóculo representa aspecto crítico da metodologia, exigindo protocolos específicos para pequenos ruminantes, incluindo dieta controlada dos animais doadores e técnicas de preservação da viabilidade microbiana (Abdelkarim et al., 2025).

Análise Cromatográfica e Fermentação Ruminal

A cromatografia gasosa constitui técnica analítica essencial para quantificação precisa de metano, baseando-se na separação cromatográfica seguida de detecção por ionização por chama (FID) ou condutividade térmica (TCD). A metodologia permite análise simultânea de CH₄, CO₂ e outros gases fermentativos com alta especificidade e precisão ($R^2 > 0,99$) (Bizzuti et al., 2023).

Os ensaios de fermentação ruminal complementam a quantificação direta de metano através da avaliação de parâmetros fermentativos correlacionados, incluindo produção de ácidos graxos voláteis, pH ruminal, nitrogênio amoniacal e contagem de protozoários metanogênicos, esses indicadores permitem compreender os mecanismos fermentativos subjacentes às emissões de GEE (Saleem et al., 2025).

Considerações Específicas para Pequenos Ruminantes

A aplicação das técnicas de mensuração de GEE em ovinos e caprinos requer adaptações metodológicas específicas, considerando suas particularidades fisiológicas e comportamentais. Comparativamente aos bovinos, esses animais apresentam maior variabilidade intra e interindividual nas emissões, demandando maior número de réplicas experimentais para obtenção de significância estatística adequada (Abdelkarim et al., 2025).

O menor porte corporal limita o volume de fluido ruminal disponível para ensaios laboratoriais, necessitando ajustes em protocolos originalmente desenvolvidos para espécies de maior porte. Para câmaras respirométricas, especificações técnicas incluem volumes reduzidos e períodos de adaptação estendidos (3–5 dias) para minimizar estresse (Waghorn, 2014).

A variabilidade sazonal da microbiota ruminal é particularmente acentuada em animais sob pastejo, especialmente em regiões semiáridas, em função de flutuações mais acentuadas na disponibilidade e qualidade da forragem ao longo do ano. Estudos indicam que ovinos e caprinos apresentam maior amplitude de variação na composição microbiana e nos padrões fermentativos (Belanche, et al., 2019; Mizrahi, et al., 2021). Além disso, pequenos ruminantes apresentam comportamento mais reativo em ambientes experimentais, exigindo períodos de habituação mais longos a equipamentos e instalações, que podem variar de 7 a 14 dias, dependendo do sistema de produção e do nível de intervenção (Battelli, 2024; Hristov et al., 2019).

Síntese Comparativa e Perspectivas

A seleção da metodologia mais adequada para mensuração de GEE em pequenos ruminantes deve considerar o equilíbrio entre precisão analítica, viabilidade operacional e representatividade dos sistemas produtivos. Enquanto a calorimetria respirométrica oferece

máxima precisão, sua aplicabilidade limita-se a estudos controlados. Por outro lado, técnicas de campo como SF₆ e sistemas automatizados proporcionam maior representatividade das condições reais de produção, embora com menor precisão.

As técnicas *in vitro* destacam-se pela capacidade de triagem eficiente de estratégias de mitigação e pelo menor custo operacional, porém requerem validação cruzada com dados *in vivo* para garantir confiabilidade das inferências. A integração complementar dessas metodologias, considerando suas vantagens e limitações específicas, representa a abordagem mais robusta para quantificação precisa de emissões de GEE em pequenos ruminantes.

Estratégias de Mitigação da Emissão de GEE em Pequenos Ruminantes

A crescente pressão social e de mercado por sistemas de produção "clean, green and ethical" (CGE), aliada à necessidade de alimentar uma população mundial crescente com recursos limitados, tem intensificado a busca por soluções sustentáveis na ovinocultura e caprinocultura (Martin et al., 2024). As estratégias de mitigação de GEE em pequenos ruminantes englobam três principais abordagens: estratégias nutricionais, melhoramento genético e estratégias de manejo. Estas abordagens, quando implementadas de forma integrada, demonstram potencial significativo para reduzir a intensidade de emissões sem comprometer a produtividade animal.

Estratégias Nutricionais

Mecanismos fisiológicos da redução da metanogênese por meio de estratégias nutricionais

As estratégias nutricionais para mitigação de metano em pequenos ruminantes atuam através de múltiplos mecanismos fisiológicos que convergem para a modulação da fermentação ruminal e redução da atividade metanogênica. O processo de metanogênese ruminal é fundamentalmente dependente da disponibilidade de hidrogênio (H₂) e dióxido de carbono (CO₂) como substratos para as arqueias metanogênicas, que utilizam a reação $4\text{H}_2 + \text{CO}_2 \rightarrow \text{CH}_4 + 2\text{H}_2\text{O}$ para produzir metano (Jayanegara et al., 2014). As intervenções nutricionais visam interromper esta via metabólica através da competição por substratos, inibição direta de microrganismos-chave, ou redirecionamento da fermentação para vias alternativas que consomem hidrogênio sem produzir metano.

O redirecionamento da fermentação ruminal representa o principal mecanismo fisiológico de ação, promovendo maior produção de ácido propiônico em detrimento do ácido acético e butírico. Enquanto a formação de acetato e butirato gera hidrogênio livre (precursor do metano), a síntese de propionato consome hidrogênio, resultando em menor disponibilidade de substrato para metanogênese (Arndt et al., 2022). Simultaneamente, muitos aditivos alimentares exercem efeitos antimicrobianos seletivos, inibindo arqueias metanogênicas e protozoários ciliados ruminais sem comprometer populações bacterianas benéficas responsáveis pela digestão de fibras e síntese de proteína microbiana. Esta modulação seletiva da microbiota resulta em fermentação mais eficiente, com maior proporção de energia direcionada para produção animal em detrimento de perdas gasosas, explicando os benefícios simultâneos na redução de metano e melhoria do desempenho produtivo observados na literatura.

Aditivos alimentares: Óleos Essenciais e Ionóforos

Os aditivos alimentares representam uma das estratégias mais promissoras para modular a fermentação ruminal e reduzir a metanogênese em pequenos ruminantes. Uma meta-análise recente compilando 74 estudos demonstrou que a inclusão de óleos essenciais na alimentação de ovinos e caprinos melhorou o desempenho produtivo (maior ganho de peso e produção de leite) e a qualidade dos produtos, além de reduzir significativamente as emissões entéricas de metano em ~3,93 L/dia de CH₄ (Sun et al., 2022). Os animais suplementados apresentaram maior proporção de propionato ruminal, indicando desvio da fermentação para vias menos metanogênicas, sem prejudicar a digestibilidade.

