

CAPÍTULO 11

Impacto do consórcio gramínea-leguminosa na dinâmica do carbono no solo e gases de efeito estufa

Monique Évelyn de Lima Pacheco, Francine Basso Facco, Paola de Oliveira Selau, Kamily Pech Oliveira, Amanda Zucheto, Caroline Frozza, Thainara Fagundes, Julio Viégas

<https://doi.org/10.69570/mp.978-65-84548-39-8.c11>

Resumo

O capim-elefante se destaca por seu elevado potencial de produção forrageira em diversas regiões do Brasil. Em muitas propriedades, o cultivo desse capim é realizado de forma intensiva, com a aplicação de grandes quantidades de fertilizantes minerais, principalmente os nitrogenados, o que torna a produção mais cara e menos sustentável. Nesse contexto, a combinação do capim-elefante com leguminosas forrageiras pode tornar o sistema mais eficiente e reduzir os impactos ambientais. O cultivo consorciado de gramíneas e leguminosas não só mantém a produtividade da gramínea associada, como também amplia a oferta de pastagem em sistemas mistos, podendo contribuir para o aumento do estoque de carbono (C) no solo. O sequestro de carbono no solo surgiu como uma estratégia promissora para combater as mudanças climáticas, mas a dinâmica do carbono em sistemas que utilizam gramíneas consorciadas ainda é pouco compreendida. Além disso, são limitadas as informações sobre o balanço de gases de efeito estufa nesses sistemas.

Palavras-chave: capim-elefante, leguminosas, sequestro de carbono, impactos ambientais.

1. Introdução

As pastagens constituem a base da alimentação de aproximadamente 86% do rebanho bovino brasileiro (ABIEC, 2020). O país reúne condições edafoclimáticas favoráveis ao cultivo de diferentes espécies forrageiras de alto

potencial produtivo, tanto de verão, como o capim-elefante, quanto de inverno, como trigo e azevém. Em muitos casos, essas gramíneas podem ser consorciadas com leguminosas, como o amendoim forrageiro e o trevo vesiculoso, elevando a oferta de forragem e contribuindo para a sustentabilidade dos sistemas de produção.

Apesar deste potencial, falhas de manejo relacionadas ao estabelecimento da cultura, à intensidade e frequência de pastejo e à baixa fertilidade do solo ainda resultam em degradação de pastagens (Terra *et al.*, 2019). Sistemas consorciados de gramíneas com leguminosas têm se mostrado alternativas promissoras, pois permitem manter a capacidade produtiva da gramínea acompanhante, aumentam a oferta de forragem e podem contribuir para o aumento do estoque de carbono (C) no solo (Terra *et al.*, 2019). O sequestro de C em solo cultivados com pastagens surgiu como uma estratégia para frente às mudanças climáticas. Entretanto, a dinâmica do C em sistemas consorciados ainda é pouco conhecida (Minasny *et al.*, 2017), e informações sobre o balanço de gases de efeito estufa (GEE), como óxido nitroso (N_2O) e metano (CH_4), são escassas. Esses gases podem comprometer os ganhos ambientais obtidos com o sequestro de carbono, sobretudo quando o uso de leguminosas ou a adubação nitrogenada estimulam a emissão de N_2O (Terra *et al.*, 2019).

Diante disso, surge a necessidade de entender de forma integrada a produtividade, o valor nutritivo das pastagens, a dinâmica do carbono no solo e as emissões de gases de efeito estufa (GEE) em sistemas consorciados.

2. Pastagens como base dos sistemas de produção

As pastagens ocupam um papel central na bovinocultura de leite, especialmente no Brasil, onde a maioria dos produtores ainda utilizam sistemas baseados no pastejo. Essa realidade está associada à ampla disponibilidade de terras e às condições climáticas favoráveis ao crescimento de forrageiras de elevado potencial produtivo (Pereira *et al.*, 2020). Além do aspecto econômico, as pastagens também influenciam positivamente o bem-estar animal, a qualidade do leite produzido e a sustentabilidade dos sistemas de produção, ao

contribuírem para a ciclagem de nutrientes, a conservação do solo e o sequestro de carbono (Terra *et al.*, 2019).

O Brasil dispõe de ampla diversidade de espécies forrageiras, tanto tropicais quanto subtropicais, o que possibilita diferentes arranjos produtivos ao longo do ano. Entre as gramíneas de verão destacam-se o capim-elefante (*Pennisetum purpureum*), as espécies do gênero *Urochloa* e os capins do gênero *Cynodon*, que apresentam elevado potencial produtivo e boa adaptação às condições climáticas nacionais (Bratz *et al.*, 2019; Silveira *et al.*, 2019). Para o período de inverno, espécies anuais como o azevém (*Lolium multiflorum*), a aveia (*Avena sativa*) e o trigo (*Triticum aestivum* L.) assumem papel fundamental, sobretudo nas regiões Sul e Sudeste, onde a sazonalidade climática limita o crescimento das espécies tropicais (Fontaneli *et al.*, 2012). Muitas dessas culturas podem ainda ser utilizadas em consórcio com leguminosas, como o amendoim forrageiro (*Arachis pintoï*) e o trevo vesiculoso (*Trifolium vesiculosum*), proporcionando maior estabilidade na produção de forragem e incremento no valor nutritivo (Olivo *et al.*, 2017).

