



UFG

UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS (UFG)
ESCOLA DE AGRONOMIA (EA)
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONEGÓCIO - PPGAGRO

MATHEUS MENTONE DE BRITTO SIQUEIRA

**Compensação da emissão de gases de efeito estufa na produção
leiteira: o caso da integração pecuária-floresta na fazenda Santa
Bárbara em Quirinópolis - GO**

GOIÂNIA
2025



UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS
ESCOLA DE AGRONOMIA

TERMO DE CIÊNCIA E DE AUTORIZAÇÃO (TECA) PARA DISPONIBILIZAR VERSÕES ELETRÔNICAS DE TESES E DISSERTAÇÕES NA BIBLIOTECA DIGITAL DA UFG

Na qualidade de titular dos direitos de autor, autorizo a Universidade Federal de Goiás (UFG) a disponibilizar, gratuitamente, por meio da Biblioteca Digital de Teses e Dissertações (BDTD/UFG), regulamentada pela Resolução CEPEC nº 832/2007, sem ressarcimento dos direitos autorais, de acordo com a [Lei 9.610/98](#), o documento conforme permissões assinaladas abaixo, para fins de leitura, impressão e/ou download, a título de divulgação da produção científica brasileira, a partir desta data.

O conteúdo das Teses e Dissertações disponibilizado na BDTD/UFG é de responsabilidade exclusiva do autor. Ao encaminhar o produto final, o autor(a) e o(a) orientador(a) firmam o compromisso de que o trabalho não contém nenhuma violação de quaisquer direitos autorais ou outro direito de terceiros.

1. Identificação do material bibliográfico

Dissertação Tese

2. Nome completo do autor

Matheus Mentone de Britto Siqueira

3. Título do trabalho

COMPENSAÇÃO DA EMISSÃO DE GASES DE EFEITO ESTUFA NA PRODUÇÃO LEITEIRA: O CASO DA INTEGRAÇÃO PECUÁRIA-FLORESTA NA FAZENDA SANTA BARBARA EM QUIRINÓPOLIS - GO

4. Informações de acesso ao documento (este campo deve ser preenchido pelo orientador)

Concorda com a liberação total do documento SIM NÃO¹

[1] Neste caso o documento será embargado por até um ano a partir da data de defesa. Após esse período, a possível disponibilização ocorrerá apenas mediante:

a) consulta ao(à) autor(a) e ao(à) orientador(a);

b) novo Termo de Ciência e de Autorização (TECA) assinado e inserido no arquivo da tese ou dissertação.

O documento não será disponibilizado durante o período de embargo.

Casos de embargo:

- Solicitação de registro de patente;
- Submissão de artigo em revista científica;
- Publicação como capítulo de livro;
- Publicação da dissertação/tese em livro.

Obs. Este termo deverá ser assinado no SEI pelo orientador e pelo autor.



Documento assinado eletronicamente por **Matheus Mentone De Britto Siqueira**, Discente, em 07/03/2025, às 15:45, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Francine Neves Calil**, Professora do Magistério Superior, em 10/03/2025, às 09:27, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.ufg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador 5165747 e o código CRC 2F893574.

MATHEUS MENTONE DE BRITTO SIQUEIRA

Compensação da emissão de gases de efeito estufa na produção leiteira: o caso da integração pecuária-floresta na fazenda Santa Bárbara em Quirinópolis - GO

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Agronegócio da Escola de Agronomia da Universidade Federal de Goiás, como requisito para obtenção do título de mestre em Agronegócio.

Área de concentração: Sustentabilidade e Competitividade dos Sistemas Agroindustriais
Linha de Pesquisa: Meio Ambiente e Desenvolvimento Regional

Orientadora: Prof^a. Dr^a Francine Neves Calil
Coorientadora: Dr^a. Márcia Thaís de Melo Carvalho

GOIÂNIA
2025

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor, através do Programa de Geração Automática do Sistema de Bibliotecas da UFG.

Siqueira, Matheus Mentone de Britto

Compensação da emissão de gases de efeito estufa na produção leiteira [manuscrito] : o caso da integração pecuária-floresta na fazenda Santa Bárbara em Quirinópolis - GO / Matheus Mentone de Britto Siqueira. - 2025.
80 f.

Orientador: Prof. Francine Neves Calil; co-orientador Márcia Thaís de Melo Carvalho.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Goiás, Escola de Agronomia (EA), Programa de Pós-Graduação em Agronegócio, Goiânia, 2025.

Anexos. Apêndice.

Inclui siglas, mapas, abreviaturas, gráfico, tabelas, lista de figuras, lista de tabelas.

1. Emissão de Gases de Efeito Estufa. 2. Pecuária Leiteira. 3. Sistema Pecuária-Floresta. 4. Sequestro de Carbono no Solo. 5. Compensação de Carbono. I. Calil, Francine Neves, orient. II. Título.

CDU 630



UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS

ESCOLA DE AGRONOMIA

ATA DE DEFESA DE DISSERTAÇÃO

Ata nº **1/2025** da sessão de Defesa de Dissertação de Matheus Mentone de Brito Siqueira, que confere o título de Mestre em **Agronegócio**, na área de concentração em **Sustentabilidade e Competitividade dos Sistemas Agroindustriais**.

Aos vinte e um dias do mês de fevereiro de dois mil e vinte e cinco, a partir das 09h, na sala e Videoconferência da Escola de Agronomia, realizou-se a sessão pública de Defesa de Dissertação intitulada “COMPENSAÇÃO DA EMISSÃO DE GASES DE EFEITO ESTUFA NA PRODUÇÃO LEITEIRA: O CASO DA INTEGRAÇÃO PECUÁRIA-FLORESTA NA FAZENDA SANTA BARBARA EM QUIRINÓPOLIS - GO”. Os trabalhos foram instalados pela Orientadora, Professora Doutora Francine Neves Calil (EA/UFG), com a participação dos demais membros da Banca Examinadora: Professora Doutora Sybelle Barreira (EA/UFG), membro titular interno; e Professor Doutor Mauro Valdir Schumacher (UFSM), membro titular externo. Durante a arguição os membros da banca **não fizeram** sugestão de alteração do título do trabalho. A Banca Examinadora reuniu-se em sessão secreta a fim de concluir o julgamento da Dissertação, tendo sido o candidato aprovado pelos seus membros. Proclamados os resultados pela Professora Doutora Francine Neves Calil, Presidente da Banca Examinadora, foram encerrados os trabalhos e, para constar, lavrou-se a presente ata que é assinada pelos Membros da Banca Examinadora, aos vinte e um dias do mês de fevereiro de dois mil e vinte e cinco.

TÍTULO SUGERIDO PELA BANCA



Documento assinado eletronicamente por **Sybelle Barreira, Professora do Magistério Superior**, em 09/03/2025, às 18:42, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Francine Neves Calil, Professora do Magistério Superior**, em 10/03/2025, às 09:26, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Mauro Valdir Schumacher, Usuário Externo**, em 25/04/2025, às 11:29, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.ufg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **5165746** e o código CRC **8B2DD5B3**.

AGRADECIMENTOS

Agradeço à Universidade Federal de Goiás e ao Programa de Pós-Graduação em Agronegócio.

Agradeço à agência de pesquisa Capes, por investir em mim e na minha pesquisa.

À minha orientadora Prof^ª Dr^ª Francine Neves Calil, que, para além do desenvolvimento da dissertação, das parcerias de trabalho e da confiança, se transformou em uma grande amiga de vida!

À minha coorientadora Dr^ª Marcia Thaís de Melo Carvalho, pelas grandes oportunidades que me proporcionou, por me envolver no mundo científico e sempre impulsionar minha carreira!

Ao Sr. Joaquin Ferreira Pinto, mais conhecido como “Seu Nego”, ao qual abriu as portas de sua casa com muita simpatia para que desenvolvêssemos esse trabalho.

À Prof^ª Dr^ª Sybelle Barreira, pelas oportunidades, pelos trabalhos de campos e de formação, pela visão crítica e pelas prosas consistentes e bem-humoradas!

À incrível Kaká, minha grande amada, mulher que sempre me apoiou, incentivou e participou de todos os meus sonhos. São 10 anos de companheirismo e aconchego, 9 meses de gestação e agora alguns dias de Cícero.

Agradeço ao meu filhote Cícero, que mesmo tão pequeno já me mostrou o quanto a vida é grande! Em seus suspiros eu fiz morada. Em seu olhar eu vejo minha alma!

Agradeço aos meus pais, amores incondicionais, que sempre confiaram nos meus sonhos mais complexos e nunca hesitaram em me apoiar nos meus estudos!

Agradeço a toda a família da Kaká pelo carinho, pela amizade construída e por me sentir em casa na presença de todos!

Ao Programa de Formação em Assistência Técnica e Extensão Rural para Assentamentos de Reforma Agrária e Contribuições para a Agenda 2030 e toda a comunidade rural e acadêmica envolvida!

Aos meus colegas e amigos do PPGAgro, pelos momentos de discussão e amadurecimento pessoal e profissional.

Aos meus amigos do peito e da alma, que por amor escolhi caminhar lado a lado!

Agradeço a vida!

RESUMO

Os Sistemas de Integração Pecuária-Floresta (IPF) são indicados, pelo governo brasileiro, como uma estratégia capaz de compensar 37,9 milhões de Mg de CO₂ eq. até o ano de 2030. O Objetivo deste estudo é estimar o potencial de um sistema de integração pecuária-floresta em compensar as emissões da produção de leite em uma propriedade familiar (Fazenda Santa Barbara) localizada na região sul do estado de Goiás. Para tanto foram estimadas as emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE) no processo de produção de leite utilizando a ferramenta Cool Farm Tool (CFT), uma calculadora de emissões de GEE em diversos sistemas produtivos em nível de fazenda, cujos dados de entrada foram coletados por meio de questionários e levantamento de campo realizados nos anos entre 2019/2020 e 2022/2023. Os estoques de carbono (C) no solo sob o renque e entre reques de árvores de eucaliptos foram determinados aos 4 anos após a implantação do IPF e nas árvores aos 32 meses e aos 101 meses após a implantação do IPF. Uma área sob pastagem contínua ao lado do IPF foi utilizada como referência para representar o status quo do estoque de C no solo arenoso (areia ~73%) da propriedade antes de implantar a IPF. A emissão total de GEE devido produção de leite na propriedade foi estimada pelo CFT em 326,55 Mg CO₂ eq no período 2019/2020, e 267,37 Mg CO₂ eq no período 2022/2023. A intensidade de emissão, ou quantidade de dióxido de C equivalente emitido (CO₂ eq.) por unidade de proteína produzida (*Fat Protein Corrected Milk-FPCM*), foi de 1,01 kg CO₂ eq./ kg FPCM em 2019/2020 e 0,69 kg CO₂ eq./ kg FPCM em 2022/2023. Em relação a área de pastagem referência, o estoque de C foi 9 Mg ha⁻¹ maior sob renque de árvores de eucaliptos na IPF na camada 0.0-1.0 m de solo em 2019/20. A taxa de compensação de C foi calculada considerando o crescimento e o estoque de C no tronco das árvores de eucaliptos a partir da implantação da IPF em 2016, enquanto a emissão total de GEE da produção de leite e o estoque de C medido no solo foram considerados parâmetros fixos a partir das médias observadas entre 2020 e 2023. O componente florestal da IPF foi capaz de estocar 8,271 Mg ha⁻¹ ano⁻¹ aos 32 meses e 31,30 Mg ha⁻¹ ano⁻¹ aos 101 meses. A taxa de compensação de C aumenta ao longo dos anos proporcionalmente ao crescimento do componente florestal. No primeiro e segundo anos após a implantação do sistema IPF, cerca de 9,9% da emissão total proveniente da produção de leite na propriedade foi compensada pela captura de C no solo e nas arvores de eucaliptos. No terceiro ano, a compensação da emissão de GEE aumentou para 19,6%. Entre o quarto e sexto ano, a compensação foi de 39,1% e do sétimo ao oitavo de 47,1%. A partir deste estudo foi possível constatar a capacidade de mitigação de GEE pelo IPF em sistemas pecuários leiteiros.

