

Capítulo 12

Emissões de gases de efeito estufa e sequestro de carbono em sistemas de integração lavoura-pecuária-floresta

Mônica Matoso Campanha
Isabella Cristina de Faria Maciel
Thomaz Correa e Castro da Costa
Miguel Marques Gontijo Neto
Ramon Costa Alvarenga



Foto: Isabella Cristina de Faria Maciel

Introdução

O Brasil tem se destacado cada vez mais no setor agropecuário, e são crescentes as preocupações com as emissões de gases de efeito estufa (GEE) pelo setor, uma vez que as mudanças climáticas e o aquecimento global têm sido atribuídos às emissões antrópicas de GEE. No País, as emissões de GEE causadas diretamente pela agropecuária representam 28% do total (Albuquerque et al., 2020) e derivam principalmente da produção animal e vegetal, em que a bovinocultura de corte é uma das principais fontes, seguida do uso de fertilizantes nitrogenados, da deposição de dejetos animais e da decomposição de resíduos culturais, entre outros (Emissões [...], 2018).

Nos últimos anos, a agricultura tem sido reconhecida pelo seu potencial em reduzir as emissões de GEE através da adoção de práticas de mitigação e uso sustentáveis. A bovinocultura de corte é o setor com a maior margem para a implementação de melhorias em seu sistema produtivo, principalmente relacionadas ao aumento da eficiência do uso de pastagens no Brasil (Emissões..., 2018).

O governo brasileiro criou o Plano Setorial de Mitigação e de Adaptação às Mudanças Climáticas para a Consolidação de uma Economia de Baixa Emissão de Carbono na Agricultura, também denominado Plano ABC (Agricultura de Baixa Emissão de Carbono), com o objetivo de promover, entre outros, a mitigação da emissão dos GEE na agricultura e possibilitar a adaptação do setor agropecuário às mudanças climáticas. Dentre as estratégias que envolvem o uso de tecnologias de produção sustentável estão elencados os sistemas de integração lavoura-pecuária-floresta (ILPF) (Brasil, 2020).

Notadamente os sistemas ILPF, que possuem o componente florestal e forrageiro, apresentam grande potencial de neutralizar a emissão de GEE dos componentes agrícola e pecuário do sistema, por meio do estoque de carbono na biomassa das árvores e no solo (Assad et al., 2019). Pesquisas avaliando a implantação de sistemas ILPF têm mostrado redução das emissões de GEE em 20% por hectare de pastagem e em 60% por quilo de carcaça produzida (Emissões..., 2018). A relação entre a eficiência na produção de sistemas agropecuários e a diminuição das emissões do setor é uma oportunidade de atender à crescente demanda por produtos pecuários, proporcionando balanço positivo de carbono (Manzatto et al., 2019; Souza et al., 2019).

Nesse sentido, a Embrapa desenvolveu o conceito Carne Carbono Neutro (CCN), visando fomentar a adoção de sistemas produtivos capazes de neutralizar o metano emitido pelo rebanho e também difundir a importância estratégica da sustentabilidade nas cadeias produtivas associadas – carne, grãos e silvicultura (Alves et al., 2015). Alguns aspectos desse protocolo serão utilizados como referência no presente trabalho.

Este capítulo apresenta, de maneira independente, uma síntese de resultados sobre o balanço de GEE avaliado nos sistemas de Integração lavoura-pecuária (ILP) e integração lavoura-pecuária-floresta (ILPF) conduzidos na Unidade de Referência Tecnológica e de Pesquisa (URTP) da Embrapa Milho e Sorgo. Assim, serão apresentados e discutidos resultados referentes ao sequestro de carbono pelo componente arbóreo dos sistemas ILPF, a emissão de metano em bovinos de corte em sistema ILP e a emissão de óxido nitroso e metano pelas excretas de bovinos de corte em confinamento em sistema ILP.

Avaliação do sequestro de carbono nos sistemas de integração lavoura-pecuária-floresta

O objetivo do estudo foi avaliar o crescimento do eucalipto em sistemas ILPF, o sequestro de carbono nas árvores e o potencial da ILPF como estratégia para a compensação das emissões de gases de efeito estufa emitidos pelos bovinos.

Os sistemas ILPF foram implantados na Embrapa Milho e Sorgo, em Sete Lagoas, MG, em três etapas: fevereiro de 2009 (ILPF 1), outubro de 2011 (ILPF 2) e outubro de 2013 (ILPF 3). Cada sistema foi composto por seis renques simples de *Eucalyptus grandis x urophylla* clone GG100, com 100 m de comprimento, espaçamento 15 x 2 m, formando estande de 333 árvores por hectare. As áreas de ILPF foram posicionadas em áreas próximas, adotando mesmo alinhamento, densidade e espaçamento (Figura 12.1).



Figura 12.1. Imagem aérea da Unidade de Referência Tecnológica e de Pesquisa (URTP) em sistemas de integração lavoura-pecuária-floresta (ILPF), compostos pelos consórcios de eucalipto-milho-braquiárias implantados nos anos de 2009, 2011 e 2013, na Embrapa Milho e Sorgo.

Edição de Miguel Marques Gontijo Neto sobre imagens do programa GoogleEarth obtidas em 21/7/2020.

Ao longo dos anos, foram plantadas culturas agrícolas e forrageiras nas entrelinhas dos renques de eucalipto. O consórcio milho-capim-eucalipto foi adotado nos três primeiros anos de implantação do sistema, e após esse período apenas o capim foi mantido na entrelinha do eucalipto, pastejado de forma intermitente por bovinos até a safra 2019/2020.

Com relação ao componente arbóreo, as áreas foram desbastadas para redução do número de árvores no sistema. Em 2014, foi realizado o desbaste de 50% das árvores em metade dos renques do sistema ILPF 1, o mesmo foi realizado em 2015 para o sistema ILPF 2, o que proporcionou a redução do estande de cada sistema ILPF para 166 árvores por hectare. Dessa forma, os sistemas 1 e 2 foram subdivididos em A e B, sendo o ILPF A referente ao estande remanescente de 333 árvores por hectare e o ILPF B referente ao estande de 166 árvores por hectare. No sistema ILPF 3, implantado em 2013, não foi realizada nenhuma intervenção até o ano de 2019. Em 2019, novas reformas e densidades foram estabelecidas, mas esses dados ainda estão em processo de análise e não foram considerados neste capítulo. A Figura 12.2 mostra os aspectos da implantação dos sistemas ILPF.