Sistemas consorciados entre gramíneas e leguminosas surgem como alternativas de grande interesse, uma vez que favorecem a estabilidade produtiva, reduzem a necessidade de adubação nitrogenada e podem contribuir para a mitigação das emissões de GEE (Macedo *et al.*, 2014). Entre as combinações possíveis, o consórcio de capim-elefante com amendoim forrageiro se destaca pela complementaridade entre o elevado potencial produtivo da gramínea e a capacidade da leguminosa em fixar nitrogênio e melhorar o valor nutritivo da dieta animal.

2.1. Capim-elefante

O capim-elefante (*Pennisetum purpureum* Schum.) é originário da África Tropical, Zimbabwe. Essa gramínea é considerada bastante versátil, com boa adaptação a diferentes condições de relevos e tipos de solo, além de excelente desempenho em regiões tropicais e subtropicais (Bratz *et al.*, 2019), exceto em áreas sujeitas a encharcamento (Silveira *et al.*, 2019). Na região Sul do Brasil, o capim-elefante apresenta grande estacionalidade em razão das baixas

temperaturas e ocorrência de geadas, ocasionando variações na produção e valor nutritivo da forragem, refletindo em oscilações que podem limitar o desempenho animal (Daher *et al.*, 2017). Destaca-se, no entanto, que mesmo em períodos de menor crescimento, como no outono e início do inverno, o capim-elefante tende a apresentar melhor qualidade nutricional em relação à forragem produzida no verão (Bratz *et al.*, 2019).

Do ponto de vista produtivo, o capim-elefante possui elevado potencial, podendo alcançar rendimentos superiores a 30 t/ha/ano em sistemas de policultivo sob pastejo (Bratz *et al.*, 2019). Quando bem manejado, em lotação rotacionada, pode se manter produtivo por décadas, com alta produtividade e elevado valor nutricional, e com reduzido impacto ambiental (Olivo *et al.*, 2017; Seibt *et al.*, 2021).

2.2. Amendoim forrageiro

Dentre as poucas leguminosas valorizadas como pastagem, o amendoim forrageiro (*Arachis pintoi* Krap. & Greg.) vem ganhando destaque nos sistemas pecuários (Nascimento, 2006). Trata-se de uma leguminosa perene de verão, nativa da América do Sul, com ocorrência principalmente no Brasil, Paraguai e Argentina (Fontaneli *et al.*, 2012). A introdução da espécie ocorreu em 1954, quando o professor Geraldo C. Pinto coletou um único acesso do gênero *Arachis* no município de Belmonte, na Bahia, fato que marcou o início de sua utilização como forrageira.

O amendoim forrageiro pode ser utilizado em diversos sistemas de produção, incluindo sistemas silvipastoris e agroecológicos, dada sua tolerância ao sombreamento e variabilidade de condições ambientais (Barro *et al.*, 2012). Além disso, apresenta boa capacidade produtiva e pode ser consorciado com diferentes espécies de gramíneas, especialmente dos gêneros *Brachiaria* e *Cynodon* e *Pennisetum* (Olivo *et al.*, 2017).

Do ponto de vista nutricional, destaca-se pelo elevado valor nutritivo. Os teores de proteína bruta podem variar entre 13 a 25 %, enquanto a digestibilidade *in vitro* na matéria seca situa-se entre 60 a 67 % (Ludwig *et al.*, 2010). outro aspecto importante é sua capacidade de fixação biológica do nitrogênio (N)

mediada por bactérias do gênero *Bradyrhizobium*, amplamente presentes nos solos tropicais (Ludwig *et al.*, 2010). Na presença destas bactérias, o amendoim forrageiro pode suprir até 90% de suas necessidades nutricionais em N, contribuindo com aproximadamente 100 kg/ha/ano para o sistema (Miranda *et al.*, 2003). Essa contribuição se reflete em maior taxa de acúmulo de forragem, maior consistência na oferta e menor variação nutricional ao longo do ano em pastagens consorciadas (Olivo *et al.*, 2017).

Além dos benefícios produtivos e nutricionais, o amendoim forrageiro também pode contribuir para a mitigação de emissões entéricas de CH₄. As leguminosas, de modo geral, apresentam compostos secundários como taninos, que afetam a fermentação ruminal e reduzem a produção de CH₄ (Boddey *et al.*, 2020).

2.3. Consórcio gramínea-leguminosa

A busca por sistemas forrageiros mais sustentáveis tem se intensificado, especialmente em função do aumento dos preços dos adubos minerais (Carvalho *et al.*, 2019). A fixação biológica de nitrogênio (FBN) realizada por bactérias gram-negativas do gênero *Rhizobium* em associação com leguminosas, representa um dos mecanismos naturais mais eficientes para o desenvolvimento de pastagens (Carvalho *et al.* 2019). Em consórcio com gramíneas, a FBN estabelece uma relação simbiótica que promove a interação positiva entre espécies, a partir do aproveitamento mútuo do N fixado no solo (Mia *et al.*, 2018).

A presença da leguminosa na composição do pasto proporciona melhores índices de desempenho animal, aumenta a oferta de nutrientes para as forrageiras acompanhantes e para o sistema como um todo, além de proporcionar melhoria nos parâmetros ruminiais, podendo reduzir a produção de metano entérico (Montenegro *et al.*, 2000). Assim, sua inclusão constitui uma alternativa de menor impacto em termos de investimento, quando comparada ao uso de fertilizantes nitrogenados (Barcelos *et al.*, 2008). O principal objetivo da consorciação entre gramíneas e leguminosas é incrementar a produção animal em relação a pastagens de gramíneas exclusivas, além de reduzir custos de

produção (Olivo *et al.*, 2017). Essa prática associa diferentes espécies na mesma área, aumentando a disponibilidade de nitrogênio no solo e reduzindo a necessidade de adubação mineral (Simioni *et al.*, 2014).