Os ionóforos, como a monensina, foram historicamente eficazes na redução da excreção de nitrogênio e emissões de CH₄, além de melhorar a produtividade animal através da modificação da fermentação ruminal (Ahmed et al., 2024). No entanto, seu uso foi banido na União Europeia devido a preocupações com resíduos em produtos animais e desenvolvimento de resistência bacteriana. Metabólitos secundários de plantas, incluindo taninos, saponinas e óleos essenciais, emergiram como alternativas naturais, demonstrando capacidade de modular a microbiota ruminal e reduzir a metanogênese através de mecanismos que incluem inibição direta de arqueias metanogênicas e alteração dos padrões de fermentação (Zaragoza-Esparza et al., 2020).

Manipulação da dieta

A manipulação da relação volumoso:concentrado constitui uma estratégia fundamental para otimizar a fermentação ruminal e reduzir emissões de metano em pequenos ruminantes. Meta-análises globais demonstram que a alimentação com concentrado melhora significativamente o consumo de matéria seca (+23,4%) e a produção de leite (+19%) sem alterar significativamente as emissões de metano, resultando em menor intensidade de emissões por unidade de produto (Pepeta et al., 2024). A inclusão de 35-40% de concentrado na dieta total promove maior eficiência produtiva através do aumento da digestibilidade energética e proteica.

Abordagens nutricionais direcionadas incluem a implementação de estratégias dietéticas que considerem a qualidade da forragem, com forragens colhidas em estágio fenológico inicial demonstrando menor potencial metanogênico comparadas a gramíneas maduras (Liu et al., 2025). A estratégia de alimentação de precisão, ajustando a composição dietética às exigências específicas de cada categoria animal e fase produtiva, maximiza a eficiência de utilização de nutrientes e minimiza perdas energéticas através da fermentação metanogênica, mantendo a fibra efetiva adequada (18-25% FDN) para preservar a saúde ruminal.

Uso de forragens com taninos e outros compostos bioativos

Forragens ricas em taninos condensados representam uma estratégia nutricional sustentável para mitigar emissões de metano, aproveitando compostos bioativos naturalmente presentes em leguminosas arbóreas e herbáceas. Leguminosas tropicais contêm concentrações de taninos que podem reduzir a produção de metano em até 26% quando incluídas estrategicamente na dieta (Zaragoza-Esparza et al., 2020). O mecanismo de ação dos taninos envolve a complexação

com proteínas microbianas e dietéticas, alterando a população microbiana ruminal e reduzindo a disponibilidade de substrato para arqueias metanogênicas.

No entanto, concentrações elevadas de taninos na dieta podem exercer efeitos antinutricionais em pequenos ruminantes, resultando em redução da digestibilidade da proteína, menor eficiência de utilização do nitrogênio e prejuízos ao desempenho produtivo (Aguiar et al., 2023). Esses efeitos estão associados à formação de complexos tanino-proteína no rúmen, que limitam a degradação microbiana e a disponibilidade de proteína para absorção intestinal. Diante disso, o uso de forragens ricas em taninos exige manejo nutricional cuidadoso, incluindo estratégias como pastejo rotacionado, consórcio com forragens de baixo teor de taninos e, em situações críticas, a suplementação com polietilenoglicol (PEG), que atua como agente ligante de taninos, reduzindo seus efeitos antinutricionais e melhorando a digestibilidade e o desempenho animal (Patra e Saxena, 2011; Besharati et al., 2022; Al Rharad et al., 2025).

Suplementação com lipídios e seus efeitos

A suplementação lipídica constitui uma das estratégias nutricionais mais eficazes para redução de emissões de metano em pequenos ruminantes, com múltiplos mecanismos de ação. Estudos experimentais demonstram que a inclusão de 5% de óleo de soja na dieta aumentou a eficiência alimentar e reduziu a energia dissipada como metano, com a inclusão de 3-6% de lipídeos resultando em redução média de ~14% nas emissões de CH₄ (Tedeschi, 2023; Liu et al., 2023). A eficácia está diretamente relacionada ao perfil de ácidos graxos.

Meta-análises demonstram que a inclusão de óleos na dieta reduz o rendimento de CH₄ em 7,1% e a intensidade de emissões em 39%, simultaneamente aumentando a produção de gordura (16%) e proteína do leite (20%) (Pepeta et al., 2024). Ácidos graxos poli-insaturados demonstram maior potencial anti-metanogênico, com sementes oleaginosas como linhaça, girassol e canola, quando incluídas em níveis de 4-8% da matéria seca da dieta, proporcionando liberação gradual de lipídios no rúmen.

Estratégias de Melhoramento Genético

Fundamentos genéticos para produção de GEE

As estratégias de melhoramento genético voltadas à redução da produção de metano em pequenos ruminantes fundamentam-se no princípio de que características associadas à metanogênese entérica apresentam componente genético herdável, o que permite à seleção direcionada de animais com menor emissão de GEE (Jonker et al., 2018). A produção de metano entérico é uma característica complexa influenciada por múltiplos fatores genéticos que controlam a eficiência digestiva, composição da microbiota ruminal, taxa de passagem alimentar, capacidade ruminal e padrões comportamentais de ingestão. Estudos de herdabilidade demonstram valores moderados ($h^2 = 0,15-0,30$) para diferentes medidas de emissão de metano, indicando que aproximadamente 15-30% da variação fenotípica entre animais é de origem genética, justificando programas de seleção para esta característica (Lassen e Difford, 2020).

O melhoramento genético pode atuar por três mecanismos principais. Primeiro, por meio da seleção direta de indivíduos de baixa emissão, uma vez que a produção de metano apresenta herdabilidade moderada e, portanto, pode responder à pressão de seleção (Rowe et al., 2021). Segundo, por meio da seleção indireta de características correlacionadas: estimativas em ovinos indicam correlação genética negativa entre eficiência alimentar (Consumo Alimentar Residual – CAR) e metano por unidade de consumo, sugerindo que animais mais eficientes tendem a produzir menos metano por unidade de alimento, indicando potencial para uso como traços indicadores em índices de seleção (Johnson et al., 2022). Terceiro, pela manipulação da microbiota ruminal via genótipo do hospedeiro: o perfil metagenômico do rúmen é herdável e está associado tanto às emissões de metano quanto à eficiência alimentar, sendo proposto como ferramenta de seleção para classificar e selecionar animais com microbiomas menos metanogênicos (Hess et al., 2023).