O crescimento do eucalipto foi avaliado anualmente, com medidas de diâmetro na altura do peito (DAP), medido com suta, e da altura total (H), medida com hipsômetro eletrônico em árvores alternadas, cobrindo toda a extensão dos renques, amostrando 10% do povoamento. O volume ($m^3 \text{ ha}^{-1}$) foi estimado por

equações ajustadas para cada povoamento, com o modelo de Schumacher e Hall (1933), por meio de cubagem rigorosa realizada nas árvores desbastadas.



Figura 12.2. Detalhes do sistema de integração lavoura-pecuária-floresta implantados na Embrapa, em Sete Lagoas, MG

Com os dados de DAP e altura, o crescimento das árvores foi projetado em cada sistema ILPF, com e sem desbaste, por meio de um modelo de distribuição diamétrica, o que resultou em colheita prevista para 12 anos de idade. Essa data prevista para o corte da madeira corresponde ao período final para quitação de um eventual empréstimo oriundo da linha de crédito específica para ILPF do Plano ABC Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social (BNDES). A metodologia de projeção utilizou a distribuição de Weibull com três parâmetros, ajustada pelo método dos percentis (Wendling et al., 2011), e funções de regressão criadas a partir da relação entre os dados de monitoramento do plantio e implementada na aplicação CalcMadeira®, ainda na sua versão inicial (Costa et al., 2021).

Os resultados de crescimento anual das árvores estão descritos no Capítulo 11. O cálculo do sequestro de carbono será feito com os dados do eucalipto no período estimado para colheita final. O volume de madeira alcançado no ano de 2019 e o volume projetado para 12 anos de crescimento das árvores, em cada área de plantio, estão apresentados na Figura 12.3.

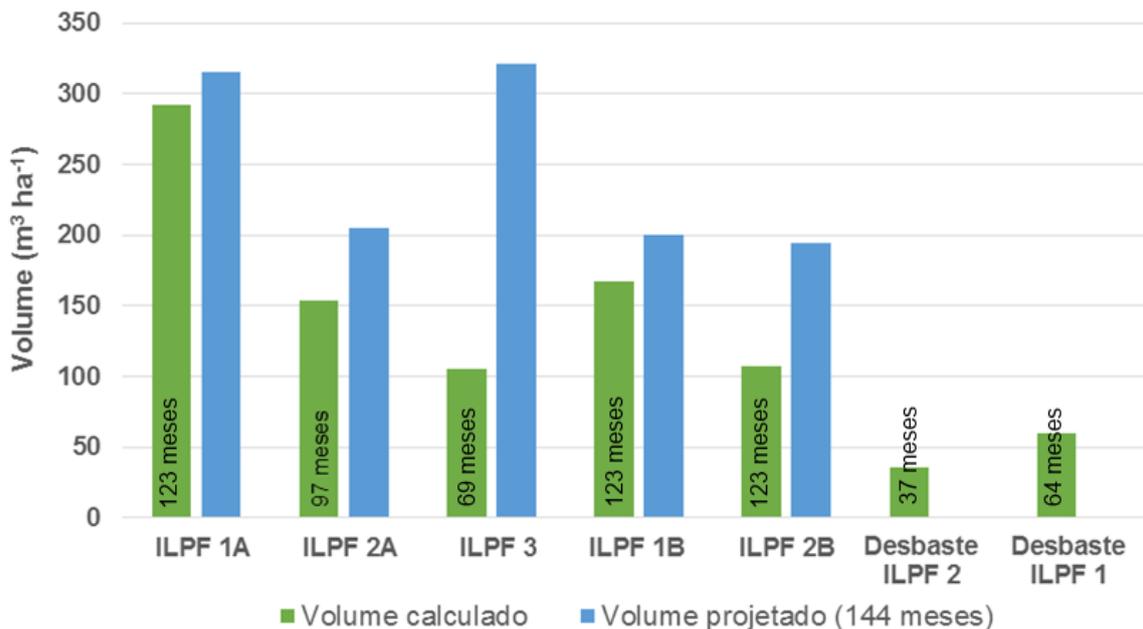


Figura 12.3. Volume da madeira calculado com indicativo da idade das árvores (meses após o plantio) em 2019, e volume de madeira projetado para 144 meses após o plantio (12 anos), para as áreas de integração lavoura-pecuária-floresta (ILPF) plantadas em 2009 (ILPF 1), 2011 (ILPF 2) e 2013 (ILPF 3). Sete Lagoas, MG.

ILPF 1A, ILPF 2A e ILPF 3: original com 333 árvores por hectare,
 ILPF1B e ILPF 2B: original que sofreu desbaste para 166 árvores por hectare,
 Desbaste ILPF 1 e Desbaste ILPF 2: volume removido no desbaste.

Para o cálculo da quantidade de carbono na madeira (C) estocado na biomassa (fuste) do eucalipto foi utilizada a fórmula: $C \text{ (Mg)} = \text{Volume} \times \text{Densidade básica} \times \text{Teor de carbono}$, utilizando o volume em m^3 de madeira, a densidade básica média da madeira de $0,35 \text{ Mg m}^{-3}$ e o teor médio de 49% de carbono (Oliveira et al., 2018). Assim, um metro cúbico de madeira tem 0,17 Mg de C. Considerando que 1,0 t de C equivale a 3,6667 t de CO_2eq , estima-se uma fixação de 0,628 Mg de $\text{CO}_2\text{eq m}^{-3}$ de madeira. Dióxido de carbono equivalente (CO_2eq) é uma medida utilizada para equalizar as emissões de vários GEE com base na importância relativa de cada gás, em relação ao CO_2 (Myhre et al., 2013). As Tabelas 12.1 e 12.2 apresentam a quantidade de CO_2eq fixado por hectare para os sistemas ILPF estudados.

Tabela 12.1. Estande, volume de madeira por hectare projetado para 144 meses após o plantio (12 anos), quantidade de CO₂eq fixado por metro cúbico de madeira e por hectare, Sete Lagoas, MG.