Parte do nitrogênio fixado pelas leguminosas pode ser transferido para gramíneas associadas, de forma direta ou indireta. A transferência direta ocorre por meio de produtos nitrogenados liberados pelos nódulos radiculares ou pelo fluxo de nitrogênio através de hifas micorrízicas que interligam as raízes das duas espécies. Já a transferência indireta se dá pela senescência de raízes e nódulos, bem como pela decomposição dos resíduos da leguminosa (Scottl *et al.*, 2015).

Do ponto de vista ambiental, as leguminosas contribuem para reduzir as emissões de GEE. Isso ocorre tanto pela menor necessidade de fertilizantes nitrogenados, que reduz as emissões de óxido nitroso, quanto pela melhoria no desempenho animal, que pode reduzir a emissão de metano entérico (Macedo *et al.*, 2014). Estudos indicam que pastagens consorciadas de gramíneas com leguminosas apresentam vantagem de aproximadamente 30% quando comparado a sistemas em monocultivo, devido ao aumento da qualidade e produção da forragem e da capacidade de suporte, fatores que influenciam diretamente o desempenho animal (Olivo *et al.*, 2017). A inclusão de leguminosas no sistema favorece o valor nutritivo da forragem e melhora o desempenho da pastagem em períodos críticos, como outono e inverno, no Sul do Brasil, marcados por baixas temperaturas (Fioreli *et al.*, 2018). Outro ponto relevante é o potencial das leguminosas em auxiliar na recuperação de áreas de pastagens degradadas (Aguirre *et al.*, 2014).

Apesar desses benefícios, a adoção de leguminosas em sistemas pecuários ainda é limitada. Relatos de empresas de assistência técnica apontam que seu uso vem sendo reduzido em propriedades rurais (Emater, 2021). No entanto, resultados recentes reforçam a importância de sua integração. De acordo com Antunes *et al.* (2024) a presença do amendoim forrageiro em consórcio com capim-elefante melhora a composição e o valor nutritivo da pastagem, reduz a ocorrência de espécies espontâneas e de material senescente, aumenta a proporção de lâminas foliares e diminui a fração colmo+bainha. Este consórcio resultou em maior acúmulo de forragem

(incremento de até 27,5%) e em elevação do valor nutritivo, com destaque para o aumento da proteína bruta.

Destaca-se que a presença do amendoim forrageiro, além de aumentar o acúmulo de forragem, também contribui para a mitigação dos GEE, ao reduzir necessidade de adubação nitrogenada (Boddey *et al.*, 2020), e consequentemente, as emissões de de óxido nitroso (N_2O), um dos gases de maior potencial de aquecimento global (Rusdy, 2021). Neste sentido, o consórcio entre amendoim forrageiro e capim-elefante apresenta potencial para gerar ganhos produtivos, nutricionais e ambientais, consolidando-se como estratégia promissora para sistemas pecuários mais sustentáveis.

3. Emissões de gases do efeito estufa em consórcios de gramíneas e leguminosas

As condições climáticas do Brasil favorecem a produção contínua de pastagens de alta qualidade ao longo do ano, o que representa uma vantagem competitiva para a pecuária nacional. Por outro lado, o país é um dos maiores emissores de CH_4 de origem pecuária. Em 2023, a fermentação entérica respondeu por 64,2% das emissões do setor agropecuário, liberando cerca de 405 milhões de toneladas de CO_2 equivalente apenas pelo “arroto do boi”. No total, a agropecuária foi responsável por 75,6% das emissões nacionais de CH_4 , sendo a pecuária a principal fonte, com 98% desse valor (SEEG, 2024). Esse cenário frequentemente é utilizado como argumento contrário à exportação de produtos de origem animal brasileiros, sobretudo em mercados internacionais mais exigentes em relação às emissões de gases de efeito estufa.

Diante desse contexto, estratégias de manejo que aliem produtividade e mitigação ambiental tornam-se essenciais. O uso de consórcios entre gramíneas e leguminosas tem ganhado destaque como uma alternativa eficiente e econômica para a reposição de nitrogênio ao solo, reduzindo a necessidade de fertilizantes nitrogenados, uma das principais fontes indiretas de emissões de N_2O . Além disso, esse consórcio pode aumentar a taxa de lotação, prolongar o período de pastejo e melhorar o valor nutritivo da forragem (Aranha *et al.*, 2018). O nitrogênio fixado pelas leguminosas pode ser transferido de forma direta ou

indireta para as gramíneas associadas. A transferência direta ocorre através de exsudatos nitrogenados dos nódulos radiculares ou por meio de fluxos de nitrogênio através de hifas de micorrizas que conectam as raízes das duas espécies. Já a transferência indireta acontece por meio da decomposição de resíduos vegetais, como raízes e nódulos, que liberam nitrogênio (Scotti *et al.*, 2015). A fixação biológica do nitrogênio tem um efeito prolongado, uma vez que sua liberação no solo ocorre de forma gradual e contínua (Lüscher *et al.*, 2014).