A abordagem genômica moderna permite identificar marcadores moleculares (SNPs) associados a genes que controlam processos metabólicos ruminais, enzimas digestivas, receptores de ácidos graxos voláteis e fatores de transcrição que regulam a expressão gênica relacionada ao metabolismo energético (Pszczola et al., 2017). Esta base genética permite desenvolver índices de seleção que incorporam múltiplas características simultaneamente, otimizando o progresso genético para redução de metano sem comprometer traços produtivos e reprodutivos economicamente importantes.

Seleção para eficiência alimentar

Estudos com ovinos australianos demonstraram que o tempo de ingestão pode servir como indicador genético útil para selecionar animais eficientes sem aumento proporcional do metano, sugerindo que a seleção apenas para baixo consumo alimentar residual (RFI) pode inadvertidamente aumentar as emissões de metano por dia (Hogan et al., 2024). A combinação de traços comportamentais e metabólicos melhora significativamente a seleção para eficiência + baixa emissão.

O projeto internacional "Grass To Gas" (2019-2023) estabeleceu parâmetros genéticos fundamentais, demonstrando herdabilidades moderadas para consumo alimentar residual (CAR) entre 0,37-0,45 Kg de MS/dia em diferentes populações ovinas, com correlações genéticas favoráveis entre CAR e consumo alimentar (0,41-0,79 Kg de MS/dia) e correlações próximas a zero com peso corporal ou ganho de peso (Conington et al., 2024), o que indica que a seleção para maior eficiência alimentar pode ser conduzida sem comprometer o crescimento ou o tamanho corporal dos animais. Esses resultados reforçam o CAR como um critério robusto de seleção para eficiência alimentar, permitindo ganhos em eficiência de utilização dos nutrientes e redução indireta das emissões de gases de efeito estufa, sem efeitos negativos sobre o desempenho produtivo.

Resistência a parasitas e redução de emissões indiretas

A seleção genética para resistência a parasitas representa uma estratégia crucial para redução indireta das emissões de GEE em pequenos ruminantes, uma vez que infecções parasitárias comprometem significativamente a eficiência produtiva. Meta-análises demonstram que, em ovinos e caprinos, a resistência anti-helmíntica está se tornando crescentemente

importante na pecuária, com infecções parasitárias aumentando as emissões (até 30%) através da redução do consumo alimentar, diminuição da digestibilidade e comprometimento da conversão alimentar (Charlier et al., 2024).

Animais geneticamente resistentes a endoparasitas gastrointestinais, especialmente ovinos, mantêm desempenho produtivo superior mesmo sob desafio parasitário, quando comparados a animais susceptíveis. Pesquisas indicam que ovinos resistentes apresentam maior consumo voluntário (~5-15%), melhor ganho médio diário (~10-25%) e maior eficiência alimentar sob infecção parasitária, refletindo menor comprometimento da digestibilidade e da conversão alimentar (Bishop e Morris, 2007; Charlier et al., 2024). Como consequência, a manutenção do desempenho produtivo resulta em redução da intensidade de emissões de gases de efeito estufa por unidade de produto, uma vez que os custos metabólicos associados ao parasitismo são atenuados em animais geneticamente mais resistentes.

De acordo com Hickey et al., (2017) estratégias de melhoramento eco-intensificado para caprinos incluem a seleção assistida por marcadores para resistência a doenças e ectoparasitas, especialmente relevante em condições tropicais onde a pressão parasitária é elevada, contribuindo para sistemas de produção mais sustentáveis e alinhados com demandas de mercado.

Marcadores genéticos associados a menor metanogênese

O desenvolvimento de marcadores genéticos específicos para produção de metano representa o futuro da seleção genética para mitigação de GEE em pequenos ruminantes. Pesquisas recentes demonstram que características de metano entérico apresentam herdabilidade moderada ($h^2 \approx 0,15-0,20$), com estudos de associação genômica ampla (GWAS) identificando loci funcionais e SNPs associados à produção de metano (Pszczola et al., 2017). Estas estimativas justificam cientificamente programas de seleção baseados em características de emissão, com correlações genéticas favoráveis entre emissões e características produtivas economicamente importantes.

A integração de perfis de metagenoma ruminal e dados genéticos em mais de 1.200 ovinos demonstrou que a inclusão de perfis microbianos ruminais aumentou significativamente a acurácia da predição genética para baixa emissão de CH₄ (Brito et al., 2021). Estudos complementares confirmaram que predições genômicas para produção de metano entérico são melhoradas em 15-25% quando combinadas com dados de metaboloma e microbioma em ovinos, indicando que ferramentas multiômicas potencializam a seleção assistida para baixo metano (Difford et al., 2018).

Estratégias de Manejo

Princípios do manejo para mitigação da emissão de GEE

As estratégias de manejo para redução da produção de metano em pequenos ruminantes fundamentam-se na otimização da eficiência do sistema produtivo através da maximização da produtividade por unidade de recurso utilizado, resultando em menor intensidade de emissões por unidade de produto.

O manejo eficiente atua através de três mecanismos principais: melhoria da qualidade e disponibilidade de alimentos, aumento da produtividade animal, e sequestro de carbono no sistema

(Thornton e Herrero, 2010). A abordagem sistêmica do manejo reconhece que a produção de metano não é apenas uma função da dieta consumida, mas também da eficiência com que o animal converte alimento em produto, da saúde e bem-estar animal, e da sustentabilidade a longo prazo do sistema produtivo.

Nesse contexto, métodos de conservação de forragens, como produção de silagens e fenação, também desempenham papel relevante na mitigação das emissões, ao reduzir perdas de nutrientes, estabilizar a oferta de alimento ao longo do ano e melhorar a eficiência de conversão alimentar, especialmente em sistemas de produção de pequenos ruminantes sob condições sazonais de disponibilidade de forragem (Makkar, 2022).