Palavras-chave: Emissão de Gases de Efeito Estufa; Pecuária Leiteira; Sistema Pecuária-Floresta; Sequestro de Carbono no Solo; Sequestro de Carbono nas árvores; Balanço de Carbono; Compensação de Carbono.

ABSTRACT

The Integrated Livestock-Forestry Systems (ILF) are indicated by the Brazilian government as a strategy capable of offsetting 37.9 million Mg of CO₂ eq. by the year 2030. The objective of this study is to estimate the potential of an integrated livestock-forestry system to offset emissions from milk production on a family farm (Fazenda Santa Barbara) located in the southern region of the state of Goiás. To this end, greenhouse gas (GHG) emissions in the milk production process were estimated using the Cool Farm Tool (CFT), a GHG emissions calculator in several production systems at the farm level, whose input data were collected through questionnaires and field surveys carried out in the years between 2019/2020 and 2022/2023. Soil carbon (C) stocks under and between rows of eucalyptus trees were determined 4 years after IPF implementation and in the trees at 32 months and 101 months after IPF implementation. An area under continuous pasture next to the IPF was used as a reference to represent the status quo of C stocks in the sandy soil (sand ~73%) of the property before IPF implementation. Total GHG emissions due to milk production on the property were estimated by the CFT at 326.55 Mg CO₂ eq in the 2019/2020 period, and 267.37 Mg CO₂ eq in the 2022/2023 period. The emission intensity, or amount of carbon dioxide equivalent emitted (CO₂ eq.) per unit of protein produced (Fat Protein Corrected Milk-FPCM), was 1.01 kg CO₂ eq./ kg FPCM in 2019/2020 and 0.69 kg CO₂ eq./ kg FPCM in 2022/2023. In relation to the reference pasture area, the C stock was 9 Mg ha⁻¹ higher under eucalyptus tree rows in the IPF in the 0.0-1.0 m soil layer in 2019/20. The C compensation rate was calculated considering the growth and C stock in the trunk of eucalyptus trees since the implementation of the IPF in 2016, while the total GHG emissions from milk production and the C stock measured in the soil were considered fixed parameters based on the averages observed between 2020 and 2023. The forest component of the IPF was able to store 8.271 Mg ha⁻¹ year⁻¹ at 32 months and 31.30 Mg ha⁻¹ year⁻¹ at 101 months. The C compensation rate increases over the years proportionally to the growth of the forest component. In the first and second years after the implementation of the IPF system, approximately 9.9% of the total emissions from milk production on the property were offset by C capture in the soil and eucalyptus trees. In the third year, the GHG emission offset increased to 19.6%. Between the fourth and sixth years, compensation was 39.1% and from the seventh to the eighth year, 47.1%. From this study, it was possible to verify the GHG mitigation capacity of the IPF in dairy farming systems.

KEYWORDS: Greenhouse Gas Emission; Dairy Farming; Livestock-Forest System; Soil Carbon Sequestration; Tree Carbon Sequestration; Carbon Balance; Carbon Offset.

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	13
2.	OBJETIVO	15
2.1.	Objetivos específicos	15
3.	REFERÊNCIAL TEÓRICO CONCEITUAL	16
3.1.	Governança da mudança climática global	16
3.2.	Políticas de redução de emissão de GEE no setor agropecuário brasileiro	21
3.3.	Balço líquido dos fluxos de Carbono (C) em sistemas agropecuários de produção	26
3.3.1.	Emissão de GEE.....	26
3.3.2.	Remoção, absorção, captura, sequestro, armazenamento e estoque de CO ₂	27
3.3.3.	<i>Net zero, carbon neutrality</i> , carbono neutro, <i>carbon offset</i> e compensação de C.....	29
4.	METODOLOGIA.....	30
4.1.	Caracterização do sistema de integração	30
4.2.	Ferramenta <i>Cool Farm Tool</i>	33
4.3.	Coleta de informações para o uso da CFT.....	36
4.4.	Determinação do estoque de C no solo do IPF.....	38
4.5.	Determinação do estoque de C no tronco das árvores do IPF.	41
4.6.	Compensação de C da produção de leite	44
5.	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	45
5.1.	Emissões de GEE e CO ₂ eq. da produção de leite	45
5.2.	Estoque de C no solo da IPF.....	48
5.3.	Estoque de C no tronco das árvores do IPF.....	51
5.3.1.	Características dendrométricas	51
5.3.2.	Estimativa do estoque médio anual de carbono e CO ₂ eq. no tronco das árvores.....	51
5.4.	Compensação de CO ₂ eq. das emissões da produção de leite pela IPF.....	54
6.	CONCLUSÃO.....	56
7.	RECOMENDAÇÕES TÉCNICAS	56
8.	IMPACTO SOCIAL E RELEVÂNCIA DA PESQUISA	57
	REFERÊNCIAS	59
	ANEXOS	68

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Principais contribuições de cada Assessment Report	17
Quadro 2 - Planos de ação e planos setoriais que integraram a PNMC	21
Quadro 3 - Compromissos do Plano ABC 2010-2020	22
Quadro 4 - Compromissos de ampliação da área de adoção (milhões de hectare), resíduos tratados (milhões de m ³) e animais adicionais (milhões de unidade); do potencial de mitigação de emissões de GEE (milhões de Mg CO ₂ eq.), e contribuições para adaptação, dos SP	25
Quadro 5 - Escopos utilizados na ferramenta	35
Quadro 6 - Fontes de GEE da propriedade	35
Quadro 7 - Informações requeridas pela ferramenta	37
Quadro 8 - Períodos de avaliação das emissões de GEE na fazenda Santa Bárbara	38
Quadro 9 - Alimentos selecionados na ferramenta	77
Quadro 10 - Alimentos selecionados na ferramenta	78

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Programas e Estratégias do Plano Operativo do ABC+. Fonte: BRASIL (2021a)..	24
Figura 2. Localização geográfica do fazenda Santa Bárbara, município Quirinópolis, GO. Fonte: Autor.....	31
Figura 3 - Croqui com o arranjo do IPF. Fonte: Autor.....	32
Figura 4 - Página inicial do submódulo laticínios da ferramenta Cool Farm Tool site https://app.coolfarmtool.org/ . Fonte: COOL FARM ALLIANCE (2024)	33
Figura 5 - Página inicial do site https://app.coolfarmtool.org/ onde é feita a seleção dos submódulos específicos para o calculo das emissões de GEE. Fonte: COOL FARM ALLIANCE (2024)	33
Figura 6 - Culturas passíveis ao cálculo de emissão de GEE pelo submódulo “todas as culturas” na CFT. Fonte: COOL FARM ALLIANCE (2024).....	34
Figura 7 – Página 1 do questionário elaborado por pesquisadores da Embrapa, e aplicados a partir do projeto “Avaliação da intensificação sustentável de sistemas agropecuários integrados (ILPF) no Brasil” desenvolvido pela parceria entre Embrapa, Emater e University of Nottingham.....	36
Figura 8 – (A) Sistema de integração pecuária-floresta (CLF), pastagem contínua (PAST) e mata nativa de Cerrado (NF) e (B) pontos de amostragem de solo dentro do renque das árvores e entre os renques de árvores no sistema de integração pecuária-floresta na Fazenda Santa Barbara. Fonte: Autores.....	38
Figura 9. Trincheira de solo para coleta de amostras a fim de determinar a concentração de C e a densidade do solo em sistema integração lavoura-pecuária, na Fazenda Santa Barbara. Solo franco arenoso ou Argisol. Fonte: Autores, 2018.	39
Figura 10. (A) Método de amostragem sistemática realizada para inventário florestal na Fazenda Santa Bárbara e (B) Mensuração do DAP das árvores de eucalipto em IPF na fazenda Santa Barbara aos 101 meses após o plantio. Fonte: Elaborado pelo autor.	41
Figura 11. IPF na fazenda Santa Bárbara aos 101 meses após o plantio. Fonte: Autor.	42
Figura 12. Linha do tempo de todas as avaliações realizadas no IPF e no sistema de produção de leite da Fazenda Santa Barbara. Fonte: Autor.	45
Figura 13. Participação das fontes emissoras na emissão total da fazenda no período de 2019-2020. Fonte: Autor.....	47
Figura 14. Participação das fontes emissoras na emissão total da fazenda no período de 2022-2023. Fonte: Autor.....	47
Figura 15. Estoques de Corg ($Mg\ ha^{-1}$) em sistema de integração lavoura-pecuária (IPF) de 4 anos de idade: sob os renques de árvores (IPF-R) e pastagem entre renques (IPF-ER), e sob a área de pastagem contínua e mata nativa de Cerrado em três camadas de solo (0,0–0,3 m, 0,3–1,0 m e 0,0–1,0 m) de um Latossolo Arenoso, em Novembro de 2020, na Fazenda Santa Barbara, em Quirinopolis-GO. Colunas com letras diferentes são significativamente diferentes da pastagem contínua, Teste de tukey-kramer ($p < 0.05$), considerando a porcentagem de argila como co-variável. A barra de erros representa o erro padrão da média ($n = 4$).	49
Figura 16. Acúmulo de Corg ($Mg\ ha^{-1}$) nos componentes de um IPF: sob os renques de árvores (IPF-R) e pastagem entre renques (IPF-ER), sob a área total de IPF; na mata nativa e na pastagem de referência não cultivada na camada de (0,0–1,0 m) de um Latossolo Arenoso, 4 anos. Fonte: Autores.	50
Figura 17. (A) Distribuição diamétrica das árvores aos 32 meses e (B) Distribuição diamétrica das árvores aos 101 meses	51

Figura 18. Captura Média Anual de CO ₂ eq. do povoamento florestal.....	53
Figura 19 - Taxas de emissão da produção de leite e de compensação de CO ₂ eq. pela IPF.	55

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Emissões de GEE por setor da fazenda e por GEE nos períodos de 2019-2020 e 2022-2023	46
Tabela 2 – Características dendrométricas, biomassa e estoque de C no tronco das árvores..	52

1. INTRODUÇÃO

O Brasil tem o maior rebanho bovino do mundo, contando com 234 milhões de cabeças de gado distribuídas em 2,5 milhões de estabelecimentos agropecuários (IBGE, 2019; FAO, 2024). O estado de Goiás possui o 3º maior rebanho do país, ou cerca de 10,4% do rebanho nacional (BRASIL, 2023a). Em 2024, a produção pecuária nacional correspondeu à 7,16% do PIB (CEPEA, 2024), desta forma o setor pecuário nacional tem a responsabilidade de gerir de forma ambientalmente sustentável as áreas de produção visando a manutenção e ampliação da capacidade produtiva.