A adição de nitrogênio ao solo por meio das leguminosas pode influenciar a capacidade de oxidação do CH₄. Altas concentrações de íons amônio (NH₄⁺) no solo, liberadas durante a decomposição dos resíduos dessas plantas, podem inibir a atividade das bactérias metanotróficas, pois competem com o CH₄ pela enzima mono-oxigenase, responsável por sua oxidação (Duvvuri *et al.*, 2004). Esse processo de decomposição de resíduos das leguminosas no solo resulta em uma liberação mais lenta e contínua do nitrogênio, mantendo níveis elevados de N mineral no solo por mais tempo e, conseqüentemente reduzindo a taxa de oxidação de CH₄ (Gomes, 2006).

As leguminosas produzem resíduos com baixa relação C/N, o que favorece uma maior adição de nitrogênio ao solo. Tanto fontes biológicas quanto sintéticas de nitrogênio podem atuar como potenciais emissores de N₂O. O nitrogênio proveniente da fixação biológica por leguminosas, após ser mineralizado, pode ser submetido aos processos de nitrificação e desnitrificado durante a decomposição dos resíduos vegetais (Angamuthu *et al.*, 2010). No entanto, o cultivo dessas espécies não é considerado uma fonte significativa de N₂O (IPCC, 2006). Segundo Rochette e Janzen (2005), não há evidências que indiquem uma relação direta entre a fixação biológica de nitrogênio e a emissão de N₂O.

O aumento das emissões de N₂O em áreas com leguminosas está mais relacionado à liberação de nitrogênio durante a fase de crescimento da planta e, principalmente, à decomposição de seus resíduos vegetais após a colheita, e não diretamente à fixação biológica de nitrogênio (Rochette e Janzen, 2005). Embora sistemas que incluem leguminosas possam apresentar um aumento nas emissões de N₂O superior às observadas em cultivos exclusivos de gramíneas (Gomes *et al.*, 2009), essas espécies têm grande importância na adição de

nitrogênio ao solo, beneficiando as culturas subsequentes e reduzindo a necessidade de adubação nitrogenada (Amado *et al.*, 2002).

A introdução de leguminosas em sistemas agrícolas também pode intensificar a acidificação do solo, em função da maior remoção de material vegetal alcalino durante a colheita de grãos e do aumento da disponibilidade de nitrogênio (Vieira *et al.*, 2008). Essa diminuição do pH do solo pode afetar a atividade das bactérias metanotróficas, que são sensíveis à acidificação do ambiente (Chan e Parkin, 2001).

Por outro lado, a recuperação direta das pastagens, associadas ao manejo intensivo e ao uso de sistemas integrados, representa uma oportunidade importante para a mitigação dos GEE. A alta produção de forragem das gramíneas tropicais, aliada à eficiência no uso de fertilizantes nitrogenados e ao acúmulo de matéria orgânica em pastagens recuperadas e intensificadas, contribui para a redução das emissões de GEE (Oliveira *et al.*, 2007).

Dessa forma, é essencial avançar em estudos voltados para práticas agrícolas capazes de mitigar os efeitos do aquecimento global, por meio do sequestro de carbono (C), do armazenamento de CH₄ e da redução das emissões de N₂O. A degradação das pastagens, além de reduzir a produtividade e a matéria orgânica do solo, também provoca a emissão de CO₂ afetando negativamente o sequestro de carbono na pastagem.

4. Estoque de carbono

O estoque de carbono no solo é a quantidade de carbono que está armazenada no solo. (Estevam *et al.*, 2024). O estoque total inclui componentes inorgânicos e orgânicos, são eles: materiais, fragmentos finos de resíduos, raízes, fauna do solo, biomassa microbiana, produtos de decomposição microbiana e outros processos bióticos, além de compostos simples, como açúcares e polissacarídeos. O CO₂ da atmosfera é capturado pelas plantas e transformado em compostos orgânicos por meio da fotossíntese, que é a reação entre o CO₂ e a água (H₂O), produzindo carboidratos (açúcares) e oxigênio (gás que retorna à atmosfera). O gás atmosférico reage com a água, em partes verdes das plantas (folhas, caule etc.) e em presença de luz, e se transformam em

carboidratos, liberando o gás oxigênio para a atmosfera. Após esse processo de remoção do carbono da atmosfera e incorporação pelas plantas verdes em compostos orgânicos, o elemento passa a desempenhar inúmeras funções na formação da biomassa e no metabolismo vegetal, sendo o componente de todos os compostos orgânicos (e.x. carboidratos, proteínas, lipídios, aminoácidos, ácidos nucleicos, ácidos orgânicos, etc) (Assad *et al.*, 2019).

É necessário entender o processo de captura de CO₂ da atmosfera e sua dinâmica do solo. O CO₂ da atmosfera é capturado pelas plantas e transformado em compostos orgânicos por meio da fotossíntese, que é a reação entre o CO₂ e a água (H₂O), produzindo carboidratos (açúcares) e oxigênio (gás que retorna à atmosfera). O gás atmosférico reage com a água, em partes verdes das plantas (folhas, caule etc.) e em presença de luz, e se transformam em carboidratos, liberando o gás oxigênio para a atmosfera. Após esse processo de remoção do carbono da atmosfera e incorporação pelas plantas verdes em compostos orgânicos, o elemento passa a desempenhar inúmeras funções na formação da biomassa e no metabolismo vegetal, sendo o componente de todos os compostos orgânicos (e.x. carboidratos, proteínas, lipídios, aminoácidos, ácidos nucleicos, ácidos orgânicos, etc) (Assad *et al.*, 2019).