Estudos demonstram que sistemas bem manejados podem apresentar emissões absolutas similares ou até superiores por animal, mas com intensidade de emissões significativamente menor devido à maior produtividade (FAO, 2016). As práticas de manejo integrado incluem sincronização da disponibilidade de nutrientes com as exigências animais, otimização dos ciclos reprodutivos para maximizar a proporção de animais produtivos no rebanho, implementação de programas sanitários preventivos para reduzir perdas por doenças, e adoção de tecnologias de monitoramento que permitem ajustes em tempo real das práticas de manejo (Smith et al., 2021).

Otimização do manejo de pastagens

A otimização do manejo de pastagens constitui uma estratégia fundamental para redução de emissões de GEE em sistemas de produção de pequenos ruminantes, através da melhoria da qualidade nutricional das forragens e aumento da eficiência de utilização das pastagens. Estudos em sistemas silvipastoris indicam que caprinos Anglo-Nubianos tendem a dedicar maior tempo ao pastejo quando comparados a sistemas monoculturais (389,0 vs. 367,2 min), refletindo ajustes comportamentais associados à maior heterogeneidade estrutural e oferta de forragem nesses sistemas, ainda que as diferenças observadas sejam de pequena magnitude (Zambrano et al., 2021). A implementação de sistemas de pastejo rotacional intensivo, com períodos de ocupação curtos (3-5 dias) e descanso adequado (21-35 dias), permite a manutenção de forragens em estágio vegetativo, favorecendo maior valor nutritivo, maior eficiência de colheita da forragem e melhor desempenho animal em sistemas de produção de pequenos ruminantes (Hodgson e Silva, 2002; Briske et al., 2008).

O manejo adequado da capacidade de suporte, evitando sobrepastejo e mantendo cobertura vegetal apropriada, não apenas preserva a produtividade das pastagens a longo prazo, mas também otimiza o desempenho animal através da disponibilização contínua de forragem de qualidade, resultando em menor intensidade de emissões por unidade de produto.

Sistemas silvipastoris e agrosilvipastoris

Os sistemas silvipastoris representam uma das estratégias de manejo mais promissoras para mitigação de emissões de GEE em pequenos ruminantes, combinando produção animal com sequestro de carbono. Experimentos com novilhos em sistema silvipastoril com *Salix* (salgueiro) demonstraram emissões de CH₄ menores que em pasto convencional, sem perda de desempenho animal, confirmando que sistemas silvipastoris mitigam metano e aumentam sustentabilidade (Thompson et al., 2025).

Avaliações em sistemas de caprinos leiteiros integrando árvores e pastagens demonstraram que o sequestro de carbono pode compensar até 100% das emissões brutas, viabilizando neutralidade de carbono (Escribano et al., 2024). A implementação de sistemas silvipastoris com

espécies arbóreas multipropósito como *Gliricidia sepium*, *Leucaena leucocephala*, *Moringa oleifera* e frutíferas proporciona benefícios sinérgicos através do fornecimento de forragem arbórea rica em proteína e compostos bioativos, sombra para redução do estresse térmico animal, diversificação de renda e serviços ecossistêmicos, contribuindo para maior sustentabilidade econômica e ambiental dos sistemas de produção.

Manejo reprodutivo e produtivo eficiente

O manejo reprodutivo eficiente constitui uma estratégia crucial para redução da intensidade de emissões de GEE através da otimização da produtividade por animal e redução do rebanho improdutivo. Análises de sistemas de produção ovina demonstram que operações mais intensivas, com maior produtividade por matriz, apresentam menor intensidade de emissões (12,8-20,1 kg CO₂eq/kg peso vivo) comparadas a sistemas extensivos, confirmando que eficiência reprodutiva reduz a pegada de carbono por unidade de produto (Jones et al., 2024). A implementação de programas de inseminação artificial, sincronização de estros e uso de reprodutores geneticamente superiores acelera o progresso genético e reduz o período improdutivo das fêmeas.

A implementação de tecnologias de precision livestock farming (PLF) no manejo reprodutivo, incluindo dispositivos de monitoramento de atividade, sensores de temperatura e sistemas de identificação eletrônica, permite detecção precoce de estros, diagnóstico rápido de gestação e identificação antecipada de problemas sanitários, oferecendo potencial significativo para redução sustentável de emissões enquanto mantém ou incrementa a produtividade dos sistemas de criação de pequenos ruminantes (Morgan et al., 2024).

Considerações Finais

A mitigação das emissões de GEE na ovinocaprinocultura é um desafio estratégico que demanda soluções integradas, adaptadas às particularidades fisiológicas e aos contextos produtivos. Estratégias como manipulação dietética com aditivos naturais, seleção genética para eficiência alimentar e adoção de sistemas silvipastoris mostram potencial para reduzir significativamente a intensidade de emissões por unidade de produto, aliando sustentabilidade e produtividade. Avanços tecnológicos, como sensores automatizados e técnicas *in vitro*, ampliam a capacidade de monitoramento, embasando políticas públicas precisas.

Conclui-se que o avanço deste setor exige priorizar ciência aplicada, inovação adaptada a realidades locais e políticas de incentivo a práticas ambientalmente inteligentes. A mitigação de GEE deve ser vista como oportunidade para reposicionar os pequenos ruminantes como protagonistas de uma pecuária resiliente. Investimentos em pesquisa, capacitação técnica e assistência especializada são decisivos para consolidar sistemas produtivos competitivos e alinhados às demandas climáticas globais.

REFERÊNCIAS

Abdelkarim, M. M., Abdel-Rahman, G., Bassiony, S., Shehata, S., & Al-Sagheer, A. (2025). Influence of different probiotic combinations supplementation in a highly concentrated diet on in vitro gas production, methane emission, and nutrient degradability in sheep. *Egyptian Journal of*