Área	Estande (árvores por hectare)	Volume (m ³ ha ⁻¹)	CO ₂ eq (Mg m ⁻³)	CO ₂ eq (Mg ha ⁻¹)
ILPF 1A ⁽¹⁾	333	315,6	0,628	198,1
ILPF 2A ⁽¹⁾	333	204,8	0,628	128,6
ILPF 3 ⁽¹⁾	333	321,1	0,628	201,6
ILPF 1B ⁽²⁾	166	200,5	0,628	125,9
ILPF 2B ⁽²⁾	166	194,6	0,628	122,2

⁽¹⁾ ILPF original com 333 árvores por hectare,

⁽²⁾ ILPF original com 333 árvores por hectare que sofreram desbaste para 166 árvores por hectare.

Tabela 12.2. Volume de madeira removido no desbaste dos sistemas ILPF 1 e ILPF 2 por hectare e a quantidade de CO₂eq fixado por metro cúbico de madeira e por hectare. Sete Lagoas, MG.

Área	Volume cortado (m ³ ha ⁻¹)	CO ₂ eq (Mg m ⁻³)	CO ₂ eq (Mg ha ⁻¹)
ILPF 1	60,1	0,628	37,7
ILPF 2	35,6	0,628	22,3

As emissões de CO₂eq oriundo do metano entérico dos animais foram estimadas utilizando os parâmetros: uma unidade animal (1 UA) se refere a um animal de 450 kg de peso vivo; 1 UA emite 66 kg de CH₄ por animal por ano (Embrapa, 2018; Alves et al., 2015); o CH₄ apresenta o potencial de aquecimento igual a 28 vezes o potencial do CO₂ (Myhre et al., 2013). Assim, 1 UA emite 1,85 Mg CO₂eq por ano. Com base nesses coeficientes, foi calculado o potencial bruto de neutralização do metano emitido pelos bovinos pelo carbono sequestrado pelas árvores, nas ILPF estudadas (Tabela 12.3).

Tabela 12.3. Estimativas do volume anual de madeira, potencial de fixação anual de CO₂eq e potencial de neutralização da emissão de metano entérico de bovinos nos sistemas de integração lavoura-pecuária-floresta avaliados. Sete Lagoas, MG.

Área	Volume (m ³ ha ⁻¹)	Volume ⁽¹⁾ (m ³ ha ⁻¹ por ano)	CO ₂ eq fixado ⁽²⁾ (Mg ha ⁻¹ por ano)	Potencial anual de neutralização ⁽³⁾ (UA por hectare)
ILPF 1A	315,6	26,3	16,5	8,9
ILPF 2A	204,8	17,1	10,7	5,8
ILPF 3	321,1	26,8	16,8	9,0
ILPF 1B	200,5	16,7	10,5	5,6
ILPF 2B	194,6	16,2	10,2	5,5
Desbaste ILPF 1	60,1	12,02	7,5	4,0
Desbaste ILPF 2	35,6	8,9	5,6	3,0

(1) Volume dividido por 12 anos.

(2) Mg CO₂ eq fixado = Volume x (Dens. básica: 0,35) x (%C: 0,49) x (CO₂: 3,66).

(3) 1 UA emite 1,85 Mg CO₂eq ano⁻¹.

Considerando o período de 12 anos de crescimento das árvores, os sistemas que permaneceram com estande de 333 árvores por hectare apontaram o potencial bruto de neutralização da emissão de CH₄ dos animais variando de 5,8 a 9,0 UA por hectare por ano. Para os sistemas que sofreram desbaste e seguiram com estande de 166 árvores por hectare, os resultados foram de 8,6 a 9,6 UA por hectare por ano (Tabela 12.3).

Contudo, no cálculo acima, considerou-se o carbono imobilizado em todo o tronco da árvore, mas, para que o estoque de carbono nos produtos oriundos do componente arbóreo seja garantido, as árvores devem ser manejadas de forma que parte da madeira produzida no sistema seja destinada para produtos de maior valor agregado, como madeira serrada ou roliça, que têm uso em produtos de maior vida útil e, portanto, com maior tempo de imobilização do carbono, como móveis ou materiais para construção civil. Neste caso, adotaram-se os parâmetros estabelecidos pelo protocolo “Carne Carbono Neutro” da Embrapa (Alves et al., 2015).

Para isso, considera-se que a madeira destinada para serraria deve ter diâmetro mínimo de 18 cm para obtenção das peças de madeira serrada, e assume-se que apenas 25% do volume de madeira apto para serraria deve ser

utilizado no cálculo da neutralização de GEEs. Para a estimativa do estoque de madeira apta para serraria foram consideradas toras de 3,1 m de comprimento, das árvores que foram projetadas para a idade de 12 anos. O modelo utilizado foi o desdobro longitudinal, com costaneira de 30 graus, e espessura da serra de 5 mm, implementado na aplicação CalcMadeira®, mencionado anteriormente. A Tabela 12.4 apresenta o potencial anual de neutralização da emissão de metano entérico nos sistemas ILPF estudados, representado pelo volume da madeira destinada para serraria (diâmetro ≥ 18 cm) aos 144 meses dividido por 12. Nesse cálculo, não foram consideradas as madeiras cortadas durante o desbaste no ILPF 1 e ILPF 2, em função do diâmetro reduzido das árvores.

Tabela 12.4. Estimativas da quantidade de madeira para serraria, volume útil de madeira serrada, volume útil anual, potencial de fixação de CO₂eq pela madeira do volume útil anual e potencial balanço de neutralização da emissão de metano entérico de bovinos nos sistemas integração lavoura-pecuária-floresta avaliados, aos 12 anos. Sete Lagoas, MG.

Área	Madeira para serraria ⁽¹⁾ (m ³ ha ⁻¹)	Volume útil serrado ⁽²⁾ (m ³ ha ⁻¹)	Volume anual ⁽³⁾ (m ³ ha ⁻¹)	CO ₂ eq fixado ⁽⁴⁾ (Mg ha ⁻¹)	Potencial anual de neutralização ⁽⁵⁾ (UA ha ⁻¹)
ILPF 1A	251,3	62,8	5,24	3,29	1,8
ILPF 2A	141,5	35,4	2,95	1,85	1,0
ILPF 3	270,5	67,6	5,64	3,54	1,9
ILPF 1B	190,5	47,6	3,97	2,49	1,4
ILPF 2B	182,0	45,5	3,79	2,38	1,3

⁽¹⁾ Estoque de madeira com diâmetro mínimo de 18 cm.