Com a morte das plantas, tem-se a formação dos resíduos vegetais que com o passar do tempo, sofrem um processo de fragmentação por macrorganismos e, posteriormente, a decomposição por microrganismos do solo. Dessa forma, se o material não for protegido da ação biológica dos organismos do solo, ou se essa ação não for lenta, a maior parte dele retornará em pouco tempo para a atmosfera na forma de CO₂. Além disso, a ausência de revolvimento por implementos agrícolas, associada ao aumento da atividade biológica, promove a manutenção e formação de agregados do solo. Parte dos resíduos vegetais recém-adicionados ao solo permanecem no interior dos agregados e ficam protegidos da ação decompositora dos organismos do solo. O resultado final é o aumento da quantidade de compostos orgânicos preservados da ação biológica e o aumento da quantidade formada de carbono orgânico total (COT) e matéria orgânica do solo (MOS) (Assad *et al.*, 2019).

5. Emissões de GEE e estratégias de mitigação

As emissões de CO₂ são consideradas de fundamental importância nos estudos dos GEE. Embora muitos métodos estejam disponíveis para monitorar as emissões de CO₂ do solo, a interpretação e o uso de dados podem ser desafiadores, já que as emissões de CO₂ do solo são influenciadas por múltiplos processos. Compreender a dinâmica das emissões de CO₂ solo é, portanto, fundamental para melhorar suas investigações nessa área (Camarda *et al.*, 2019).

De acordo com Li *et al.* (2007) os microrganismos do solo desempenham um papel central na produção e consumo de CO₂, N₂O e CH₄. Esses microrganismos obtêm energia pela quebra de ligações de carbono (C) de compostos orgânicos dissolvidos. Durante esse processo, os elétrons são transferidos do carbono orgânico dissolvido (COD) para os aceptores de elétrons. Durante o processo de transferência de elétrons, o oxigênio ionizado se combina com o C dissociado para formar CO₂ nas células microbianas. Enquanto os microrganismos do solo consomem o O₂ deixado nos poros do solo, a pressão parcial de O₂ do solo cairá rapidamente.

A depleção de O₂ reduz a atividade de grande parte de decompositores, mas estimula a atuação de microrganismos desnitrificadores no solo. Os desnitrificadores são capazes de usar nitrato (NO₃⁻) como um aceptor de elétrons. Ao receber elétrons, o NO₃⁻ se tornará nitrito (NO₂⁻). O nitrito pode ser ainda mais reduzido a óxido nítrico (NO), óxido nitroso (N₂O) e dinitrogênio (N₂). Durante as próximas etapas de desnitrificação, se o produto intermediário N₂O puder escapar dos microssítios anaeróbios antes de ser ainda mais reduzido, ocorrerá uma emissão líquida de N₂O. Se um solo for colocado sob condições anaeróbicas por um longo tempo (vários dias), os principais oxidantes, como O₂, nitrato, manganês (Mn⁴⁺), ferro (Fe³⁺) e sulfato, serão esgotados pelos decompositores, desnitrificadores. Neste caso, os metanogênicos serão ativados para usar hidrogênio como um aceptor de elétrons que resultará na produção de CH₄ (Li *et al.*, 2007).

Após entender como esses gases se formam, compreender como ocorrem as emissões também é necessário. No solo as emissões de CO₂ estão relacionadas à respiração de raízes, microrganismos e com a decomposição da MO. As emissões de CO₂ são decorrentes principalmente de alterações nas concentrações das diferentes frações da MO do solo, a partir de qualidade, adição ou remoção. (Abreu *et al.*, 2024)

A emissão do CH₄ ocorre a partir da ação de microrganismos denominados metanogênicos, que em condição de anaerobiose, utilizam como substratos o acetato. Sua oxidação pode ser realizada por microrganismos denominados metanotróficos que o utilizam como única fonte de alimento em condições aeróbias (Abreu *et al.*, 2024)

O óxido nitroso (N₂O) é uma das formas gasosas de Nitrogênio (N) produzido durante o processo de nitrificação, também produzido durante o processo de desnitrificação a partir de microrganismos desnitrificantes através da redutase do óxido nítrico, que é comumente associado como principal processo de formação do N₂O (Abreu *et al.*, 2024).

De acordo com Laubach (2023) pastagens são uma fonte importante de emissões de N₂O. Nesse estudo foi avaliado se as emissões líquidas de N₂O de pastagens irrigadas pastadas por vacas leiteiras podem ser reduzidas plantando espécies mais diversas, em comparação com pastagens convencionais de azevém-trevo, e se há benefícios para redução de gases de efeito estufa por ganhos líquidos de C no ecossistema, ou compensações por perdas líquidas de C. Os fluxos de CO₂ e N₂O foram medidos por covariância de vórtice, perto do limite de pastagens mistas de cinco espécies adjacentes (MIX) e pastagens de azevém-trevo branco (RyWC). As emissões anuais de N₂O da pastagem MIX foram de 0,14 g N m⁻² ano⁻¹ (média de dois anos), em comparação com 0,23 g N m⁻² ano⁻¹ da pastagem RyWC. As emissões de N₂O foram responsáveis por 0,34% e 0,61% das entradas de nitrogênio nas pastagens MIX e RyWC, respectivamente. Combinando todos os ganhos e perdas de C, ambas as pastagens registraram ganhos líquidos de C do ecossistema no primeiro ano, de 44 e 282 g C m⁻² para MIX e RyWC, respectivamente. Assim, em ambos os

anos, o balanço líquido de C deu à pastagem RyWC uma vantagem considerável sobre a pastagem MIX no balanço líquido de gases de efeito estufa.