- Veterinary Sciences*. Advance online publication. <https://doi.org/10.21608/EJVS.2025.337805.2506>
- Ahmed, M. G., Elwakeel, E. A., El-Zarkouny, S. Z., & Ahmed, F. A. (2024). Environmental impact of phytobiotic additives on greenhouse gas emission reduction, rumen fermentation manipulation, and performance in ruminants: An updated review. *Environmental Science and Pollution Research*, 31, 33664–33675. <https://doi.org/10.1007/s11356-024-33664-5>
- Al Rharad, A., El Aayadi, S., Avril, C., Souradjou, A., Sow, F., Camara, Y., ... & Boukrouh, S. (2025). Meta-Analysis of Dietary Tannins in Small Ruminant Diets: Effects on Growth Performance, Serum Metabolites, Antioxidant Status, Ruminal Fermentation, Meat Quality, and Fatty Acid Profile. *Animals*, 15(4), 596.
- Anjos, E. dos. (2019). *Aditivos na terminação intensiva de bovinos de corte a pasto*. (Dissertação de Mestrado em Zootecnia). Universidade Federal de Mato Grosso, Sinop. Recuperado de <https://cms.ufmt.br/files/galleries/64/DISSERTA%C3%87%C3%95ES/2019/ELISMAR%20DOS%20ANJOS.pdf>
- Araiza Ponce, K. A., Gurrola Reyes, J. N., Martínez Estrada, S. C., Salas Pacheco, J. M., Palacios Torres, J., & Murillo Ortiz, M. (2023). Fermentation Patterns, Methane Production and Microbial Population under In Vitro Conditions from Two Unconventional Feed Resources Incorporated in Ruminant Diets. *Animals*, 13(18), 2940.
- Arndt, C., Hristov, A. N., Price, W. J., Yu, Z., & collaborators. (2022). 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*, 119(20), e2111294119. <https://doi.org/10.1073/pnas.2111294119>
- Battelli, M. (2024). *Plant secondary metabolites as a strategy to reduce methane emissions and improve feed efficiency in ruminants* [Tese de doutorado, Università degli Studi di Milano]. Repositório Institucional.
- Beauchemin, K. A., Crosson, P., & van Lingen, H. J. (2020). Cinquenta anos de pesquisa em metanogênese ruminal: lições aprendidas e desafios futuros para mitigação. *Animal*, 14(Suppl. 1), s2-s16. <https://doi.org/10.1017/S1751731119003100>
- Beauchemin, K. A., Dorea, J. R. R., & McGinn, S. M. (2022). Invited review: Current enteric methane mitigation options. *Journal of Dairy Science*, 105(12), 9297-9326. <https://doi.org/10.3168/jds.2022-22091>
- Belanche, A., Kingston-Smith, A. H., Griffith, G. W., & Newbold, C. J. (2019). A multi-kingdom study reveals the plasticity of the rumen microbiota in response to a shift from non-grazing to grazing diets in sheep. *Frontiers in microbiology*, 10, 122.
- Berndt, A., Romero Solórzano, L. A., & Sakamoto, L. S. (2013). Pecuária de corte frente à emissão de gases de efeito estufa e estratégias diretas e indiretas para mitigar a emissão de metano. In *Anais do 6º Simpósio de Nutrição de Ruminantes: Nutrição de precisão para sistemas intensivos de produção de carne: alto desempenho e baixo impacto ambiental* (pp. 3-15). UNESP.
- Besharati, M., Maggolino, A., Palangi, V., Kaya, A., Jabbar, M., Eseceli, H., ... & Lorenzo, J. M. (2022). Tannin in ruminant nutrition. *Molecules*, 27(23), 8273.
- Bishop, S. C., & Morris, C. A. (2007). Genetics of disease resistance in sheep and goats. *Small ruminant research*, 70(1), 48-59.
- Bizzuti, B. E., Pérez-Márquez, S., Scarpino van Cleef, F. de O., Ovani, V. S., Costa, W. S., Lima, P. M. T., Louvandini, H., & Abdalla, A. L. (2023). In vitro degradability and methane production from by-products fed to ruminants. *Agronomy*, 13(4), 1043. <https://doi.org/10.3390/agronomy13041043>
- Brito, L. F., Bedere, N., Douhard, F., Oliveira, H. R., Arnal, M., Peñagaricano, F., Schinckel, A. P., Baes, C. F., & Miglior, F. (2021). Genetic selection of high-yielding dairy cattle toward sustainable farming systems in a rapidly changing world. *Animal*, 15(Supplement 1), 100292. <https://doi.org/10.1016/j.animal.2021.100292>
- Charlier, J., Rinaldi, L., Morgan, E. R., Claerebout, E., Bartley, D. J., Sotiraki, S., Mickiewicz, M., Martinez-Valladares, M., Meunier, N., & Wang, T. (2024). Sustainable worm control in ruminants in Europe: Current perspectives. *Animal Frontiers*, 14(5), 13–23. <https://doi.org/10.1093/af/vfae033>
- Conington, J., Lambe, N., & Tortereau, F. (2024). International approach to reduce greenhouse gas emissions from sheep. *ICAR Technical Series*, 28, 85–92.
- Della Rosa, M. M., Waghorn, G. C., Vibart, R. E., & Jonker, A. (2023). An assessment of global ruminant methane-emission measurements shows bias relative to contributions of farmed