⁽²⁾ 25% do volume apto para ser serrado.

⁽³⁾ Volume útil dividido por 12 anos.

⁽⁴⁾ Mg CO₂ eq fixado = Volume x (Dens. básica: 0,35) x (%C: 0,49) x (CO₂: 3,66). ⁽⁵⁾ 1 UA emite 1,85 Mg CO₂eq ano⁻¹.

Com os parâmetros estabelecidos para garantia do carbono fixado, estimou-se que, ao final de 12 anos, os sistemas que permaneceram com maior quantidade de árvores (ILPF 1A, ILPF 2A e ILPF 3) variaram a capacidade de neutralização da emissão de CH₄ dos bovinos pelo carbono fixado, variando entre 1,0 e 1,9 UA por hectare por ano. Para os sistemas que sofreram desbaste, o potencial de neutralização variou de 1,3 a 1,4 UA por hectare por ano (Tabela 12.4). De acordo com Batista et al. (2020), a taxa de lotação das pastagens de Minas Gerais foi estimada em 0,72 UA por hectare, o que tornaria, neste caso, a

mitigação estimada da emissão de metano entérico positiva nesses sistemas estudados, restando ainda um saldo de estoque de carbono.

Com os dados apresentados, pode-se concluir que, considerando somente o componente arbóreo, os sistemas ILPF avaliados foram capazes de sequestrar carbono em quantidade para neutralização do metano entérico emitido de animais em pastagens com taxa de lotação acima da média do estado de Minas Gerais, mesmo considerando a utilização de apenas 25% do volume útil da madeira após o desdobro em serraria.

Para este estudo foi considerado o potencial de sequestro de carbono nas árvores para a neutralização das emissões de metano entérico de bovinos, entretanto, para um balanço completo, é necessário considerar as emissões de GEE das excretas dos animais, N₂O emitido pelo solo sob pastagem e grãos e o sequestro de carbono pelo solo (Souza et al., 2019).

Apesar de não computado o balanço completo, pode-se perceber que sistemas ILPF que dispõem do componente florestal são estratégias de produção agropecuária com grande potencial de redução de GEE, potencializando a competitividade do setor diante das exigências de mercado. A integração lavoura-pecuária-floresta consiste em uma alternativa viável do ponto de vista ambiental para tornar a pecuária brasileira neutra quanto à emissão de GEE (Assad et al., 2019).

Avaliação da emissão de metano em bovinos de corte em sistema de integração lavoura-pecuária

A produção de carne bovina em sistemas de confinamento geralmente oferece requisitos de terra e emissões de gases de efeito estufa (GEE) por quilograma de carne produzida substancialmente mais baixos do que os sistemas tradicionais, conhecidos por sistemas extensivos. No entanto, as emissões de GEE em sistemas de pastejo podem ser consideravelmente menores do que se pensava anteriormente, uma vez que a utilização de pastagens rotacionadas, mais produtivas e de melhor qualidade, como o que ocorre em sistemas de integração lavoura-pecuária (ILP), tem o potencial de aumentar o sequestro de carbono no solo, anulando assim as emissões pelos animais (Dick et al., 2015; Wang et al., 2015).

Sistemas de produção de bovinos de corte que associam o pastejo de forragens manejadas intensivamente, na fase inicial de crescimento dos animais, com o fornecimento de dietas concentradas na fase de terminação parecem ser uma alternativa para incrementar a produtividade do sistema, além de contribuir para a redução da emissão de GEE por quilo de carcaça produzida. Além disso, outra alternativa que tem sido frequentemente utilizada para aumentar o ganho de peso de animais é o melhoramento genético em bovinos de corte. O cruzamento com animais de origem taurina pode melhorar as taxas de produção do gado de raça pura, além de ter o potencial de reduzir as emissões de metano por quilo de carne produzida.

Nos últimos anos, vários estudos têm sido realizados no sistema ILP da Embrapa Milho e Sorgo, com o objetivo de avaliar o desempenho animal de duas composições de raças em um sistema brasileiro de produção de bovinos de corte, em que a recria é realizada em pastagem em sistema ILP e a terminação em confinamento. Recentemente, foi incorporada nesses estudos a mensuração da produção entérica de metano dos animais, projeto realizado em parceria com a Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG) nos anos 2016 e 2017.

No início da estação chuvosa, novilhos com aproximadamente 10 meses de idade foram divididos em dois grupos, de acordo com a raça: Nelore e mestiços Angus x Nelore (cruzados). Na recria, os animais pastejaram uma gleba de 5,5 ha de capim Mombaça, que foi subdividida em cinco piquetes de aproximadamente 1,1 ha cada, usados como sistema de pastejo rotativo com 7 dias de pastejo e 28 dias de descanso. Posteriormente, estes animais foram confinados, com fornecimento de dieta com relação concentrado: volumoso de 65:35.

As emissões entéricas de metano (CH_4) foram medidas pela técnica do gás traçador hexafluoreto de enxofre (SF_6), conforme relatado por Johnson et al. (1994). Mais detalhes podem ser vistos em Maciel et al. (2019). A Figura 12.4 apresenta o equipamento utilizado para coleta de metano entérico nos animais.