De acordo com Abd-Alla (2023) para mitigar as mudanças climáticas, é necessário encontrar soluções para reduzir o uso de fertilizantes de nitrogênio. De acordo com o autor, a utilização da simbiose *Rhizobium* -leguminosa pode trazer bons resultados. Ao aproveitar essa simbiose natural, os agricultores podem reduzir sua dependência de fertilizantes de nitrogênio sintéticos. Para melhorar a relação simbiótica entre *Rhizobium* e leguminosas e reduzir a dependência de fertilizantes de nitrogênio para mitigação das mudanças climáticas, a seleção de linhagens rizobiais pode melhorar ainda mais os resultados.

A Recuperação e manejo de pastagens também se mostra eficaz em mitigar GEE, manutenção da fertilidade do solo por meio de calagem e adubação, ajuste da taxa de lotação, escolha adequada da espécie forrageira, dentre outras, são práticas essenciais para a manutenção de cobertura vegetal contínua e recuperação de pastagens degradadas, contribuindo para aumentar a quantidade de C armazenada no solo (Meo Filho *et al.*, 2022).

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 (Ku-Vera *et al.*, 2020).

Tendo em vista o potencial destruidor que os GEE possuem, em 2009, o Brasil se comprometeu a reduzir as emissões desses gases. Desde então, foi instituída a Política Nacional sobre Mudanças Climáticas. Em 2010, foi elaborado o Plano Setorial de Mitigação e Adaptação às Mudanças Climáticas para a consolidação de uma Economia de Baixo Carbono na Agricultura (Plano ABC). As ações do Plano ABC buscaram recuperar pastagens degradadas, ampliar a adoção de sistemas de integração lavoura-pecuária-floresta, sistemas agroflorestais e sistema plantio direto, disseminar a fixação biológica de nitrogênio, reflorestar florestas e tratar dejetos animais (Telles *et al.*, 2021). O aumento no sequestro de carbono (C) é importante para melhorar a eficiência e

sustentabilidade dos sistemas pastoris de produção pecuária e é um ponto chave do plano ABC.

6. Referências bibliográficas

- ABD-ALLA, Mohamed *et al.* Enhancing Rhizobium–Legume Symbiosis and Reducing Nitrogen Fertilizer Use Are Potential Options for Mitigating Climate Change. **Agriculture**, v. 13, n. 11, p. 2092, 2023. <https://doi.org/10.3390/agriculture13112092>.
- ABIEC. Associação Brasileira das Indústrias Exportadoras de Carne. **Perfil da Pecuária no Brasil**- Relatório Anual 2020. https://abiec.com.br/wp-content/uploads/SUM%C3%81RIO-BEEF-REPORT-2020_NET-4.pdf. Acessado: 04 de outubro de 2025.
- ABREU, Natan *et al.* Mudanças de uso da terra e emissão de gases de efeito estufa: uma explanação sobre os principais *drivers* de emissão. **Ciência Animal Brasileira**, v. 25, p. 77646E, 2024.
- AGUIRRE, Priscila *et al.* Produtividade de pastagens de Coastcross-1 em consórcio com diferentes leguminosas de ciclo hibernal. **Ciência Rural**, v. 44, p. 2265-2272, 2014. <https://doi.org/10.1590/0103-8478cr20140156>.
- AMADO, T.J.C.; Mielniczuk, J.; Aita, C. Recomendação de adubação nitrogenada para o milho no RS e SC adaptada ao uso de culturas de cobertura do solo, sob sistema plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.26, n.1, p.241-248, 2002. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832002000100025>.
- ANGAMUTHU, Raja *et al.* Electrocatalytic CO₂ conversion to oxalate by a copper complex. **Science**, v. 327, n. 5963, p. 313-315, 2010. <https://doi.org/10.1126/science.1177981>
- ANTUNES, Monique *et al.* Sward characteristics, herbage accumulation and nutritional value of elephantgrass based mixed with or without pinto peanut. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, 96(2), e20231145, 2024. <https://doi.org/10.1590/0001-3765202420231145>.
- ARANHA, A. S. *et al.* Performance, carcass and meat characteristics of two cattle categories finished on pasture during the dry season with supplementation in different forage allowance. **Arquivo Brasileiro de Medicina Veterinária e Zootecnia**, v. 70, n. 2, p. 517-524, 2018. <https://doi.org/10.1590/1678-4162-9576>.
- ASSAD, Eduardo *et al.* Sequestro de carbono e mitigação de emissões de gases de efeito estufa pela adoção de sistemas integrados. 2019. <http://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/1112696>. Acessado: 04 de outubro de 2025.