- species, populations and among continents. *Animal Production Science*. Advance online publication. <https://doi.org/10.1071/AN22051>
- Difford, G. F., Plichta, D. R., Løvendahl, P., Lassen, J., Noel, S. J., Højberg, O., Wright, A.-D. G., Zhu, Z., Kristensen, L., Nielsen, H. B., Guldbrandtsen, B., & Sahana, G. (2018). Host genetics and the rumen microbiome jointly associate with methane emissions in dairy cows. *PLoS Genetics*, 14(10), e1007580. <https://doi.org/10.1371/journal.pgen.1007580>
- Eisler, M. C., Lee, M. R. F., Bradley, A., Newton, S., & Harwatt, H. (2014). Agriculture: Steps to sustainable livestock. *Nature*, 507(7490), 32-34.
- Escobar, N., Tizado, E. J., zu Ermgassen, E. K., Löfgren, P., Börner, J., & Godar, J. (2020). Spatially-explicit footprints of agricultural commodities: Mapping carbon emissions embodied in Brazil's soy exports. *Global Environmental Change*, 62, 102067.
- Escribano, M., Horrillo, A., Rodríguez-Ledesma, A., & Gaspar, P. (2024). Stakeholders' perception on the role of extensive livestock farming in the fight against climate change. *Renewable Agriculture and Food Systems*. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/S1742170523000444>
- FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations). (2015). *Environmental performance of animal feed supply chains: Guidelines for assessment*. Livestock Environmental Assessment and Performance Partnership.
- FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations). (2023). *Global Livestock Environmental Assessment Model (GLEAM) 2.0 – Technical documentation*. Rome: FAO.
- FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations). (2024). *FAOSTAT Database: Livestock Primary*. <https://www.fao.org/faostat/en/#data/QCL>
- FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations). (2016). *Livestock & climate change*. FAO. <https://www.fao.org/3/i6345e/i6345e.pdf>
- FAO. (2016). *Livestock & climate change*. FAO. Recuperado de <https://www.fao.org/3/i6345e/i6345e.pdf>
- Ferraz, P. F. P., Ferraz, G. A. S., Ferreira, J. C., Aguiar, J. V., Santana, L. S., & Norton, T. (2024). Assessment of ammonia emissions and greenhouse gases in dairy cattle facilities: A bibliometric analysis. *Animals*, 14(12), 1721. <https://doi.org/10.3390/ani14121721>
- Gerber, P. J., Henderson, B., & Makkar, H. P. S. (2013). Technical options for the mitigation of direct methane and nitrous oxide emissions from livestock: a review. *Animal*, 7(Suppl. 2), 2020-234. <https://doi.org/10.1017/S1751731113000876>
- Getachew, G., Blümmel, M., Makkar, H. P. S., & Becker, K. (1998). In vitro gas measuring techniques for assessment of nutritional quality of feeds: A review. *Animal Feed Science and Technology*, 72(3-4), 261-281. [https://doi.org/10.1016/S0377-8401\(97\)00189-2](https://doi.org/10.1016/S0377-8401(97)00189-2)
- Gómez-Oquendo, J., Torres, M., & Parra, J. E. (2024). Advanced sensor technologies for real-time greenhouse gas monitoring in livestock systems. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 398, 134567. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2024.134567>
- Grainger, C., & Beauchemin, K. A. (2011). Can enteric methane emissions from ruminants be lowered without lowering their production? *Animal Feed Science and Technology*, 166-167, 308-320.
- Grossi, G., Messina, G., Rocci, L., & Ferrise, I. (2019). Livestock and climate change: Impact of livestock on climate and mitigation strategies. *Animal Frontiers*, 9(1), 69-76. <https://doi.org/10.1093/af/vfy034>
- Hammond, K. J., Crompton, L. A., Bannink, A., Dijkstra, J., Yáñez-Ruiz, D. R., O'Kiely, P., ... & Reynolds, C. K. (2016). Review of current in vivo measurement techniques for quantifying enteric methane emission from ruminants. *Animal Feed Science and Technology*, 219, 13-30. <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2016.05.018>
- Hegarty, R. S., Goopy, J. P., Woodgate, R., & Tavendale, A. (2007). Cattle selected for lower residual feed intake have reduced daily methane production. *Journal of Animal Science*, 85, 1479-1486.
- Henderson, B., Gerber, P. J., & Makkar, H. P. S. (2017). Marginal costs of abating greenhouse gases in the global ruminant livestock sector. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 22, 199-224. <https://doi.org/10.1007/s11027-015-9673-9>
- Henrique, F. L., Bonfim, M. A. D., & Tonucci, R. G. (2023). *Estimativa da emissão de gases de efeito estufa provenientes de rebanhos de caprinos e ovinos: no bioma Caatinga, Semiárido brasileiro, em cenários de atuação do FIDA*. UFV, IPPDS.

- Hess, M. K., Zetouni, L., Hess, A. S., Budel, J., Dodds, K. G., Henry, H. M., ... & Rowe, S. J. (2023). Combining host and rumen metagenome profiling for selection in sheep: prediction of methane, feed efficiency, production, and health traits. *Genetics Selection Evolution*, 55(1), 53.
- Hickey, J. M., Chiurugwi, T., Mackay, I., Powell, W., & CGIAR Breeding Programs Workshop Participants. (2017). Genomic prediction unifies animal and plant breeding programs to form platforms for biological discovery. *Nature Genetics*, 49, 1297–1303. <https://doi.org/10.1038/ng.3920>
- Hogan, C., Lawton, T., & Beecher, M. (2024). The factors contributing to better workplaces for farmers on pasture-based dairy farms. *Journal of Dairy Science*, 107(10), 8044–8057. <https://doi.org/10.3168/jds.2023-24416>
- Hristov, A. N., Kebreab, E., Niu, M., Oh, J., Melgar, A., Bannink, A., ... & Yu, Z. (2019). Uncertainties in enteric methane inventories and measurement techniques. In *Greenhouse Gas and Animal Agriculture Conference* (pp. 45-46). Embrapa Southeast Livestock.
- Hristov, A. N., Oh, J., & Lee, C. (2013). Mitigation of methane and nitrous oxide emissions from animal operations: III. A review of animal management mitigation options. *Journal of Animal Science*, 91(11), 5095–5113.
- Jayanegara, A., Wina, E., & Takahashi, J. (2014). Meta-analysis on methane mitigating properties of saponin-rich sources in the rumen: Influence of addition levels and plant sources. *Asian-Australasian Journal of Animal Sciences*, 27(10), 1426–1435. <https://doi.org/10.5713/ajas.2014.14086>
- Johnson, P. L., Hickey, S., Knowler, K., Wing, J., Bryson, B., Hall, M., ... & Rowe, S. J. (2022). Genetic parameters for residual feed intake, methane emissions, and body composition in New Zealand maternal sheep. *Frontiers in genetics*, 13, 911639.
- Jones, L. A., Becker, G. M., Parker, A. M., Williams, C. L., Thompson, L. R., White, R. R., ... & Swecker, W. S. (2024). Greenhouse gas emissions from a diversity of sheep production systems in the United States. *Agricultural Systems*, 213, 103807. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2023.103807>
- Jonker, A., Hickey, S. M., Rowe, S. J., Janssen, P. H., Shackell, G. H., Elmes, S., Bain, W. E., Wing, J., Greer, G. J., Bryson, B., & others. (2018). Genetic parameters of methane emissions determined using portable accumulation chambers in lambs and ewes grazing pasture and genetic correlations with emissions determined in respiration chambers. *Journal of Animal Science*, 96(8), 3031–3042. <https://doi.org/10.1093/jas/sky187>
- Ku-Vera, J. C., Rincón-Ramírez, J. A., & Aguilar-Pérez, C. F. (2020). Role of secondary plant metabolites on enteric methane mitigation in ruminants. *Frontiers in Veterinary Science*, 7, 584.
- Lassen, J., & Difford, G. F. (2020). Review: Genetic and genomic selection as a methane mitigation strategy in dairy cattle. *Animal*, 14(Supplement 3), s473–s483. <https://doi.org/10.1017/S1751731120001561>
- Lima, N. L. L. (2016). *Eficiência produtiva em cordeiros classificados pelo Consumo Alimentar Residual (CAR) e Consumo e Ganho Residual (CGR)*. (Tese de Doutorado em Zootecnia). Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.
- Liu, Y., Zhou, M., Diao, Q., Ma, T., & Tu, Y. (2025). Seaweed as a feed additive to mitigate enteric methane emissions in ruminants: Opportunities and challenges. *Journal of Integrative Agriculture*, 24(4), 1327–1341. <https://doi.org/10.1016/j.jia.2024.09.036>
- Maraveas, C., Simeonaki, E., Loukatos, D., Arvanitis, K. G., & Bartzanas, T. (2023). Livestock Agriculture greenhouse gases for electricity production: Recent developments and future perspectives. *Energies*, 16(9), 3867. <https://doi.org/10.3390/en16093867>
- Martin, R., Pook, T., Bennewitz, J., & Schmid, M. (2025). Genomic selection strategies for the German Merino sheep breeding programme – A simulation study. *Journal of Animal Breeding and Genetics*, 142(3), 251–262. <https://doi.org/10.1111/jbg.12897>
- Mauricio, R. M., Mould, F. L., Dhanoa, M. S., Owen, E., Channa, K. S., & Theodorou, M. K. (1999). A semi-automated in vitro gas production technique for ruminant feedstuff evaluation. *Animal Feed Science and Technology*, 79(4), 321–330. [https://doi.org/10.1016/S0377-8401\(99\)00033-4](https://doi.org/10.1016/S0377-8401(99)00033-4)
- McGinn, S. M., Flesch, T. K., Harper, L. A., & Beauchemin, K. A. (2006). An approach for measuring methane emissions from whole farms. *Journal of Environmental Quality*, 35(1), 14–20. <https://doi.org/10.2134/jeq2005.0250>
- Menke, K. H., & Steingass, H. (1988). Estimation of the energetic feed value obtained from chemical analysis and in vitro gas production using rumen fluid. *Animal Research and Development*, 28, 7–55.