Foto: Sérgio Teixeira Guimarães



Foto: Sérgio Teixeira Guimarães



Foto: Isabella Cristina de Faria Maciel

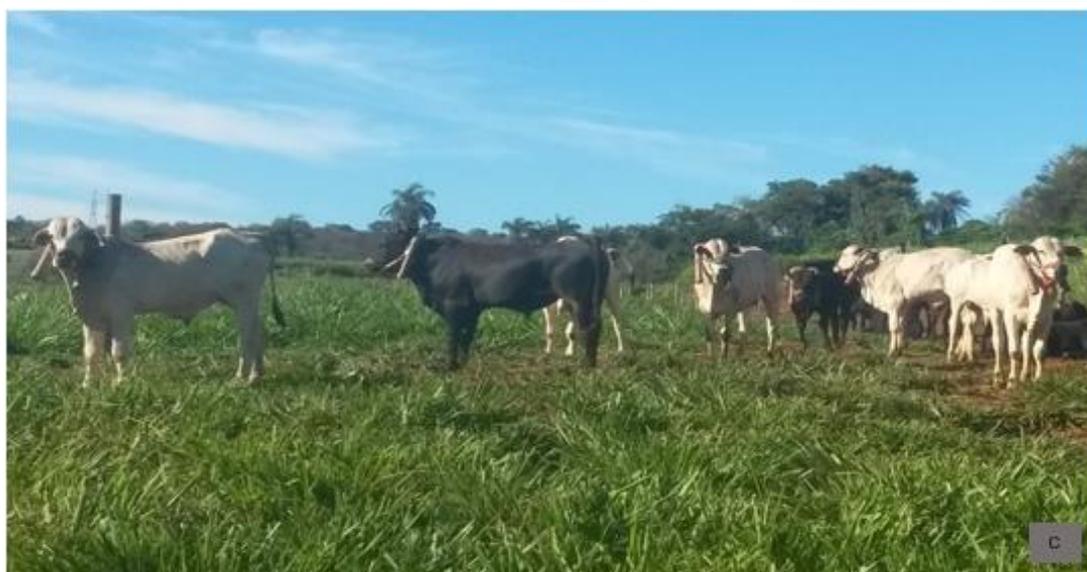


Figura 12.4. Detalhe do equipamento utilizado para coleta de metano entérico nos bovinos (A e B) em confinamento e (C) em pasto em Sete Lagoas, MG.

A alta disponibilidade de forragem e a elevada proteína bruta (PB) durante o período experimental podem ser resultado dos níveis satisfatórios de nutrientes (P, K, Ca, Mg, S) no solo resultantes da Integração lavoura-pecuária associados à fertilização nitrogenada nas pastagens. Os dados de produção forrageira obtidos neste estudo foram aproximadamente duas vezes maiores do que os observados em anos anteriores (Costa et al., 2017). Ao longo dos anos, o sistema ILP da Embrapa tem mantido uma taxa de lotação cada vez maior permitindo aumentar o número de animais na mesma área (Costa et al., 2017). A maior taxa de lotação contribuiu para uma utilização mais eficiente da forragem, resultando em melhor qualidade de forragem durante todo o período de pastejo.

Os dados de desempenho mostraram superioridade dos animais cruzados em relação ao Nelore, tanto na recria em pastagens como na fase final do confinamento. O ganho total e o ganho médio diário (GMD) no período de pastejo foram maiores para os cruzados e, conseqüentemente, esses animais apresentaram maior peso ao final deste período. Embora o setor de bovinos de corte no Brasil ainda seja caracterizado por regiões com baixos índices zootécnicos (Brasil, 2015), os sistemas ILP poderiam melhorar a produção animal e reduzir os impactos ambientais do gado nos sistemas de produção de carne em pasto em regiões tropicais.

No período de confinamento, foi observado o mesmo padrão de resultado, no qual os animais cruzados apresentaram maior GMD e melhor conversão alimentar comparados aos Nelores. Os animais cruzados atingiram o ganho de peso no confinamento desejado (200 kg) (Maciel et al., 2019) em 111 dias e 105 dias no primeiro ano e no segundo ano, respectivamente. Os animais Nelore, embora tenham permanecido no confinamento por mais tempo (138 e 127 dias no confinamento no primeiro ano e no segundo ano, respectivamente), apresentaram menor ganho de peso total (172 kg) em comparação aos cruzados.

Maior peso de carcaça foi observado nos animais cruzados quando comparados ao Nelore, e as diferenças observadas para o peso da carcaça estão relacionadas às diferenças no peso ao abate dos animais. O GMD de carcaça no confinamento foi 35% maior para os cruzados do que nos Nelores. Esse aumento observado na produtividade resulta em menos animais acabados necessários para produzir uma determinada quantidade de carne, o que pode contribuir para reduzir o impacto ambiental da produção de carne bovina. Durante a recria e a

engorda, os animais cruzados apresentaram melhor desempenho (ganho total de 383 kg versus 306 kg para os animais Nelore), embora as taxas de crescimento alcançadas pelas duas raças tenham sido satisfatórias.

A produção de metano (g dia^{-1} e kg por ano) foi menor para os animais Nelore do que para os cruzados tanto na recria em pasto quanto no confinamento. Considerando todo o período, os animais Nelore emitiram 19% menos metano do que os cruzados no pastejo, mas não foram observadas diferenças entre as composições da raça no confinamento. Apesar de os animais cruzados apresentarem maior emissão de metano diária, a emissão total de metano durante o confinamento foi a mesma para as duas composições de raças, porque o período que os animais cruzados permaneceram em confinamento foi menor do que os animais Nelore.

Verificou-se que não houve diferença no consumo de matéria seca (CMS) entre as raças na recria (5,9 kg versus 6,23 kg de MS por dia para Nelores e cruzados, respectivamente), porém no confinamento os animais cruzados apresentaram maior CMS ($12,4 \text{ kg dia}^{-1}$) do que os animais Nelore ($9,3 \text{ kg dia}^{-1}$). Apesar da diferença de consumo, a raça não influenciou o rendimento de metano (g CH_4 por unidade de CMS) em ambos os sistemas. As emissões de CH_4 foram 14,3 e 16,7 g por kg CMS para Nelore e cruzados no pasto e 18,5 e 17,8 para Nelore e cruzados no confinamento.

Em relação ao metano emitido por unidade de GMD, não foi observada diferença entre as duas raças no pasto (119,5 g e 140,0 g de CH_4 por quilo de GMD para Nelore e cruzados, respectivamente). No entanto, no confinamento, a produção de metano por GMD de peso vivo ($97,5 \text{ g CH}_4$ versus $122,7 \text{ g CH}_4$) ou por GMD de carcaça ($174,5 \text{ g CH}_4$ versus $192,3 \text{ g CH}_4$) foi significativamente menor nos animais cruzados do que nos Nelore.