No estado de Goiás, 23% dos estabelecimentos agropecuários foram responsáveis pela produção de leite no Brasil, sendo 6% do total localizados no estado de Goiás, onde 69% dos produtores são organizações familiares (IBGE, 2017). Em 2019, o Estado foi o quarto maior produtor de leite do Brasil, participando com 9,13% da produção nacional e a mesorregião Sul de Goiás, maior produtora de leite do estado, foi a quinta mesorregião mais produtora de leite do Brasil, participando com 4,11% da produção nacional (HOTT *et al.*, 2022).

A produção agropecuária está associada a desafios ambientais significativos, incluindo a emissão de gases de efeito estufa (GEE), como o dióxido de carbono equivalente (CO₂ eq.), que contribuem para a mudança climática global. No Brasil, o setor agropecuário é a maior fonte emissora de Gases de Efeito Estufa (GEE), representando cerca de 34% das emissões nacionais (CLIMATEWATCH, 2021). Dentro do setor agropecuário brasileiro, a bovinocultura, produção de carne e leite, é responsável por 75% das emissões (ou 577 milhões de toneladas de CO₂eq), divididas entre gado de corte (65,6%) e de leite (9,3%) (POTENZA *et al.*, 2021). Este montante posiciona o Brasil como o segundo país com maior emissão de metano (CH₄) entérico proveniente da pecuária leiteira, estando atrás somente da Índia. (YORK *et al.*, 2018).

A relevância da agropecuária brasileira para o mercado global torna imperativo equilibrar a produção de alimentos com a redução do impacto ambiental. O Brasil desempenha um papel estratégico no cumprimento de metas climáticas globais, especialmente no contexto do Acordo de Paris, que exige esforços conjuntos para limitar o aumento da temperatura global a 1,5°C acima dos níveis pré-industriais (FAO, 2021). Para tanto, é necessário a implementação de medidas mitigadoras dos efeitos da mudança climática, como a redução das fontes emissoras de GEE, e a promoção dos sumidouros que acumulam e armazenam carbono. O setor

agropecuário, apesar de sua alta contribuição nas emissões de GEE, tem o potencial de realizar o papel inverso, podendo atuar como sumidouro de GEE através da fixação de carbono no solo e biomassa vegetal (GRISCOM *et al.*, 2017; ASSAD *et al.*, 2019).

A gestão sustentável da atividade agrícola centrada na fixação de carbono orgânico no solo é capaz de promover o armazenamento de carbono oriundo da deposição de matéria orgânica de origem vegetal e animal durante milhares de anos, a partir de mecanismos de estabilização da matéria orgânica no solo (FAO, 2019). PAUSTIAN *et al.* (2016), aponta que ao elevar em poucos por cento o armazenamento líquido de C no solo eleva-se expressivamente a remoção de C da atmosfera. A biomassa vegetal absorve CO₂ atmosférico através do processo de fotossíntese, podendo acumular C no seu tecido vegetal, tronco, caule e raízes. Neste sentido a silvicultura intensiva e extensiva tem a capacidade de armazenar, durante décadas, o C atmosférico e pode ser uma ferramenta promissora para enfrentar a mudança climática (FAO & GDP, 2018).

No Brasil, os sistemas de integração pecuária-floresta (IPF), também chamados de sistemas silvipastoris (SSP), junto com os sistemas de integração lavoura-pecuária-floresta (ILPF), lavoura-floresta (ILF) e lavoura-pecuária (ILP), são elencados pelo plano setorial para adaptação a mudança do clima e baixa emissão de carbono na agropecuária, com vistas ao desenvolvimento sustentável (plano ABC+), como responsáveis pela compensação de 37,9 milhões de Mg de CO₂ eq. até o ano de 2030 em 10 milhões de hectares (BRASIL, 2021a; BRASIL, 2023b).

Em IPF, que integra os componentes arbóreo, forrageiro e animal, a emissão de GEE oriundas da produção pecuária pode ser compensada pelo armazenamento de carbono no componente arbóreo e no solo. Esta compensação é a diferença entre a emissão de GEE em dióxido de carbono equivalente (CO₂ eq.) e a fixação de C, denominada de balanço de C em um sistema de produção (ESTEVAM *et al.*, 2023).

O mais complexo para determinar o balanço de C em um sistema de produção é obter as medidas de emissão de GEE de todo processo produtivo, assim como determinar os estoques de C nos componentes biofísicos do sistema. Para quantificar as emissões GEE em uma propriedade agropecuária é necessário o uso de uma gama de índices de emissão para cada elemento da produção dentro de uma fazenda. Por isso modelos de estimativa de emissão como a ferramenta online *Cool Farm Tool* (CFT) são ferramentas utilizadas para estimar as emissões dos diferentes componentes no processo de produção.

A fazenda Santa Bárbara é tida como modelo na implantação da IPF e representa a escala da produção de leite familiar no estado de Goiás e nos últimos 8 anos muitos produtores

da mesorregião sul do estado de Goiás adotaram o IPF através de um projeto desenvolvido pela Emater-GO em parceria com a Embrapa Arroz e Feijão. Dada a relevância do setor leiteiro em Goiás, entender a capacidade do sistema IPF em compensar as emissões de CO₂ é crucial para orientar políticas públicas e práticas agropecuárias mais sustentáveis. Neste sentido este trabalho parte da seguinte pergunta: Quanto das emissões de GEE oriundas da produção de leite da fazenda Santa Bárbara o sistema de IPF é capaz de compensar anualmente através do solo e das árvores anualmente desde a sua implementação?

2. OBJETIVO

Estimar a capacidade de um sistema de integração pecuária-floresta em compensar as emissões da produção leiteira em uma propriedade familiar localizada na região sul do estado de Goiás.

2.1. Objetivos específicos

- a. Estimar as emissões de CO₂ eq. geradas pelas atividades relacionadas a produção de leite utilizando a ferramenta *Cool Farm Tool* (CFT) no período entre 2019 e 2020 e no período entre 2022 e 2023.
- b. Determinar os estoques de C e o estoque médio anual de CO₂ eq. no solo do IPF em relação a uma pastagem de referência a partir de amostras coletadas no quarto ano após a implementação;
- c. Determinar os estoques de C e o estoque médio anual de CO₂ eq. nas árvores em sistema de integração pecuária-floresta inventariada aos 32 meses e aos 101 meses após a implementação;
- d. Calcular a compensação das emissões de CO₂ eq. da produção de leite pelos sumidouros de CO₂ eq. ao longo dos anos desde a implementação do IPF (2016 a 2024).

3. REFERÊNCIAL TEÓRICO CONCEITUAL

3.1. Governança da mudança climática global

A partir dos alertas dos cientistas sobre o aquecimento global, ultrapassando a variabilidade natural, associado ao aumento das emissões antropogênicas de GEE a *International Conference on Assessment of the Role of Carbon Dioxide and of Other Greenhouse Gases in Climate Variations and Associated Impacts* ocorrida em Villach na Áustria em 1985 foi a primeira conferência relacionada a ações de governança mundial no que se refere a emissão de gases de efeito estufa. Nesta conferência os cientistas cobraram os políticos para que desenvolvessem políticas para mitigar as emissões de GEE de origem antrópica (CHAZOURNES, 1992).

Em 1988, a *World Conference on The Changing Atmosphere: Implications for Global Security* em Toronto, Canadá, exigiram aos governos, as nações unidas, ao setor industrial entre outras instituições ações em relação a redução da crise causada pela poluição da atmosfera. Foi cobrado que os governos trabalhassem em um plano de ação para a proteção da atmosfera, incluindo a criação de uma convenção-quadro internacional e para que os governos estabeleçam um Fundo Mundial da Atmosfera financiado em parte por uma taxa sobre o consumo de combustíveis fósseis de países industrializados (CONFERENCE STATEMENT, 1988, p. 298).

Naquele momento a preocupação climática já estava relacionada às projeções de aquecimento climático consistente com as previsões teóricas de GEE. Afirmava-se que o aumento das emissões de GEE resultaria no aumento da temperatura média da superfície da terra de 1,5 a 4 °C antes da metade do século 21. Para tanto a conferência indicou a eliminação completa da emissão de clorofluorcarbono (CFC) até o ano 2000, a estabilização das emissões de dióxido de C (CO₂), a necessidade de redução em 50% dos níveis de emissão naquela circunstância, orientando a redução em 20% dos níveis de 1988 até 2005, e indicou que as nações industrializadas, por serem as grandes responsáveis pelas emissões, liderassem o caminho (CONFERENCE STATEMENT, 1988).

No mesmo ano e no ano subsequente a 43^a assembleia geral da ONU (1988-1989) tratou sobre a proteção do clima global para as gerações presentes e futuras da humanidade, e em conjunto ao UNEP e a Organização Meteorológica Mundial (OMM) culminou no

estabelecimento do *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC) em Genebra, Suíça no ano de 1988 (IPCC, 2023a). Segundo IPCC (2023b) a sua tarefa inicial era de:

“preparar uma revisão abrangente e recomendações relativamente ao estado do conhecimento da ciência das alterações climáticas; o impacto social e económico das alterações climáticas e potenciais estratégias de resposta e elementos para inclusão numa possível futura convenção internacional sobre o clima (IPCC , 2023a, p.1, tradução nossa)”.