- Meo Filho, P., Rocha, R., & Santos, R. (2022). Sistemas intensificados de pastagem podem reduzir as emissões de metano entérico de bovinos de corte no Bioma Mata Atlântica? *Agronomy*, 12(11), 2738. <https://doi.org/10.3390/agronomy12112738>
- Mizrahi, I., Wallace, R. J., & Moraïs, S. (2021). The rumen microbiome: balancing food security and environmental impacts. *Nature Reviews Microbiology*, 19(9), 553-566.
- Mizrahi, I., Wallace, R. J., & Moraïs, S. (2021). The rumen microbiome: balancing food security and environmental impacts. *Nature Reviews Microbiology*, 19(9), 553-566.
- Molina-Botero, I. C., Villegas, D. M., Montoya, A., Mazabel, J., Bastidas, M., Ruden, A., ... & Arango, J. (2024). Effect of a silvopastoral system with *Leucaena diversifolia* on enteric methane emissions, animal performance, and meat fatty acid profile of beef steers. *Agroforestry Systems*, 98(7), 1967-1984.
- Morgan, C., Caldwell, S., Heath, J., & Lee, S. (2024). Review: Exploring the use of precision livestock farming for small ruminant welfare management. *Animal*, 18(7), 101185. <https://doi.org/10.1016/j.animal.2024.101185>
- Nkrumah, J. D., Okine, E. K., & Mathison, G. W. (2006). Relationships of feedlot feed efficiency, performance, and feeding behavior with metabolic rate, methane production, and energy partitioning in beef cattle. *Journal of Animal Science*, 84(84), 145-153.
- OECD-FAO (Organisation for Economic Co-operation and Development; Food and Agriculture Organization). (2024). *OECD-FAO Agricultural Outlook 2024-2033*. OECD Publishing. https://doi.org/10.1787/agr_outlook-2024-en
- Patra, A. K., & Saxena, J. (2010). A new perspective on the use of plant secondary metabolites to inhibit methanogenesis in the rumen. *Phytochemistry*, 71(11-12), 1198-1222.
- Pepeta, B. N., Hassen, A., & Tesfamarian, E. H. (2024). Quantifying the impact of different dietary rumen modulating strategies on enteric methane emission and productivity in ruminant livestock: A meta-analysis. *Animals*, 14(5), 763. <https://doi.org/10.3390/ani14050763>
- Pickering, N. K., Hess, M., & Jonker, G. (2015). Animal board invited review: Genetic possibilities to reduce enteric methane emissions from ruminants. *Animal*, 9(9), 1431-1440. <http://dx.doi.org/10.1017/s1751731115000968>
- Pinares-Patiño, C. S., & Clark, H. (2008). Reliability of the sulfur hexafluoride tracer technique for methane emission measurement from individual animals: An overview. *Australian Journal of Experimental Agriculture*, 48(2), 223-229. <https://doi.org/10.1071/EA07297>
- Pinares-Patiño, C. S., Hickey, S. M., Young, E. A., Dodds, K. G., MacLean, S., Molano, G., Sandoval, E., Kjestrup, H., Harland, R., Hunt, C., Pickering, N. K., & McEwan, J. C. (2013). Heritability estimates of methane emissions from sheep. *Animal*, 7(S2), 316-321. <https://doi.org/10.1017/S1751731113000864>
- Pinto, T. P. (2019). *Produtividade e mitigação de gases de efeito estufa do setor de pecuária brasileiro*. (Tese de Doutorado em Economia Aplicada). Universidade Federal de Viçosa, Viçosa.
- Pszczola, M., Rzewuska, K., Mucha, S., & Strabel, T. (2017). Heritability of methane emissions from dairy cows over a lactation measured on commercial farms. *Journal of Animal Science*, 95(11), 4813-4819. <https://doi.org/10.2527/jas2017.1842>
- Ranganathan, J., Vennard, D., Waite, R., Dumas, P., Lipinski, B., & Searchinger, T. (2018). *Shifting diets for a sustainable food future*. World Resources Institute. <https://www.wri.org/research/shifting-diets-sustainable-food-future>
- Reynolds, C. K. (2000). Rumen microbiology and feed efficiency in dairy cattle. *Journal of Dairy Science*, 83 (7), 1433-1445. [https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(00\)75012-4](https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(00)75012-4)
- Reynolds, C. K., Crompton, L. A., & Mills, J. A. (2010). Improving the efficiency of energy utilisation in cattle. *Animal Production Science*, 51(1), 6-12.
- Rios Rado, W. M., Huamaní, J. C., & Quispe, E. C. (2023). Development of a mobile open-circuit respiration head hood system for measuring gas exchange in camelids in the Andean Plateau. *Animals*, 13 (6), 1011. <https://doi.org/10.3390/ani13061011>
- Rodrigues, P. H. M., Oliveira, P. P. A., & Berndt, A. (2021). Uso de leguminosas na dieta de ruminantes: adaptação às mudanças climáticas e mitigação da emissão de gases de efeito estufa. In P. H. M. Rodrigues (Org.), *Novos desafios da pesquisa em nutrição e produção animal* (pp. 182-205). 5D Editora.
- Rowe, S. J., Hickey, S. M., Johnson, P. L., Bilton, T. P., Jonker, A., Bain, W., ... & McEwan, J. C. (2021). *The contribution animal breeding can make to industry carbon neutrality goals*.