Pesquisas anteriores se concentraram no uso de confinamentos como estratégia para reduzir as emissões de metano por quilo de carne produzida em comparação com o sistema de pastoreio. No entanto, a maioria dos estudos avaliou sistema de pastejo contínuo, ou não considerou o sequestro de carbono pelas plantas (Stanley et al., 2018). Além disso, nesses estudos, o GMD é geralmente abaixo do que pode ser alcançado em sistemas de pastagem intensiva bem gerenciados. Uma redução substancial nas emissões líquidas de GEE pode ocorrer em sistemas de pastagem intensivas, mesmo quando exigindo

o dobro da terra dos sistemas de confinamento, como consequência do aumento do desempenho animal e do sequestro de carbono (Latawiec et al., 2014; Stanley et al., 2018). Assim, sistemas de produção onde os animais são rotacionados nas pastagens melhoram a qualidade e a produção da forragem, além de ser potencialmente uma boa opção para reduzir as emissões de GEE.

Os resultados sugerem que a maior produção diária de metano de animais cruzados é compensada pelo melhor desempenho, resultando em menos metano por quilo de carne produzida, quando utilizado sistema intensivo de produção em condições climáticas tropicais.

Identificar raças eficientes de gado e adotar sistemas de produção apropriados são grandes desafios para a produção de carne em todo o globo. Além de reduzir as emissões entéricas de CH₄ por quilo de carne produzida, outra vantagem da intensificação está associada à redução da área necessária para produzir a mesma quantidade de produto. Isso tem o potencial para diminuir a área degradada e, além disso, contribuir para a não abertura de novas áreas e mitigar o desmatamento futuro. A intensificação dos sistemas de produção de gado de corte leva a uma redução nas emissões de GEE por unidade de produto, e, teoricamente, maiores reduções podem ser possíveis se animais de melhor desempenho forem utilizados, como confirmado neste estudo pelo cruzamento entre as raças Angus e Nelore.

Os sistemas integrados podem permitir altos ganhos por unidade de terra, e o acabamento de animais no confinamento contribui para o aumento da produtividade de todo o sistema. Portanto, associar esses dois sistemas para criação de gado de corte em condições tropicais parece ser uma opção alinhada com a nova política de redução de GEE.

Avaliação da emissão de óxido nitroso e metano pelas excretas de bovinos de corte em confinamento complementar ao sistema de integração lavoura-pecuária

As excretas de bovinos também são fontes de emissão de GEE para a atmosfera, principalmente o óxido nitroso (N₂O) e o metano (CH₄). Alguns estudos quantificaram a emissão de N₂O pelos excrementos de bovinos de corte em pastagens, mas pouco se sabe sobre essas emissões em confinamento, principalmente em condições tropicais (Sordi et al., 2014; Lessa et al., 2014).

As emissões de GEE do solo pela deposição de excretas dos animais podem ser influenciadas por diferentes fatores, como clima, espécies, tipo de alimento e o sistema de manejo (Broucek, 2018), e alguns aspectos presentes durante o confinamento podem aumentar a emissão de N_2O , como alta densidade animal, compactação do solo e ausência de vegetação (Van Groenigen et al., 2005).

Estudos apontam que a emissão de N_2O nos confinamentos é pequena (Bai et al., 2015), mas a produção de bovino de corte em confinamento vem se expandindo no Brasil, e maior atenção deve ser dada à emissão de GEE pela deposição de urina e fezes dos animais. Segundo o Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC, *Intergovernmental Panel on Climate Change*) (Eggleston et al., 2006), o fator de emissão para N_2O (quantidade de N perdido como N_2O) é de 2% para as excretas de animais em pastagens ou em confinamento, sem distinção entre urina e fezes. No entanto, estudos mostram que existe diferença para o fator de emissão entre urina e fezes depositadas (Lessa et al., 2014; Sordi et al., 2014). A expectativa é que a emissão de GEE seja menor para as condições de confinamento no Brasil, uma vez que os animais são alimentados com dieta balanceada, o que pode reduzir as perdas de nitrogênio, além dos confinamentos serem realizados principalmente na época seca.

Nesse sentido, foram conduzidos estudos na Unidade de Referência Tecnológica e Pesquisa (URTP) em integração lavoura-pecuária (ILP) da Embrapa Milho e Sorgo, nos anos de 2016/2017 e 2018/2019, para avaliar as emissões de N_2O e CH_4 e o fator de emissão associado (FE) para fezes e urina de bovinos de corte em confinamento, depositadas na superfície de currais. Para mais detalhes sobre a execução do experimento de GEE das excretas de bovinos, ver Maciel et al. (2021).

Os resultados do estudo mostraram que os fluxos de N_2O foram predominantemente baixos para ambos os tipos de excretas, por causa das condições de seca durante todo o período de monitoramento, exceção apenas para os primeiros dias após a aplicação das excretas (DAA) no solo e os dias após a precipitação ocorrida em 67 DAA a 70 DAA. Na média de todo o período de monitoramento, o fluxo de N_2O foi maior para urina do que para fezes (249,4 e 297,3 $\mu g N m^{-2} h^{-1}$ para fezes e urina, respectivamente). As emissões de

CH₄ do solo foram frequentemente próximas de zero ou negativas na maior parte do tempo, exceção apenas em poucos dias em que fluxos positivos foram observados. Todos os tratamentos foram um dissipador de CH₄ com uma média dos 92 DAA. Os fluxos médios para fezes e urina foram de -8,9 e -15,4 µg CH₄-C m⁻² h⁻¹, respectivamente.

Ao longo dos 92 dias de monitoramento dos GEE, três períodos distintos puderam ser observados com base nas tendências de fluxo de N₂O e CH₄. Um primeiro, denominado de “período indutivo de excreta”, compreendeu os primeiros 10 DAA, durante os quais houve uma elevação do fluxo de N₂O induzido pela urina e produção de CH₄ pelas fezes. As mudanças observadas nos fluxos nesse período estavam mais associadas aos próprios excrementos do que ao meio ambiente. O período entre 13 e 56 DAA, denominado de “período de seca”, foi o de baixos fluxos tanto para N₂O como para CH₄. Um terceiro período, denominado “período de indução pós-chuva”, foi principalmente associado aos efeitos da chuva em ambos os fluxos de gás que duraram de 69 DAA até o final do período de monitoramento.