Desde 1990, o IPCC produziu diversos relatórios de avaliação sobre alterações climáticas, contribuindo para a elaboração de uma política climática internacional. Os relatórios são construídos a partir do trabalho voluntário de especialistas que avaliam milhares de artigos científicos para divulgar um resumo “sobre os motores das alterações climáticas, os seus impactos e riscos futuros, e como a adaptação e a mitigação podem reduzir esses riscos” (IPCC, 2024a, p.1). Atualmente o objetivo do IPCC é fornecer aos governos, em todos os níveis, informações científicas que possam utilizar para desenvolver políticas climáticas (IPCC, 2024b). No Quadro 1 é apresentado um compilado das principais contribuições de cada relatório segundo IPCC (2023a):

Quadro 1 – Principais contribuições de cada *Assessment Report*

Ano	Relatório	Contribuições
1990	<i>First Assessment Report (FAR)</i>	Alertou sobre a importância das alterações climáticas como um desafio com consequências globais e que requer cooperação internacional. Teve um papel decisivo na criação da <i>United Nations Framework Convention on Climate Change</i> (UNFCCC).
1995	<i>Second Assessment Report (SAR)</i>	“(…)forneceu material importante para os governos utilizarem no período que antecedeu a adopção do Protocolo de Quioto em 1997”
2001	<i>Third Assessment Report (TAR)</i>	“(…)atenção nos impactos das alterações climáticas. e a necessidade de adaptação.”
2007	<i>Fourth Assessment Report (AR4)</i>	“(…)lançou as bases para um acordo pós-Quioto, centrando-se na limitação do aquecimento a 2°C.”

2014	<i>Fifth Assessment Report (AR5)</i>	“(…)contributo científico para o Acordo de Paris.”
2023	<i>Sixth Assessment Report (AR6)</i>	produziu três relatórios especiais: <ul style="list-style-type: none"> · Aquecimento global de 1,5° · Mudança do clima e terra - O oceano e a criosfera em um clima em mudança - um relatório metodológico e o sexto relatório de avaliação

Fonte: IPCC (2023a)

O “*First Assessment report*” (FAR) divulgado em 1990 pelo IPCC mostrou que o aumento das emissões antrópicas de gases de efeito estufa - GEE, principalmente, dióxido de Carbono (CO₂), metano (CH₄), clorofluorcarboneto (CFC) e óxido nitroso (N₂O) aumentariam o efeito estufa e, conseqüentemente, a temperatura da superfície terrestre e dos oceanos.

Ainda em 1990 foi criado o *Intergovernmental Negotiating Committee for a Framework Convention on Climate Change* (INC/FCCC), estabelecido a partir da 45^a sessão da Assembleia Geral da ONU, ocorrida em 11 de dezembro de 1990 com o apoio da UNEP e OMM. O objetivo da INC/FCCC era preparar uma convenção-quadro sobre o clima. A partir do mesmo foram realizadas cinco sessões entre 1991 e 1992 onde participantes de mais de 150 Estados discutiram os compromissos, metas e cronogramas para a redução das emissões de dióxido de carbono, mecanismos financeiros, transferência de tecnologia e responsabilidades comuns, mas diferenciadas dos países desenvolvidos e em desenvolvimento (IISD, 1995).

Outros objetivos em relação ao meio ambiente e o desenvolvimento eram construídos e em 1992 foi realizada no Rio de Janeiro a *United Nations Conference on Environment and Development* (UNCED), também conhecida como cúpula da terra. O objetivo principal da era produzir uma agenda e um plano para a ação internacional em questões ambientais e de desenvolvimento para orientar a cooperação internacional e a política de desenvolvimento no século XXI. (UNITED NATIONS, 1992) A partir da conferência foram criados: a Declaração do Rio e os seus 27 princípios universais, a *United Nations Framework Convention on Climate Change* (UNFCCC); a Convenção sobre a Diversidade Biológica; a Declaração sobre os princípios da gestão florestal; e a criação da agenda 21(UNITED NATIONS, 1992).

No relatório da UNCED são apresentadas diversas demandas relacionadas aos gases de efeito estufa e o carbono como, a realização de revegetação em diversas áreas específicas para combater a desertificação e prevenir erosão. Também foi indicado a criação de programas para a recuperação de áreas degradadas a partir da silvicultura comunitária, silvicultura social, agrossilvicultura e sistemas silvipastoris. Cabem destacar as demandas em relação a análise de dados e pesquisas sobre a interação entre espécies nativas e espécies plantadas e a avaliação do impacto da mudança do clima nas florestas e o impacto das florestas sobre o clima (UNITED NATIONS, 1992).

A UNFCCC, criada a partir da cúpula da terra, é atualmente o principal tratado multilateral que atua com o objetivo de estabilizar as concentrações de gases de efeito estufa (UNITED NATIONS, 2024).| A partir dos acordos internacionais ficou definido que as responsabilidades em relação a mudança climática são diferenciadas entre países desenvolvidos, presentes no Anexo 1, e países em desenvolvimentos, não Anexo 1, onde cada grupo assumiu diferentes responsabilidades de acordo com o princípio de responsabilidades comuns, mas diferenciadas e respectivas capacidades (STODDARD *et al.*, 2021). O regime das alterações climáticas, construído a partir da UNFCCC teve impacto na entrada em vigor do Protocolo de Quioto (1997), conferência de Copenhague (2009) e acordo de Paris (STODDARD *et al.*, 2021).

De acordo com Stoddard *et al.* (2021, p.659, tradução nossa)

“O regime das alterações climáticas, fundado com base na UNFCCC de 1992, cumpriu algumas das suas funções esperadas. Aumentou a consciencialização, promoveu a aprendizagem, estabeleceu sistemas de informação e monitorização, galvanizou grandes sectores da sociedade civil e alcançou alguma convergência de normas, nomeadamente a aceitação retórica das metas de temperatura de aumento de temperatura entre 2 °C e 1,5 °C.”

Para que a UNFCCC fosse implementada era necessário desenvolver um plano de ação e desta forma, em 1995, foi realizada a primeira *Conference of the Parties* (COP-1) em Berlim, Alemanha onde delegados de 117 partes e 53 estados estabeleceram a necessidade de ações mais concretas em relação à redução das emissões de GEE. As prioridades e as preocupações eram muito diferentes entre os delegados, sendo necessárias muitas horas de reunião para a definição da adequação dos compromissos. Durante o evento foi adotado o “Mandato de Berlim” e um compromisso na proteção do sistema climático. (IISD, 1995)

Somente a partir da terceira conferência das partes (COP 3) da UNFCCC, realizada em Quioto no Japão em 11 de dezembro 1997, assinou-se o primeiro tratado internacional relacionado ao controle da emissão dos gases de efeito estufa, o Protocolo de Quioto. O protocolo, assinado por 84 países, estabeleceu um consenso que os países industrializados

reduziriam suas emissões combinadas de GEE em pelo menos 5% em relação aos níveis de 1990 entre 2008 e 2012 (SENADO FEDERAL, 2024). Para tanto cada parte incluída no anexo 1 do protocolo haveria o período máximo de 1 ano antes do início do primeiro período de compromisso para estabelecer um sistema nacional de estimativas das emissões antrópicas por fontes e remoções por sumidouros de todos os GEE's não controlados pelo protocolo de Montreal. As metodologias para estimação necessitavam ser aceitas pelo IPCC (SENADO FEDERAL, 2004).

Vinte anos depois do Protocolo de Quioto, o Acordo de Paris, assinado durante a COP 21 em Paris, na França, veio a substituir as suas determinações. O Acordo de Paris é também um tratado internacional onde 196 países concordaram em limitar o aquecimento global em 1,5° acima dos níveis pré-industriais, aumentar a capacidade de adaptação aos impactos negativos da mudança do clima e em tornar os fluxos financeiros compatíveis com uma trajetória rumo a um desenvolvimento com baixas emissões de GEE. Para tanto cada país definiu as suas metas juridicamente vinculativas para a redução das emissões de GEE e relatam o seu progresso a cada 5 anos (UNITED NATIONS, 2015).

O acordo de Paris foi o primeiro tratado internacional que considerou o solo como um potencial sumidouro de C. A partir do acordo, foi lançada a iniciativa global “4 por 1000: Solos para a segurança alimentar e clima” cujo objetivo é promover a captação de C pelos solos como uma estratégia para combater a mudança climática, promover a segurança alimentar e aumentar a adaptação dos sistemas agroalimentares frente a mudança climática. A 4 por 1000 estimula todos os atores voluntários do mundo a comprometer a uma transição para uma agricultura regenerativa, produtiva e resiliente, tendo como base uma gestão adequada do território e do solo a partir de uma taxa de crescimento anual de 0,4% das reservas de carbono do solo nos primeiros 30 a 40 cm (BRUNI *et al.*, 2021; SOUSSANA *et al.*, 2019).

A política internacional no que se refere a mudança climática não cessará. De acordo com o 6º Relatório de Avaliação do IPCC, estima-se que as atividades humanas tenham causado um aquecimento de 1,0 °C de aquecimento global acima das temperaturas pré-industriais e é provável que o aquecimento atinja 1,5° entre 2030 e 2052 caso nada seja feito. As estimativas das emissões de GEE e as ambições de mitigação declaradas pelos países de compõem o Acordo de Paris não limitariam o aquecimento global a 1,5°, desta forma é necessário ações mais contundentes e políticas mais precisas para a redução das emissões de GEE (IPCC, 2023b).

Apesar dos avanços institucionais, a governança climática enfrenta desafios significativos. Entre eles, destacam-se as assimetrias de responsabilidade e capacidade entre países desenvolvidos e em desenvolvimento, bem como a necessidade de financiamento

climático. Países desenvolvidos possuem maior responsabilidade histórica pelas emissões de gases de efeito estufa, enquanto os países em desenvolvimento são frequentemente os mais vulneráveis aos impactos climáticos (Roberts & Parks, 2007).

3.2. Políticas de redução de emissão de GEE no setor agropecuário brasileiro

Os compromissos voluntários assumidos na 15ª Conferência das Partes (COP-15) em Copenhague pelo governo brasileiro marcam um novo paradigma entre crescimento econômico e impacto climático global. Durante a COP-15, pela primeira vez, o governo brasileiro assumiu o compromisso voluntário de redução entre 36,1% e 38,9% das emissões de GEE até 2020 (BRASIL, 2012). Os compromissos voluntários estabelecidos foram ratificados pelo governo federal brasileiro com a lei da Política Nacional sobre Mudança do Clima (PNMC) (Lei 12.187/2009) buscando a compatibilização do desenvolvimento econômico-social com a proteção do sistema climático global (BRASIL, 2021b).

Em 2010 os artigos 6º, 11 e 12 da PNMC foram regulamentados pelo Decreto nº7.390/2010 posteriormente revogado em 2018 pelo Decreto nº 9.578, de 2018. Para o cumprimento do compromisso foram considerados dois planos de ação e dois planos setoriais integradas a PNMC (Quadro 2) e que implementarão dez ações para reduzir as emissões de GEE (BRASIL, 2012).