- BARCELLOS, Alexandre *et al.* Sustentabilidade da produção animal baseada em pastagens consorciadas e no emprego de leguminosas exclusivas, na forma de banco de proteína, nos trópicos brasileiros. **Revista Brasileira Zootecnia**, v.37, supl. esp., p.51-67, 2008. <https://doi.org/10.1590/S1516-35982008001300008>.
- BARRO, Raquel *et al.* Forage yield and nitrogen nutrition dynamics of warm-season native forage genotypes under two shading levels and in full sunlight. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v. 41, n. 7, p. 1589-1597, 2012. <https://doi.org/10.1590/S1516-35982012000700006>.
- BODDEY, Robert *et al.* Forage legumes in grass pastures in tropical Brazil and likely impacts on greenhouse gas emissions: A review. **Grass and forage Science**, v. 75, n. 4, p. 357-371, 2020. <https://doi.org/10.1111/gfs.12498>.
- BRATZ, Vinicius *et al.* Response of elephant grass to grazing under an organic production system. **Revista Ciência Agronômica**, v. 50, n. 1, p. 159-168, 2019. <https://doi.org/10.5935/1806-6690.20190019>.
- CAMARDA, Marco *et al.* The monitoring of natural soil CO₂ emissions: Issues and perspectives. **Earth-Science Reviews**, v. 198, 2019, <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2019.102928>.
- CARVALHO Luciani *et al.* Nodulation and biological nitrogen fixation (BNF) in forage peanut (*Arachis pintoi*) cv. Belmonte subjected to grazing regimes. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, 278: 96-106. 2019. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2019.102928>.
- CHAN, Alvarus; PARKIN, Timothy. Methane oxidation and production activity in soils from natural and agricultural ecosystems. **Journal of Environmental Quality**, v. 30, n. 6, p. 1896-1903, 2001. <https://doi.org/10.2134/jeq2001.1896>.
- DAHER, Rogério *et al.* Variação sazonal na produção de forragem de clones intra e interespecíficos de capim elefante. **Revista Agrarian**, v. 10, n. 38, p. 294-303, 2017. <http://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/handle/doc/1099840>. Acessado: 04 de outubro de 2025.
- EMATER. **Relatório Socioeconômico da Cadeia Produtiva do Leite no Rio Grande do Sul: 2021**. Porto Alegre: Emater/RS-Ascar, 2021. <https://www.sindilat.com.br/site/wp-content/uploads/2021/09/RELATORIO-LEITE-2021.pdf>. Acessado: 04 de outubro de 2025.
- ESTEVAM, Camila; De Moraes Pavão, Eduardo. Carbono no solo essencial no combate às mudanças climáticas. **AgroANALYSIS**, v. 44, n. 9, p. 25-27, 2024.
- FERRAZZA, Jussara *et al.* Dinâmica de produção de forragem de gramíneas anuais de inverno em diferentes épocas de semeadura. **Ciência Rural**, v. 43(7), p. 1174–1181, 2013. <https://doi.org/10.1590/S0103-84782013005000086>.

- IORELI, A. B. *et al.* Valor nutritivo de gramíneas do gênero *Cynodon* consorciadas com amendoim forrageiro. **Arquivo Brasileiro de Medicina Veterinária e Zootecnia**, v. 70, p. 1970-1978, 2018. <https://doi.org/10.1590/1678-4162-10048>.
- FONTANELI, Renato *et al.* Gramíneas Forrageiras perenes de verão. In: FONTANELI, R. S. *et al.* **Forrageiras para integração lavoura-pecuária-floresta na região sul-brasileira**. 2. ed. Brasília: Embrapa, 2012b. cap. 8. p. 265-269.
- GOMES, Juliana. Emissão de gases do efeito estufa e mitigação do potencial de aquecimento global por sistemas conservacionistas de manejo do solo. 2006. 126 f. **Tese (Doutorado)** - Programa de Pós Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2006.
- GOMES, Juliana. *et al.* Soil nitrous oxide emissions in long-term cover crop-based crop rotations under subtropical climate. **Soil & Tillage Research, Amsterdam**, v. 106, n. 1, p. 36-44, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.still.2009.10.001>.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). Refinement to the 2006 **IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, 2019**. Acessado: 23 de setembro de 2025. <https://www.ipcc.ch/report/2019-refinement-to-the-2006-ipcc-guidelines-for-national-greenhouse-gas-inventories/>.
- KU-VERA, Juan *et al.* Role of secondary plant metabolites on enteric methane mitigation in ruminants. **Frontiers in Veterinary Science**, v. 7, p. 584, 2020. <https://doi.org/10.3389/fvets.2020.00584>
- LI, Changsheng. Quantifying greenhouse gas emissions from soils: Scientific basis and modeling approach. **Soil Science and Plant Nutrition**, v. 53 n. 4, p. 344–352, 2007. <https://doi.org/10.1111/j.1747-0765.2007.00133.x>.
- LUDWIG, Rodrigo *et al.* Produção e qualidade do *Arachis pintoi*. **Enciclopédia Biosfera**, v. 6, n. 11, p. 1-14. 2010.
- LÜSCHER, A. *et al.* Potential of legume-based grassland–livestock systems in Europe: a review. **Grass and Forage Science**, v. 69, n. 2, p. 206-228, 2014. <https://doi.org/10.1111/gfs.12124>.
- MACEDO, Manuel *et al.* Degradação de pastagens, alternativas de recuperação e renovação, e formas de mitigação. In: **Anais de Congresso**, Ribeirão Preto, SP, Embrapa Gado de Corte, p.158-181, 2014.
- DUVVURI, Sridhar. Majumdar S. Mitra, A. Role of metabolism in ocular drug delivery. **Current drug metabolism**, v. 5, n. 6, p. 507-515, 2004. <https://doi.org/10.2174/1389200043335342>.
- MEO FILHO, Paulo *et al.* Sistemas intensificados de pastagem podem reduzir as emissões de metano entérico de bovinos de corte no Bioma Mata Atlântica?