Os fatores de emissão (FE) foram calculados para as excretas, e observou-se que o FE do N₂O da urina foi significativamente maior do que das fezes (2,83% vs. 0,32%, respectivamente, $P < 0,001$), resultando em um FE combinado de 1,83%, que é 8,5% menor do que o FE proposto pelo IPCC.

Os dados indicaram que as excretas de bovinos são de fato fontes importantes de emissões diretas de N₂O quando depositadas em superfície de confinamento na estação seca em regiões tropicais. A urina resulta em uma emissão imediata de N₂O, e a chuva ocasional tem potencial para aumentar drasticamente a emissão de GEE. Por outro lado, as emissões de CH₄ parecem ter menor importância quando prevalecem as condições de seca, mas o efeito da chuva nas emissões desse gás também pode ser relevante. A partir das emissões diretas de N₂O, a desagregação entre urina e fezes deve ser considerada para o desenvolvimento de FE para fins de inventário de emissão de GEE.

Considerações finais

O potencial de mitigação e de neutralização de gases de efeito estufa é um dos benefícios oriundos da utilização de sistemas ILPF e ILP, já reconhecidos pela ciência no Brasil. Os sistemas integrados manejados com eficiência podem

umentar o desempenho animal e conseqüentemente reduzir as emissões líquidas de GEE por quilo de carcaça produzida, o que contribuirá para diminuir a contribuição do setor agropecuário para as mudanças climáticas. A estimativa do balanço de carbono em sistemas ILPF, notadamente aqueles com componente florestal, promove agregação de valor à produção, adicionando competitividade ao setor frente às demandas de mercado, e está alinhada com a política brasileira de redução de GEE no País.

Referências

- ALBUQUERQUE, I.; ALENCAR, A.; ANGELO, C.; AZEVEDO, T.; BARCELLOS, F.; COLUNA, I.; COSTA JÚNIOR, C.; CREMER, M.; PIATTO, M.; POTENZA, R.; QUINTANA, G.; SHIMBO, J.; TSAI, D.; ZIMBRES, B. **Análise das emissões brasileiras de gases de efeito estufa e suas implicações para as metas do clima do Brasil 1970-2019**. São Paulo: Observatório do Clima, 2020. 41 p. Disponível em: https://seeg-br.s3.amazonaws.com/Documentos%20Analiticos/SEEG_8/SEEG8_DOC_ANALITICO_SINTESE_1990-2019.pdf. Acesso em: 28 jan. 2021.
- ALVES, F. V.; ALMEIDA, R. G.; LAURA, V. A. **Carne Carbono Neutro: um novo conceito para carne sustentável produzida nos trópicos**. Campo Grande: Embrapa Gado de Corte, 2015. 32 p. (Embrapa Gado de Corte. Documentos, 210).
- ASSAD, E. D.; MARTINS, S. C.; CORDEIRO, L. A. M.; EVANGELISTA, B. A. Sequestro de carbono e mitigação de emissões de gases de efeito estufa pela adoção de sistemas integrados. In: BUNGENSTAB, D. J.; ALMEIDA, R. G. de; LAURA, V. A.; BALBINO, L. C.; FERREIRA, A. D. (ed.). **ILPF: inovação com integração de lavoura, pecuária e floresta**. Brasília, DF: Embrapa, 2019. p. 153-167.
- BAI, M.; FLESCHE, T. K.; MCGINN, S. M.; CHEN, D. A snapshot of greenhouse gas emissions from a cattle feedlot. **Journal of Environmental Quality**, v. 44, n. 6, p. 1974-1978, 2015. DOI: <https://doi.org/10.2134/jeq2015.06.0278>.
- BATISTA, E. L. S.; SOARES-FILHO, B. S.; RAJÃO, R. G.; BARBOSA, F. B.; COSTA, M. A.; NUNES, F. S. M.; DAVIS, J. L.; OLIVEIRA, A. R.; MACHADO, L. A.; RODRIGUES, H. O.; LEITÃO, R. F. M.; FIGUEIRA, D. S.; DIAS NETO, F. P.; RIBEIRO, F. S. L.; ASSIS, D. C. **Cenários para a intensificação da bovinocultura de corte brasileira**. Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais, 2020. 65 p.
- BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Plano ABC: agricultura de baixa emissão de carbono**. Disponível em: <http://www.agricultura.gov.br/assuntos/sustentabilidade/plano-abc>. Acesso em: 20 jul. 2020.
- BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Bovinos e Bubalinos**. Brasília, DF, 2015. Disponível em: <http://www.agricultura.gov.br/animal/especies/bovinos-e-bubalinos>. Acesso em: 20 jul. 2020.
- BROUCEK, J. Nitrous oxide production in ruminants-a review. **Animal Science Papers and Reports**, v. 36, n. 1, p. 5-19, 2018.
- COSTA, P. M.; BARBOSA, F. A.; ALVARENGA, R. C.; GUIMARÃES, S. T.; LAMPEÃO, Â. A.; WINKELSTRÖTER, L. K.; MACIEL, I. C. D. F. Performance of crossbred steers post-weaned in an integrated crop-livestock system and finished in a feedlot. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 52, n. 5, p. 355-365, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2017000500009>.

COSTA, T. C. C.; CAMPANHA, M. M.; FRANÇA, L. F. M. CalcMadeira: sistema para estimativa de peças de madeira roliça e serrada. In: OLIVEIRA, E. B.; PINTO JÚNIOR, J. E. (ed.). **O eucalipto e a Embrapa: 40 anos de pesquisa e desenvolvimento**. Brasília, DF: Embrapa, 2021. p. 885-905.

DICK, M.; SILVA, M. A.; DEWEA, H. Life cycle assessment of beef cattle production in two typical grassland systems of southern Brazil. **Journal of Cleaner Production**, v. 96, p. 426-434, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.01.080>.

EGGLESTON, H. S.; BUENDIA, L.; MIWA, K.; NGARA, T.; TANABE, K. (ed.). **IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories**. Kanagawa: Institute for Global Environmental Strategies, 2006.

EMBRAPA. **Rede Pecus**. São Carlos: Embrapa Pecuária Sudeste, 2018. Disponível em: <http://www.cppse.embrapa.br/redepecus>. Acesso em: 13 out. 2018.