Quadro 2 - Planos de ação e planos setoriais que integraram a PNMC

	Planos de ação
1	Plano de Ação para Prevenção e Controle do Desmatamento na Amazônia Legal - PPCDAm;
2	Plano de Ação para Prevenção e Controle do Desmatamento e das Queimadas no Cerrado - PPCerrado;
3	Plano Setorial de Mitigação e de Adaptação às Mudanças Climáticas para a Consolidação de uma Economia de Baixa Emissão de Carbono na Agricultura - Plano ABC; e
4	Plano Setorial de Redução de Emissões da Siderurgia.

Fonte: BRASIL, 2012

Para o setor agropecuário a partir do artigo 3º do decreto nº7.390/2010 foi instituído o “Plano Setorial de Mitigação e de Adaptação às Mudanças Climáticas para a Consolidação de uma Economia de Baixa Emissão de Carbono na Agricultura (Plano ABC)”, com a primeira etapa entre os anos de 2010-2020. A construção do plano ABC foi coordenada pela Casa Civil da Presidência da República, pelo Ministério da Agricultura, Abastecimento e Pecuária

(MAPA) e pelo ministério do desenvolvimento agrários, e construído por mais de 30 instituições governamentais, não-governamentais e de iniciativa privada. Para alcançar os objetivos do Plano foi estimado a necessidade de R\$ 197 bilhões em recursos financiados (BRASIL, 2012).

No plano ABC foram apresentados 6 compromissos da PNMC (Quadro 3) a partir de 7 programas: 1) Recuperação de Pastagens Degradadas; 2) Integração Lavoura-Pecuária-Floresta (iLPF) e Sistemas Agroflorestais (SAFs); 3) Sistema Plantio Direto (SPD); 4) Fixação Biológica do Nitrogênio (FBN); 5) Florestas Plantadas; 6) Tratamento de Dejetos Animais; e 7) Adaptação às Mudanças Climáticas. Para a implementação de cada compromisso foi proposto sete ações: campanha publicitária; capacitação e transferência de tecnologia; mapeamento das áreas prioritárias; disponibilização de insumos; agentes financeiros; pesquisa; e incentivos (BRASIL, 2023c).

Quadro 3 - Compromissos do Plano ABC 2010-2020

Tecnologia	Compromisso (milhões de ha adicionais ou milhões de m³ tratados)	Potencial de mitigação (milhões Mg CO₂ eq.)
Recuperação de pastagens degradadas	15,0	83 a 104
Integração Lavoura-Pecuária-Floresta	4,0	18 a 22
Sistema Plantio Direto	8,0	16 a 20
Fixação Biológica de Nitrogênio	5,5	10,0
Florestas Plantadas	3,0	--
Tratamento de Dejetos de Animais	4,4	6,9
Total	35,5	133,9 a 162,9

Fonte: BRASIL (2023c)

A partir do Plano ABC foi criado um programa de crédito agrícola associado ao crédito rural, com taxas de juros competitivas e subsidiadas, chamado Programa ABC (BRASIL, 2012). Gianetti e Ferreira Filho (2021) constataram que a distribuição dos recursos oriundos do programa ABC do período de janeiro de 2013 a dezembro de 2017 teve concentração regional e na implementação de recuperação de pastagens degradadas, sistema plantio direto, florestas plantadas e integração lavoura-pecuária-floresta. Os autores ainda orientam a criação de critérios para definir explicitamente as regiões prioritárias. Segundo os dados do Banco Central do Brasil o valor total dos contratos do Programa ABC entre janeiro de 2013 e dezembro de 2020 foi de 16,765 bilhões de reais (BANCO CENTRAL DO BRASIL, 2024).

Durante a COP-21, o governo brasileiro apresentou novas metas voluntárias de redução de GEE, a chamada: “Contribuição Nacionalmente Determinada “(iNDC), promulgada em 2017, que tem como compromisso reduzir as emissões de GEE em 37% até o ano de 2025 e

redução de 43% em 2030 e relação aos níveis estimados em 2005 (POTENZA *et al.*, 2017; UNITED NATIONS, 2015). O Plano ABC ficou definido como a principal estratégia brasileira para o desenvolvimento sustentável no setor agropecuário (BRASIL, 2023d). Apesar dos dados divulgados pelo governo federal referentes a implementação do Plano ABC, é necessário que as bases de dados e informações mais precisas sejam publicadas a fim de uma avaliação científica da efetividade da política pública em questão.

Após a primeira etapa o plano ABC foi renomeado como “Plano Setorial para Adaptação à Mudança do Clima e Baixa Emissão de Carbono na Agropecuária, com vistas ao Desenvolvimento Sustentável (2020-2030) - ABC+”. O Plano ABC+ dará continuidade à política setorial, e prestará apoio à implementação da NDC e será executado de 2020 a 2030. O diferencial desta nova etapa do plano é a promoção a adaptação aos efeitos adversos da mudança climática com a incorporação da gestão integrada da paisagem (BRASIL, 2021a).

A base do Plano ABC+ é composta por 3 pilares estratégicos: “i) a Abordagem Integrada da Paisagem (AIP); ii) a mitigação de GEE e a adaptação, e; iii) o estímulo à adoção e manutenção de Sistemas, Práticas, Produtos e Processos de Produção Sustentáveis (SPS_{ABC}).” (BRASIL, 2021a). O plano operacional foi estruturado em nove eixos estratégicos, divididos em quatro programas e cinco estratégias (Figura 1), onde programas são o conjunto de ações sob coordenação direta da Secretaria de Inovação, Desenvolvimento Rural e Irrigação (SDI), do MAPA, e estratégia envolve a gestão compartilhada com diferentes atores externos (BRASIL, 2021a).



Figura 1. Programas e Estratégias do Plano Operativo do ABC+. Fonte: BRASIL (2021a)

Esta nova etapa de Plano ABC inseriu novos compromissos e tecnologias (Quadro 4) e tem como meta ampliar a área de adoção dos SPS_{abc} e como resultado mitigar 1.042,41 milhões de Mg CO₂ eq. considerando 2020 como ano base. A mitigação das emissões de GEE se dão através da redução direta das emissões de GEE bem como pelo potencial de sequestro de C que algumas SPS_{abc} apresentam. As florestas de eucalipto por exemplo podem acumular cerca de 30 t de CO₂ por ano (BRASIL, 2021a).

Quadro 4 - Compromissos de ampliação da área de adoção (milhões de hectare), resíduos tratados (milhões de m³) e animais adicionais (milhões de unidade); do potencial de mitigação de emissões de GEE (milhões de Mg CO₂ eq.), e contribuições para adaptação, dos SP

SPS abc		Ampliação da adoção (milhões de ha)	Potencial de mitigação de emissões de GEE (milhões de Mg CO ₂ eq.)
Práticas para Recuperação de Pastagens Degradadas (PRPD)		30	113,7
Sistema Plantio Direto (SPD)	Sistema Plantio Direto de Grãos (SPDG)	12,5	12,11
	Sistema Plantio Direto Hortaliças (SPDH)	0,08	0,88
Sistemas de Integração (SIN)	Integração Lavoura-Pecuária-Floresta (ILPF)	10	37,9
	Sistemas Agroflorestais (SAFs)	0,1	0,38
Florestas Plantadas (FP)		4	510
Bioinsumos (BI)		13	23,4
Sistemas Irrigados (SI)		3	50
Manejo de Resíduos da Produção Animal (MRPA)		208,4	277,8
Terminação Intensiva (TI)		5 milhões	16,24

Fonte: BRASIL, 2021a

Além das metas do Plano ABC, em 2015 a EMBRAPA desenvolveu o protocolo para a certificação selo Carne Carbono Neutro (CCN). O conceito CCN tem por objetivo fomentar a neutralização da emissão de metano entérico dos rebanhos de gado de corte brasileiro agregando valor a carne produzida. Já a certificação em si tem por objetivo atestar que os bovinos que deram origem a carne tiveram suas emissões de metano entérico compensadas durante o processo de produção pelo carbono estocado em árvores implementadas no sistema de produção. Para tanto os sistemas de produção de carne devem introduzir árvores em suas paisagens produtivas, se configurando então como sistemas de ILPF ou IPF (ALVES *et al.*, 2017).

Por fim, a Câmara dos Deputados aprovou, em 19 de novembro de 2024, o projeto de lei 182/24 que estipula um mercado regulado de carbono no Brasil e um mercado voluntário de títulos representativos de emissão ou remoção de GEE (CÂMARA DOS DEPUTADOS, 2024a). Em seguida, o presidente Luiz Inacio Lula da Silva, sancionou a lei 15.042/24 que regulamenta o mercado de créditos de carbono brasileiro, o Sistema Brasileiro de Comércio de Emissões de Gases de efeito Estufa (SBCE) (CÂMARA DOS DEPUTADOS 2024b). O SBCE,

permitirá a negociação de cotas brasileiras de emissão e de certificados de redução ou remoção verificada de emissões, porém, o setor agropecuário brasileiro ficará de fora da regulamentação (CÂMARA DOS DEPUTADOS, 2024a).

3.3. Balanço líquido dos fluxos de Carbono (C) em sistemas agropecuários de produção

De acordo com Soussana *et al.* (2010) e Soussana *et al.* (2019) o balanço líquido dos fluxos de C envolve a troca líquida de C entre o ecossistema e a atmosfera, que pode ser calculado a partir da soma das entradas, consideradas como sequestro/remoção/acúmulo/absorção/estoque de C inorgânico e orgânico, e saídas, consideradas como emissões e exportações brutas de C inorgânico e orgânico para o ecossistema, sendo, as entradas, convencionalmente positivas e as saídas negativas. Portanto, faz-se necessário definir os termos emissão, captura, sequestro, remoção, acúmulo, absorção, armazenamento e estoque de carbono, e apresentar os métodos de quantificação, para melhor compreensão dos processos em ecossistemas agropecuários. Neste tópico, buscou-se construir uma sequência lógica que aponte relações, semelhanças e divergências entre os termos.

3.3.1. Emissão de GEE

As emissões de GEE podem ser realizadas a partir de inventários das emissões de GEE ou pela pegada de carbono, que, segundo Wiedmann e Minx (2008), é uma medida da quantidade total exclusiva de emissões de dióxido de carbono que é direta e indiretamente causada por uma atividade ou é acumulada ao longo dos estágios de vida de um produto. A diferença entre os métodos está no foco e no escopo de cada análise. O inventário das emissões de GEE segue algumas metodologias específicas como o *GHG protocol* e ISO 14064 e fornece um reporte das emissões de todos os GEE de uma instituição. Já a pegada de C, um dos processos da Análise de Ciclo de Vida (ACV), é uma avaliação das emissões de GEE de todo o ciclo de vida de um produto ou de um processo produtivo, seguindo as metodologias ISO 14067 e PAS 2050.