- Agronomy**, n. 12, p. 2738, 2022.
<https://doi.org/10.3390/agronomy12112738>.
- MIA, Shamim *et al.* Enhanced biological nitrogen fixation and competitive advantage of legumes in mixed pastures diminish with biochar aging. **Plant Soil**, v. 424, p. 639-651, 2018.<https://doi.org/10.1007/s11104-018-3562-4>.
- MINASNY, Budiman *et al.* Soil carbon 4 per mille. **Geoderma**, v. 292, p. 59-86, 2017.<https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2017.01.002>.
- MIRANDA, Cesar; Vieira, A.; Cadish, G. Determinação da fixação biológica de nitrogênio no amendoim forrageiro (*Arachis spp.*) por intermédio da abundância natural de ^{15}N . **Revista Brasileira de Zootecnia**, v. 32, n. 6, p. 1859-1865, nov./dez. 2003.<https://doi.org/10.1590/S1516-35982003000800008>.
- MONTENEGRO, Abarca. Fijación de carbono, emisión de metano y óxido nitroso en sistemas de producción bovina en Costa Rica. In: Intensificación de la ganadería en Centroamérica beneficios económicos y ambientales. Costa Rica: **CATIE/FAO/SIDE**. Editado por Nuestra Terra, 334 p., 2000.
- NASCIMENTO, Inaldete. O cultivo do amendoim forrageiro. **Current Agricultural Science and Technology**, v. 12, n. 4, 2006.
<https://periodicos.ufpel.edu.br/index.php/CAST/article/view/4687?>
Acessado: 04 de outubro de 2025.
- SEEG (Sistema de Estimativas de Emissões e Remoções de Gases de Efeito Estufa). Análise das emissões de gases de efeito estufa e suas implicações para as metas climáticas do Brasil, 2024. <https://seeg.eco.br/wp-content/uploads/2024/11/SEEG-RELATORIO-ANALITICO-12.pdf>.
Acessado: 23 de setembro de 2025.
- OLIVEIRA, Ricardo *et al.* Área foliar em três cultivares de cana-de-açúcar e sua correlação com a produção de biomassa. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 37, n. 2, p. 71-76, 2007.<https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=253020281002>.
- OLIVO, Clair *et al.* Forage systems mixed with forage legumes grazed by lactating cows. **Acta Scientiarum. Animal Sciences**, v. 39, n. 1, p. 19-26, 2017. <https://doi.org/10.4025/actascianimsci.V39I1.32300>.
- PEREIRA, José *et al.* Production of beef cattle grazing on *Brachiaria brizantha* (Marandu grass)-*Arachis pintoi* (forage peanut cv. Belomonte) mixtures exceeded that on grass monocultures fertilized with 120 kg N/ha. **Grass and Forage Science**, v. 75, n. 1, p. 28-36, 2020.<https://doi.org/10.1111/gfs.12463>.
- ROCHETTE, Philippe; JANZEN, Henry H. Towards a revised coefficient for estimating N_2O emissions from legumes. **Nutrient cycling in agroecosystems**, Heidelberg, v.73, n.2- 3, p.171-179, 2005.

- RUSDY, Muhammad. Grass-legume intercropping for sustainability animal production in the tropics. **CAB Reviews**, v.16, n.1, p.1-9, 2021. <https://doi.org/10.1079/PAVSNNR202116021>.
- SCOTTI, Ricardo *et al.* Organic amendments as sustainable tool to recovery fertility in intensive agricultural systems. **Journal of soil science and plant nutrition**, v.15, n.2, p.333-352, 2015. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-95162015005000031>.
- SEIBT, Daiane. Forage mass and nutritional value of elephant grass intercropped with forage legumes. **Revista Ceres**, v. 68, n. 5, p. 429-440, 2021. <https://doi.org/10.1590/0034-737X202168050008>.
- SILVEIRA, Robson *et al.* Atributos químicos de um Neossolo Flúvico cultivado com capim elefante (*Pennisetum purpureum*) no município de Bela Cruz-CE. **Agropecuária Científica no Semiárido**, v. 14, n. 4, p. 325-330, 2019.
- SIMIONI, Tiago *et al.* Senescência, remoção, translocação de nutrientes e valor nutritivo em gramíneas tropicais. **PUBVET**, v. 8, n. 13, Ed. 262, Art. 1743, Julho, 2014.
- TELLES, Tiago *et al.* **Desenvolvimento da agricultura de baixo carbono no Brasil**. Texto para Discussão 2638. Brasília: Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada – IPEA, mar. 2021. <https://repositorio.ipea.gov.br/entities/publication/9a41a687-29d9-4764-aa34-b31ed89feb3d>. Acessado: 04 de outubro de 2025.
- TERRA, Ana; Florentino, L. A.; Rezende, A. V.; Silva, N. C. D. E. Leguminosas forrageiras na recuperação de pastagens no Brasil. **Revista de Ciências Agrárias**, v. 42, n. 2, p. 305–313, 2019. <https://doi.org/10.19084/rca.16016>.
- VIEIRA, Frederico *et al.* Long-term acidification of a Brazilian Acrisol as affected by no till cropping systems and nitrogen fertiliser. **Australian Journal of Soil Research**, v. 46, n. 1, p. 17-26, 2008, <https://doi.org/10.1071/SR07088>.

Autores

Monique Evelyn de Lima Pacheco, Francine Basso Facco, Paola de Oliveira Selau, Kamilly Pech Oliveira, Amanda Zucheto, Caroline Frozza, Thainara Fagundes, Julio Viégas

Departamento Zootecnia, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, Brasil.