EMISSÕES do setor de agropecuária: documento de análise. 2018. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/327120508_SEEG_-_Relatorio_Analitico_Agropecuaria_-_2018/link/5b7b12e04585151fd123c43e/download. Acesso em: 20 jul. 2020.

JOHNSON, K. A.; HUHLER, M. T.; WESTBERG, H. H.; LAMB, B. K.; ZIMMERMAN, P. Measurement of methane emissions from ruminant livestock using a SF₆ tracer technique. **Environmental Science and Technology**, v. 28, n. 2, p. 359-362, 1994. DOI: <https://doi.org/10.1021/es00051a025>.

LATAWIEK, A. E.; STRASSBURG, B. B. N.; VALENTIM, J. F.; RAMOS, F.; ALVES-PINTO, H. N. Intensification of cattle ranching production systems: socioeconomic and environmental synergies and risks in Brazil. **Animal**, v. 8, n. 8, p. 1255-1263, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1017/S1751731114001566> PMID: 26263189.

LESSA, A. C. R.; MADARI, B. E.; PAREDES, D. S.; BODDEY, R. M.; URQUIAGA, S.; JANTALIA, C. P.; ALVES, B. J. R. Bovine urine and dung deposited on Brazilian savannah pastures contribute differently to direct and indirect soil nitrous oxide emissions. **Agriculture, Ecosystem and Environment**, v. 190, p. 104-111, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.agee.2014.01.010>.

MACIEL, I. C. F.; BARBOSA, F. A.; TOMICH, T. R.; RIBEIRO, L. G. P.; ALVARENGA, R. C.; LOPES, L. S.; LANA, A. M. Q. Could the breed composition improve performance and change the enteric methane emissions from beef cattle in a tropical intensive production system? **PLoS ONE**, v. 14, n. 7, e0220247, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0220247>.

MACIEL, I. C. F.; BARBOSA, F. A.; ALVES, B. J.; ALVARENGA, R. C.; TOMICH, T. R.; CAMPANHA, M. M.; ROWNTREE, J. E.; LANA, A. M. Q. Nitrous oxide and methane emissions from beef cattle excreta deposited on feedlot pen surface in tropical conditions. **Agricultural Systems**, v. 187, 102995, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2020.102995>.

MANZATTO, C. V.; SKORUPA, L. A.; ARAÚJO, L. S. de; VICENTE, L. E.; ASSAD, E. D. Estimativas de redução de emissões de gases de efeito estufa pela adoção de sistemas ILPF no Brasil. In: SKORUPA, L. A.; MANZATTO, C. V. (ed.). **Sistemas de integração lavoura-pecuária-floresta no Brasil: estratégias regionais de transferência de tecnologia, avaliação da adoção e de impactos**. Brasília: DF, Embrapa, 2019. p. 400-424.

MYHRE, G.; SHINDELL, D.; BRÉON, F. M.; COLLINS, W.; FUGLESTVEDT, J.; HUANG, J.; KOCH, D.; LAMARQUE, J. F.; LEE, D.; MENDOZA, B.; NAKAJIMA, T.; ROBOCK, A.; STEPHENS, G.; TAKEMURA, T.; ZHANG, H. Anthropogenic and natural radiative forcing. In: STOCKER, T. F.; QIN, D.; PLATTNER, G. K.; TIGNOR, M.; ALLEN, S. K.; BOSCHUNG, J.; NAUELS, A.; XIA, Y.; BEX, V.; MIDGLEY, P. M. (ed.). **Climate Change 2013: the physical science basis**. Cambridge: Cambridge University Press, 2013. p. 659-740. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.

OLIVEIRA, E. B. de; PORFIRIO-DA-SILVA, V.; RIBASKI, J. SisILPF: software para simulação do crescimento, produção, metano e manejo do componente florestal em sistemas de integração lavoura-pecuária-floresta. In: ENCONTRO BRASILEIRO DE SILVICULTURA, 4., 2018, Ribeirão Preto. **Anais**. Brasília, DF: Embrapa; Colombo: Embrapa Florestas, 2018. p. 127-133.

SCHUMACHER, F. X.; HALL, F. S. Logarithmic expression of timber-tree volume. **Journal of Agricultural Research**, v. 47, n. 9, p. 719-734, 1933.

SORDI, A.; DIECKOW, J.; BAYER, C.; ALBURQUERQUE, M. A.; PIVA, J. T.; ZANATTA, J. A.; TOMAZI, M.; ROSA, C. M.; MORAES, A. Nitrous oxide emission factors for urine and dung patches in a subtropical Brazilian pastureland. **Agriculture, Ecosystem and Environment**, v. 190, p. 94-103, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.agee.2013.09.004>.

SOUZA, K. W. de; PULROLNIK, K.; GUIMARÃES JÚNIOR, R.; MARCHÃO, R. L.; VILELA, L.; CARVALHO, A. M. de; MACIEL, G. A.; MORAES NETO, S. P. de; OLIVEIRA, A. D. de. **Integração lavoura-pecuária-floresta como estratégia para compensação das emissões de gases de efeito estufa**. Planaltina, DF: Embrapa Cerrados, 2019. 12 p.

STANLEY, P. L.; ROWNTREE, J. E.; BEEDE, D. K.; DeLONGE, M. S.; HAMM, M. W. Impacts of soil carbon sequestration on life cycle greenhouse gas emissions in midwestern USA beef finishing systems. **Agricultural Systems**, v. 162, p. 249-258, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2018.02.003>.

VAN GROENIGEN, J. W.; KUIKMAN, P. J.; DE GROOT, W. J. M.; VELTHOF, G. L. Nitrous oxide emission from urine-treated soil as influenced by urine composition and soil physical conditions. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 37, n. 3, p. 463-473, 2005. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2004.08.009>.

WANG, T.; TEAGUE, W. R.; PARK, S. C.; BEVERS, S. GHG mitigation potential of different grazing strategies in the United States southern great plains. **Sustainability**, v. 7, n. 10, p. 13500-13521, 2015. DOI: <https://doi.org/10.3390/su71013500>.

WENDLING, W. T.; EMERENCIANO, D. B.; HOSOKAWA, R. T. Ajuste da função de distribuição diamétrica Weibull por planilha eletrônica. **Floresta**, v. 41, n. 2, p. 205-220, abr./jun. 2011.