Algumas calculadoras de emissão de GEE, como a *Cool Farm Tool* (CFT), não seguem as metodologias ISO e PAS porém são amplamente utilizadas por grandes empresas do setor

de alimentos, como a Nestlé, para contabilizar as emissões das atividades agropecuárias de seus fornecedores de recursos (NESTLÉ, 2024). A CFT, desenvolvida em 2008 através da parceria entre a Unilever e pesquisadores da Universidade de Aberdeen, calcula as emissões de GEE em diversos sistemas produtivos em nível de fazenda (COOL FARM ALIANCE, 2024). As medições quantitativas da ferramenta são baseadas em pesquisas empíricas e uma ampla gama de conjunto de dados e metodologias publicados pelo *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC) (COOL FARM ALIANCE, 2024).

Os inventários de emissões de GEE devem ser realizados a partir de limites e parâmetros bem definidos. Para tanto, existem 3 escopos de avaliação definidos pelo Protocolo de gases de efeito estufa (*GHG Protocol*). O escopo 1 são as emissões diretas de GEE provenientes de fontes que estão na propriedade avaliada ou estão sob controle da propriedade. O “escopo 2” refere-se as emissões relacionadas a produção ou consumo de energia elétrica, calor ou vapor pela propriedade. O “escopo 3” são todas as outras emissões indiretas, ou seja, relacionadas ao consumo de combustíveis e serviços adquiridos, emissões relacionadas ao consumo de combustível em veículos utilizados por terceiros em atividades relacionadas a propriedade, destinação de resíduos etc. (IPCC, 2014).

Outro aspecto necessário é a definição do nível de precisão (acurácia) dos dados do inventário definidos através da metodologia empregada. As emissões podem ser estimadas em 3 diferentes níveis de complexidades metodológicas: *Tier 1*, *Tier 2* e *Tier 3*. As metodologias consideradas *Tier 1* calculam as emissões de GEE a partir de valores *default* (padrão) fornecidos pelo IPCC. Estes valores apresentam incertezas ou foram quantificados em ecossistemas distintos, portanto, a precisão das estimativas de emissão de GEE ficam comprometidas em localidades onde não houve medições locais seguindo um método científico condizente com as condições edafoclimáticas regionais. Em países ou instituições que avançam em pesquisas e desenvolveram índices locais de emissão de GEE em seus sistemas produtivos e não dependem mais dos índices *default* é considerado que a instituição está utilizando o *Tier 2* ou *3* (MACHADO *et al.*, 2022).

3.3.2. Remoção, absorção, captura, sequestro, armazenamento e estoque de CO₂

Os termos remoção, absorção, captura, sequestro e armazenamento de CO₂, em suas definições, apresentam semelhanças, se referindo ao processo de conversão do CO₂ atmosférico em carbono orgânico através da reação química da fotossíntese. De acordo com American University (2020), a remoção de C ou remoção de CO₂ é um processo de captura de CO₂ da atmosfera e de bloqueio por décadas ou séculos em plantas, solos, oceanos, rochas, aquíferos

salinos, poços de petróleo esgotados e produtos de longa duração como o cimento. A remoção de CO₂, como descrito por Allwood *et al.* (2014), é o processo de remover o CO₂ diretamente da atmosfera aumentando os sumidouros naturais ou através da engenharia química.

A definição de sequestro apresentada por Allwood *et al.* (2014) é semelhante a definição de remoção:

“A absorção (ou seja, a adição de uma substância de preocupação a um reservatório) de substâncias contendo carbono, em particular dióxido de carbono (CO₂), em reservatórios terrestres ou marinhos. O sequestro biológico inclui a remoção direta de CO₂ da atmosfera por meio de mudança no uso da terra (LUC), florestamento, reflorestamento, revegetação, armazenamento de carbono em aterros sanitários e práticas que aumentam o carbono do solo na agricultura (manejo de terras agrícolas, manejo de pastagens) (ALLWOOD, 2014, p. 1271).”

A Convenção Quadro das Nações Unidas define sequestro de C como a absorção e armazenamento de carbono. Burras *et al.* (2001) aponta que o sequestro de C se refere ao armazenamento de C de uma forma sólida e estável e ocorre por meio de fixação direta e indireta de CO₂ atmosférico. A fixação direta de CO₂ pode ocorrer no solo, a partir de reações químicas inorgânicas que convertem CO₂ atmosférico em compostos de carbono inorgânico no solo, e na planta, através da fotossintetização do CO₂ atmosférico em biomassa vegetal. A fixação indireta se dá pela transformação da biomassa vegetal decomposta em carbono orgânico do solo. Segundo (UNFCCC, 2024) o sequestro de C ocorre através dos recursos naturais ou artificiais capazes de armazenar mais C do que liberar CO₂, denominados de sumidouros ou reservatórios. A definição de sequestro de carbono orgânico do solo, em inglês *Soil Organic Carbon Sequestration*, exposto por Olson (2013) traz, em confluência com as outras definições, a dimensão de um processo. Segundo o autor o sequestro de C é a transferência de CO₂ atmosférico para o solo por meio das plantas, resíduos vegetais e outros sólidos orgânicos armazenados ou retidos pela matéria orgânica do solo. O tempo de retenção do carbono sequestrado pode variar de curto prazo até por milênios.

Apesar de o termo captura de C ser usado também para se referir a remoção de carbono e captura e sequestro de carbono existem diferenças importantes entre os termos (INSTITUTE FOR CARBON REMOVAL LAW AND POLICY, 2020). De forma geral o termo captura de C está relacionado a qualquer processo que capture carbono, tanto da atmosfera quanto de uma chaminé (AMERICAN UNIVERSITY, 2020).

Já o termo “estoque de C”, segundo FAO (2005), é a quantidade de carbono em um reservatório ou sistema que tem a capacidade de acumular ou liberar carbono. A biomassa viva, a matéria orgânica morta e o solo são exemplos de reservatórios. Para contabilizar o estoque de C é necessário definir a produção primária, que pode ser contabilizada como Produção Primária

Bruta (PPB) e a Produção Primária Líquida (PPL). A PPB é a quantidade total de C fixado pela fotossíntese ao longo de um período específico. Já a PPL é a quantidade de carbono acumulada pela fotossíntese menos a quantidade perdida pela respiração da planta ao longo de um período especificado que prevaleceria na ausência de uso da terra (IPCC, 2019).

Em sistemas de IPF as remoções de C se dão primeiramente através do chamado sequestro de carbono pelos componentes vegetais do sistema. Neste processo bioquímico complexo as moléculas de clorofila das plantas capturam o CO₂ atmosférico e transforma-o em compostos orgânicos por meio da fotossíntese.

A unidade CO₂ equivalente (CO₂ eq.) geralmente é utilizada, pois resume o impacto a longo prazo dos três principais GEE emitidos em atividades antrópicas. Para expressar esses gases em CO₂eq. considera-se o Potencial de Aquecimento Global (PAG 100), um fator que descreve o impacto do forçamento radiativo (grau de dano à atmosfera) de uma unidade de determinado GEE relativamente a uma unidade de CO₂ (*GHG Protocol*), para 100 anos. De acordo com o PAG-100 – IPCC 1996, acordado no protocolo de Quioto, para fins de inventário das emissões de GEE o CO₂ equivale a 1 CO₂eq., o CH₄ a 21 CO₂eq. e o N₂O a 310 CO₂eq., enquanto cada unidade de C sequestrada equivale a 3,67 CO₂eq.

3.3.3. *Net zero, carbon neutrality*, carbono neutro, *carbon offset* e compensação de C

O termo *Net zero* ou *Carbon neutrality*, se refere a um país, empresa, processo etc., que não emite mais CO₂ do que captura. Existem duas formas de uma instituição ser carbono neutro; (1) se ela não emitir nenhum CO₂ e; (2) se ela remove a mesma quantidade de CO₂ emitida por seus processos (AMERICAN UNIVERSITY, 2020). Segundo IPCC (2018) o termo *net zero emissions* é um processo alcançado quando as emissões antropogênicas de CO₂ são equilibradas por remoções antropogênicas de CO₂ neste sentido supõe-se que é incoerente assumir o termo neutralidade se num processo de produção houver remoção de CO₂ mas a emissão está relacionado a outros gases de efeito estufa, como CH₄ e NO₂ e as remoções/drenos/sumidouros/sequestro de GEE das atividades antrópicas e do sistema solo-planta-animal desenvolvido em uma propriedade agropecuária num determinado período de tempo. Já segundo MACHADO *et al.* (2022) equilibrar a quantidade de carbono emitida na forma de CO₂ com a quantidade sequestrada ou removida da atmosfera alcançar a neutralidade é ser neutro em carbono ou “carbono zero”.

Para investigar a neutralidade de carbono em um sistema agropecuário é necessário realizar o cálculo do balanço de carbono, estimando as emissões, a captura e o armazenamento de C em um sistema produtivo (VIGLIZZO, 2023). De acordo com Oliveira *et al.* (2017, p. 27).

“Na agropecuária os balanços de emissões e remoções de GEE envolve a medição dos fluxos de CO₂, CH₄ e N₂O do sistema solo-planta-atmosfera, ou sistema de produção. A emissão de metano entérico (CH₄) emitido pelos animais e a taxa de sequestro de C do solo e da floresta plantada, todos expressos em CO₂eq. num determinado período, normalmente um ano são indicadores importantes em sistemas de integração pecuária-floresta.”

Em relação aos termos *carbon offset* ou compensação de carbono Allwood *et al.* (2014) conceitua-o como uma forma de compensar as emissões de GEE em uma localidade por meio da redução, evitação ou sequestro de C em outra localidade. O Climate Change Authority (2025), por sua vez, define a compensação de C como um tipo de crédito de carbono utilizado para compensar as emissões que ocorrem em outro local. Em uma abordagem distinta, Alves *et al.* (2015) utilizam o termo “compensação” para se referir a capacidade das árvores implantadas nos sistemas produtivos pecuários de sequestrar as emissões de CH₄ entérico na própria localidade do sistema produtivo.

4. METODOLOGIA

4.1. Caracterização do sistema de integração

O estudo foi realizado na Fazenda Santa Bárbara (Figura 2) localizada no município de Quirinópolis, Estado de Goiás, região Centro-Oeste do Brasil, bioma Cerrado (-18°21'51,3''S e 50°45'18,7''W). O clima é classificado como como Aw segundo critério de Köppen-Geiger, sendo tropical de savana com verão chuvoso e inverno seco bem definidos com precipitação média anual é de 1531 mm e temperatura média anual é de 24,3°C. A propriedade é especializada na produção de leite cru, obtido através da criação de bovinos leiteiros, e comercializado aos laticínios da região e possui uma área total de 48 ha.