- Saleem, A. S. A., Abdelnour, S., Bassiony, S. M., Abdel-Monem, U. M., Elaref, M. Y., & Al-Marakby, K. M. (2025). Probiotic supplementation in sustainable sheep production: Impacts on health, performance, and methane mitigation. *Tropical Animal Health and Production*, 57, Article 206. <https://doi.org/10.1007/s11250-024-04770-6>
- Santana, M. H. A., Gomes, R. C., Ferraz, J. B. S., & Rossi, J. P. (2014). Medidas de eficiência alimentar para avaliação de bovinos de corte. *Scientia Agraria Paranaensis*, 13, 95-107.
- Sene, G. A. de, Santos, D. G., & Andrade, S. (2019). Práticas estratégicas com vistas à mitigação dos gases do efeito estufa na produção de bovinos a pasto. In P. H. M. Rodrigues (Org.), *Novos Desafios da Pesquisa em Nutrição e Produção Animal* (pp. 268-294). Editora 5D. Recuperado de https://www.researchgate.net/publication/337325398_Novos_Desafios_da_Pesquisa_em_Nutricao_e_Producao_Animal/link/5dd2830ea6fdcc7e138a8e46/download
- Silva, É. B. R., Silva, J. A. R., Silva, W. C., & Santos, S. A. (2024). A review of the rumen microbiota and the different molecular techniques used to identify microorganisms found in the rumen fluid of ruminants. *Animals*, 14(10), 1448. <https://doi.org/10.3390/ani14101448>
- Smith, P., Reay, D., & Smith, J. (2021). Agricultural methane emissions and the potential for mitigation. *Philosophical Transactions of the Royal Society A*, 379(2210), 20200451. <https://doi.org/10.1098/rsta.2020.0451>
- Sorg, D. (2022). Measuring livestock CH₄ emissions with the Laser Methane Detector: A review. *Methane*, 1(1), 38–57. <https://doi.org/10.3390/methane1010004>
- Storm, I. M., Hellwing, A. L. F., Nielsen, N. I., & Madsen, J. (2012). Methods for measuring and estimating methane emission from ruminants. *Animals*, 2(2), 160-183.
- Sun, X., Cheng, L., Jonker, A., Munidasa, S., & Pacheco, D. (2022). A review: Plant carbohydrate types—The potential impact on ruminant methane emissions. *Frontiers in Veterinary Science*, 9, 880115. <https://doi.org/10.3389/fvets.2022.880115>
- Tadesse, D., Puchala, R., Yirga, H., Patra, A. K., Gipson, T. A., Min, B. R., & Goetsch, A. L. (2024). Determining appropriate numbers and times of daily measurements using GreenFeed system to estimate ruminal methane emission of meat goats. *Animals*, 14(6), 835. <https://doi.org/10.3390/ani14060835>
- Tedeschi, L. O. (2023). Review: The prevailing mathematical modeling classifications and paradigms to support the advancement of sustainable animal production. *Animal*, 100, 100813. <https://doi.org/10.1016/j.animal.2023.100813>
- Thompson, J. P., Stergiadis, S., Carballo, O. C., Zeller, W. E., Yan, T., Lively, F., Gilliland, J., Purusottam, R. N., Huws, S., & Theodoridou, K. (2025). Willow silvopastoral systems as a strategy to reduce methane emissions while maintaining cattle performance. *Scientific Reports*, 15, 19310. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-02289-0>
- Thornton, P. K., & Herrero, M. (2010). Potential for reduced methane and carbon dioxide emissions from livestock and pasture management in the tropics. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 107(46), 19667–19672. <https://doi.org/10.1073/pnas.0912890107>
- United Nations Environment Programme. (2024). *Emissions gap report 2024: No more hot air please: With a massive gap between rhetoric and reality, countries draft new climate commitments*. UNEP. <https://wedocs.unep.org/handle/20.500.11822/46404>
- VAN SOEST, Peter J (1994). *Nutritional ecology of the ruminant*. Cornell university press,
- Vijn, S., Van Lingen, H. J., & van Harten, A. (2020). Key considerations for the use of seaweed to reduce enteric methane emissions from cattle. *Frontiers in Veterinary Science*, 7(1), 1-9. <http://dx.doi.org/10.3389/fvets.2020.597430>
- Waghorn, G. (2008). Beneficial and detrimental effects of dietary condensed tannins for sustainable sheep and goat production—Progress and challenges. *Animal Feed Science and Technology*, 147(1–3), 116–139. <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2007.09.013>
- Zambrano, E. R. A., Edvan, R. L., Oliveira, M. E., Araujo, D. L. C., Costa, J. V., Silva, I. R., ... Dias-Silva, T. P. (2021). Characterization of pasture of Andropogon grass and behavior of grazing goats in a silvopastoral system. *Agroforestry Systems*, 95(6), 1155-1165. <https://doi.org/10.1007/s10457-021-00638-2>
- Zaragoza-Esparza, J., Ku-Vera, J. C., & González-Ríos, H. (2020). Tropical legumes as natural methane inhibitors in ruminant nutrition. *Tropical Animal Health and Production*, 52(4), 1689–1699. <https://doi.org/10.1007/s11250-019-02187-4>