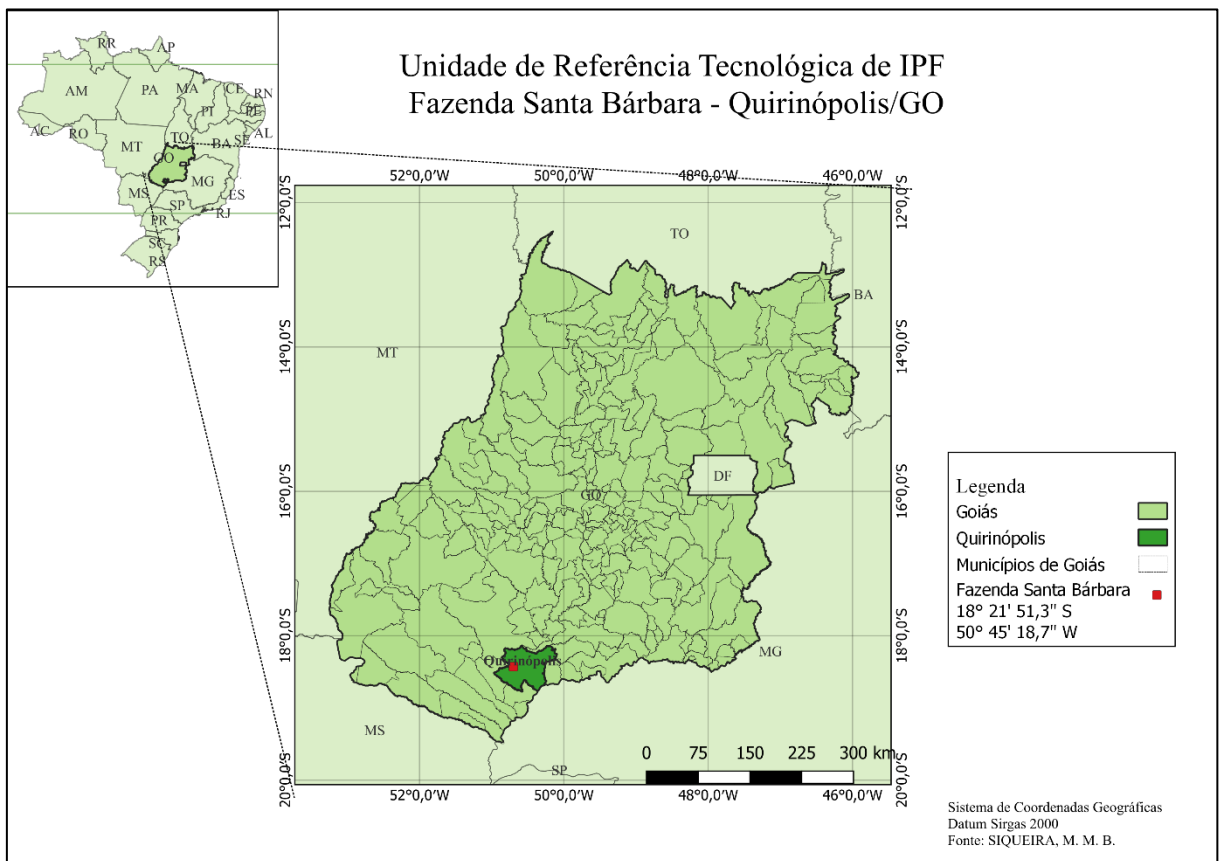
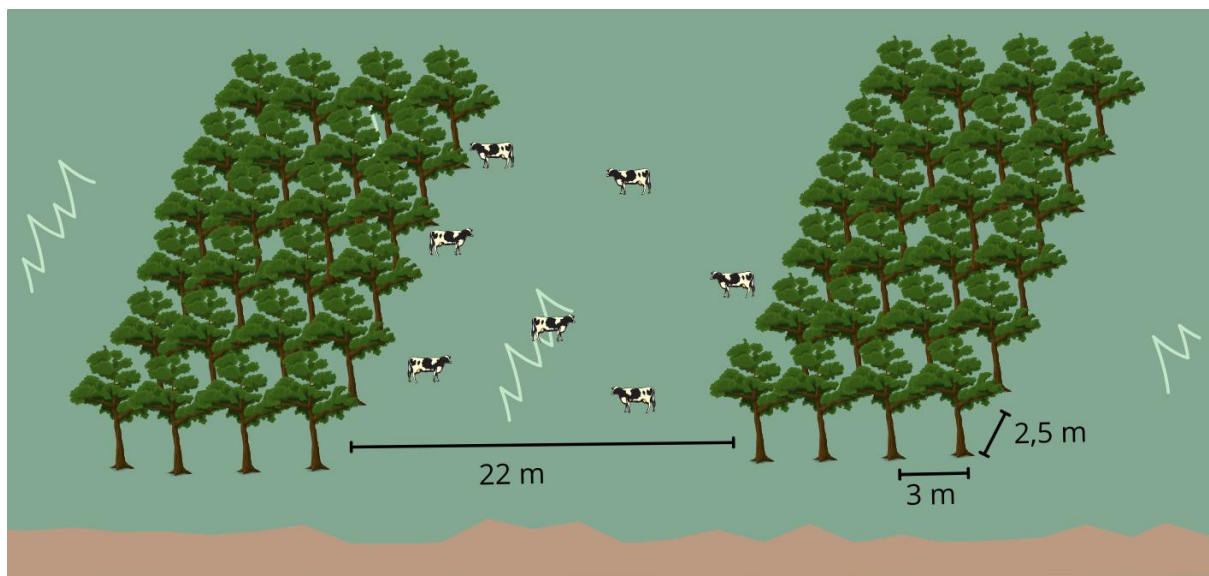


Figura 2. Localização geográfica do fazenda Santa Bárbara, município Quirinópolis, GO. Fonte: Autor

A propriedade implementou um IPF em fevereiro de 2016, em uma área de 3 ha de pasto capim Tanzânia *Megathyrus maximus* cv. Tanzânia. Nesta área de pastagem foram plantadas 1.548 árvores de eucalipto (*Corymbia citriodora* x *C. torelliana*, clone AEC 043) em renques de quatro linhas espaçadas de 3,0 m entre linhas, 2,5 m entre árvores e 22,0 m entre renques (Figura 3), conforme Pacheco *et al.* (2019), ocupando 39% da área destinada ao IPF. O objetivo principal é de fornecer sombra para as vacas em lactação e conseqüentemente o aumento de produtividade. As espécies de Eucalipto (*Corymbia* spp.) são comumente utilizadas em IPF e sistemas silvipastoris no Brasil e em outras áreas da América Latina. O solo onde IPF foi estabelecido é um latossolo arenoso, teor de argila ~ 22%, teor de silte ~4,2% e teor de areia ~73%. As amostragens de solo e o inventário florestal para quantificação de C foram realizadas na área de IPF durante os anos 2018 e 2024.




 *Corymbia citriodora* x *C. torelliana*, clone AEC 043

Figura 3 - Croqui com o arranjo do IPF. Fonte: Autor

Entre maio de 2019 e maio de 2020 a fazenda possuía um rebanho médio de 144 vacas mestiças leiteiras brasileiras (Holstein x Gir *Bos indicus*) com 50 vacas em lactação e produção média de 335 mil litros de leite no ano. Entre fevereiro de 2022 e fevereiro de 2023 a fazenda possuía um rebanho médio de 128 vacas mestiças leiteiras brasileiras (Holstein x Gir *Bos indicus*) com 51 vacas em lactação e produção média de 365 mil litros de leite no ano.

Para o plantio das mudas de árvores de eucalipto foi realizado o coveamento com uma coveadora motriz como medida de descompactação/revolvimento do solo a uma profundidade de média de 15cm. Na área destinada aos renques de árvores foram aplicadas 0,78 toneladas de calcário dolomítico em área total. As mudas foram fertilizadas com 150g de adubo Superfosfato Simplex em cada cova antes do plantio das mudas, após 30 dias foi aplicado 100g de N-P-K na formulação 20-00-20 por planta e ao final do período chuvoso foi aplicado 10g de ácido bórico (17% de boro) por muda. Com aproximadamente 24 meses foi feita uma desrama com o objetivo de aumentar a entrada de radiação no interior do sistema, visando um melhor desenvolvimento da espécie forrageira e garantir melhor da qualidade da madeira (madeira livre de nós).

Esta propriedade foi escolhida pois a área de IPF é uma Unidade de Referência Tecnológica (URT) de IPF estabelecida pela parceria entre a Agência Goiana de Assistência Técnica, Extensão Rural e Pesquisa Agropecuária (Emater-GO), a Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa), a Associação Rede ILPF e produtores rurais no município de Quirinópolis e ao longo dos anos vem sendo acompanhada por pesquisadores da Embrapa, Universidade Federal de Goiás e extensionistas da Emater-GO.

4.2. Ferramenta *Cool Farm Tool*

Para estimar as emissões de CO₂ eq. gerados pelas atividades relacionadas a produção de leite na fazenda Santa Bárbara, foi selecionada a ferramenta *Cool Farm Tool* (CFT) (Figura 4), desenvolvida em 2008 através da parceria entre a Unilever e pesquisadores da Universidade de Aberdeen, Escócia. A CFT foi escolhida por ser uma calculadora online de emissão de GEE em nível de fazenda, com abrangência mundial, de fácil manuseio, disponível em diversos idiomas, inclusive em português, e por apresentar um submódulo específico para a produção de “Laticínios” (Figura 5). Além do submódulo específico para laticínios a ferramenta também tem um submódulo específico para todas as culturas (Figura 6), batatas, arroz, pecuária de corte, outros animais e biodiversidade (COOL FARM ALLIANCE, 2024).

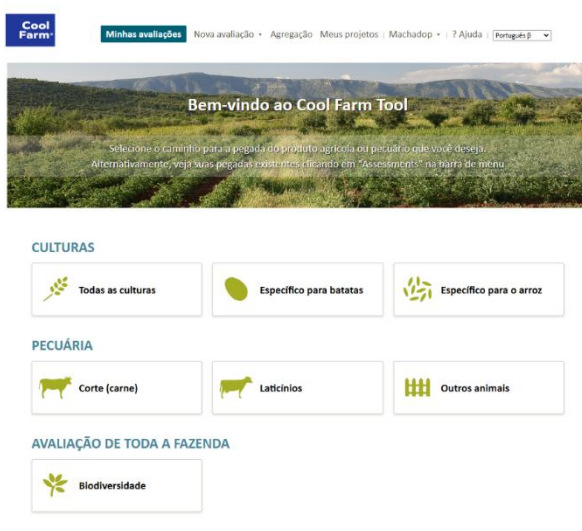


Figura 4 - Página inicial do site <https://app.coolfarmtool.org/> onde é feita a seleção dos submódulos específicos para o cálculo das emissões de GEE. Fonte: COOL FARM ALLIANCE (2024)

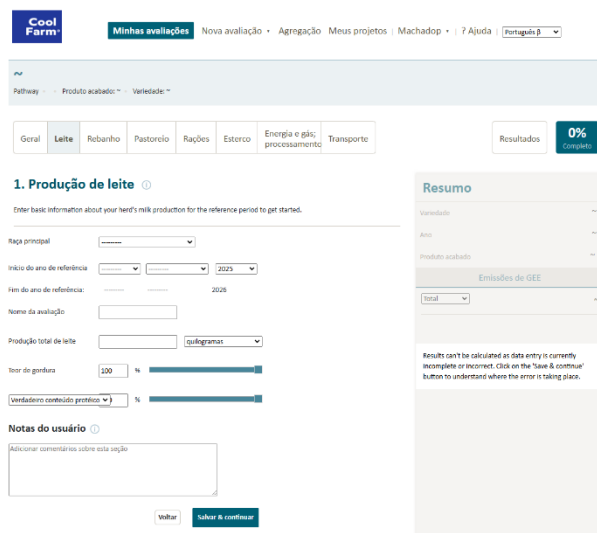


Figura 5 - Página inicial do submódulo laticínios da ferramenta *Cool Farm Tool* site <https://app.coolfarmtool.org/>. Fonte: COOL FARM ALLIANCE (2024)

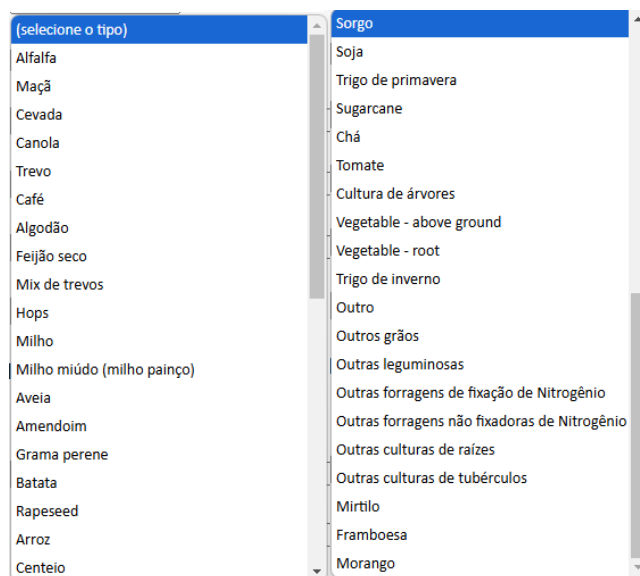


Figura 6 - Culturas passíveis ao cálculo de emissão de GEE pelo submódulo “todas as culturas” na CFT. Fonte: COOL FARM ALLIANCE (2024)

Ela é utilizada para medir, gerenciar e promover a redução das emissões de GEEs pela maioria das empresas multinacionais do setor de alimentos e bebidas do mundo. Ela é compatível com o *GHG Protocol* (fornece os padrões e orientações de contabilização de gases de efeito estufa mais amplamente utilizados no mundo), pois seus desenvolvedores buscam ser consistentes com o *Land Sector and Removals Guidance*, e pode ser usada para relatórios no âmbito da *Science Based Targets Initiative* (COOL FARM ALLIANCE, 2024).

As medições quantitativas da ferramenta são baseadas em pesquisas empíricas e uma ampla gama de conjunto de dados e metodologias publicados pelo *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC) (COOL FARM ALLIANCE, 2024). A ferramenta utiliza os Potenciais de Aquecimento Global para metano e óxido nitroso do Relatório de Avaliação 6 do IPCC e está alinhada com o padrão global de pegada de carbono da Federação Internacional de Laticínios para o setor de laticínios (2022) porém ainda não está certificada pela PAS2050 e ISO 14067:2018.

A ferramenta considera os 3 escopos estabelecidos pelo *GHG Protocol* (Quadro 5). No caso do CFT o escopo 3 é adotado para o cálculo das emissões de fertilizantes, pesticidas e transporte de mercadorias para a fazenda.

Quadro 5 - Escopos utilizados na ferramenta

Escopo	Tipos de emissões
Escopo 1:	Emissões diretas em sua fazenda (por exemplo, combustão de diesel, emissões de seu campo, emissões de seu gado)
Escopo 2:	Emissões indiretas de energia/eletricidade comprada (as emissões são produzidas em outro lugar, mas a energia é usada na fazenda)
Escopo 3:	Outras emissões indiretas (Emissões de outra empresa que fornece produtos ou serviços para suas operações).

Fonte: COOL FARM ALLIANCE (2024)

As emissões totais calculadas pelo CFT são expressas em kg de cada GEE relacionado a cada fonte de emissão de GEE da fazenda para o ano de referência e fornece o resultado em kg CO₂ eq. total emitido por fazenda para o ano de referência (Quadro 6). Em relação a avaliação de produção e qualidade do leite a ferramenta fornece valores de intensidade de emissão para a unidade de 1 kg de *Fat and Protein corrected milk* (FPCM), traduzido como leite com correção de proteína e gordura para toda a produção anual de leite e para cada fonte de GEE da produção. O FPCM permite comparações entre sistemas de produção de leite com diferentes raças ou regimes alimentares, considerando o conteúdo energético do leite padrão com 4,0% de gordura e 3,3% de proteína verdadeira. Desta forma é utilizada a (Equação 1) para calcular o FPCM, com base na produção de leite (P, kg/ano), a quantidade de gordura (Gordura %) e a quantidade de proteína verdadeira (Proteína Verdadeira %) (INTERNATIONAL DAIRY FEDERATION, 2015).

Quadro 6 - Fontes de GEE da propriedade

Fonte	GEE
Pastoreio	N ₂ O
Fertilização de pastagens	CO ₂ , N ₂ O
Produção de ração	CO ₂ , N ₂ O, CH ₄
Fermentação entérica	CH ₄
Manejo de Esterco	N ₂ O, CH ₄
Energia e processamento	CO ₂
Transporte	CO ₂

Fonte: COOL FARM ALLIANCE (2024)

$$FPCM = P \times (0,1226 \times \text{gordura}\% + 0,0776 \times \text{pv}\% + 0,2534) \quad (\text{Equação 1})$$

Em que:

FPCM é a *Fat protein and corrected milk*;

P é a taxa de produção de leite.

PV é proteína verdadeira.

4.3. Coleta de informações para o uso da CFT

Para inserir as informações na ferramenta os dados necessários foram coletados por meio de questionários estruturados nos meses de maio de 2020, sendo referente ao período de maio de 2019 a maio de 2020 (ANEXO A), e fevereiro de 2023, sendo referente a fevereiro de 2022 a fevereiro de 2023 (ANEXO B). Os questionários foram elaborados por pesquisadores da Embrapa Arroz e feijão, e aplicados a partir do projeto “Avaliação da intensificação sustentável de sistemas agropecuários integrados (ILPF) no Brasil” desenvolvido pela parceria entre Embrapa, Emater e *University of Nottingham* (Figura 7) (Anexo A e B). Os questionários foram avaliados pelos pesquisadores da Embrapa Arroz e Feijão e ajustados conforme os critérios de inclusão dos dados na ferramenta (CFT) (ANEXO C)

Responsável pela coleta dos dados:

1. Produção de leite

Introduza as informações básicas sobre a produção de leite do rebanho.

- 1.1. Raça predominante: _____ (Nome da raça e proporção do rebanho. Ex. Girolanda, 70%).
- 1.2. Início do ano de referência: _____ (Ex. 2020) (Pensar um período de produção que seja de acordo com o ciclo de vacas gestantes)
- 1.3. Produção de leite total anual (conferir registros com o/a produtor/a): _____
- 1.4. Percentagem média de gordura no leite: _____ %
- 1.5. Percentagem média de proteína no leite: _____ %

2. Rebanho

Preencha o número médio de animais na fazenda para o ano de referência, o número de animais vendidos e comprados.

Categoria	Animais na fazenda		Animais vendidos		Animais comprados	
	Nº de animais	Peso	Nº de animais	Peso	Nº de animais	Peso
Bezerros de leite (0-1 ano)						
Bezerros de carne (0-1 ano)						
Novilhas (1 ano até ao primeiro parto)						
Vacas de leite (vacas em lactação)						
Vacas secas (vacas que não estão em lactação)						
Enfermagem / amamentação de vacas						

Figura 7 – Página 1 do questionário elaborado por pesquisadores da Embrapa, e aplicados a partir do projeto “Avaliação da intensificação sustentável de sistemas agropecuários integrados (ILPF) no Brasil” desenvolvido pela parceria entre Embrapa, Emater e University of Nottingham

Os dados coletados através dos questionários foram inseridos na CFT e a ferramenta calculou uma quantidade de CO₂, CH₄ e N₂O emitido para cada fonte emissora na propriedade (Quadro 7). No resultado da CFT todos os gases são convertidos para CO₂ eq. utilizando o potencial de aquecimento global de 100 anos para metano e óxido nitroso.

Quadro 7 - Informações requeridas pela ferramenta

Categoria	Dados obtidos
Produção de leite	Raça Predominante, Produção de leite total anual, Porcentagem média de gordura no leite, porcentagem média de proteína no leite
Rebanho	Quantidade de animais na fazenda, vendidos e comprados no ano de referência por classe de rebanho (Bezerras, Bezerros, Novilhas, Vacas em lactação e Vacas secas) e os seus respectivos pesos médios.
Pastagem	Quantidade de dias por ano e horas por dia de pastejo pelos bovinos por classe de rebanho. Tipo de pastejo (confinado ou livre) e qualidade da pastagem (alta ou baixa)
Fertilização da Pastagem	Tipo de fertilizante, quantidade (kg/ha), área aplicada
Alimentação	Quantidade de alimento e tipo de alimento fornecido para cada classe de rebanho.
Energia e processamento	Tipo de energia utilizada e a quantidade consumida.
Transporte	Tipo de transporte, mercadoria transportada, peso da mercadoria e distância em km percorrida.

Fonte: COOL FARM ALLIANCE (2024)

A fim de distribuir as emissões de GEEs ao longo do período de desenvolvimento da IPF (fevereiro de 2016 a fevereiro de 2024), foi considerado, para os períodos de fevereiro de 2016 a fevereiro de 2022, anualmente, as emissões referentes ao período de maio de 2019 a maio de 2020, período considerado a partir da aplicação do primeiro questionário. Já para o período referente a fevereiro de 2022 a fevereiro de 2024 foi considerado, anualmente, as emissões referentes a segunda avaliação (fevereiro de 2023 a fevereiro de 2024) (Quadro 8).

Quadro 8 - Períodos de avaliação das emissões de GEE na fazenda Santa Bárbara

Ano	Período	Avaliação considerada
1	fev. 2016 a fev. 2017	mai. 2019 a mai. 2020
2	fev. 2017 a fev. 2018	mai. 2019 a mai. 2020
3	fev. 2018 a fev. 2019	mai. 2019 a mai. 2020
4	fev. 2019 a fev. 2020	mai. 2019 a mai. 2020
5	fev. 2020 a fev. 2021	mai. 2019 a mai. 2020
6	fev. 2021 a fev. 2022	mai. 2019 a mai. 2020
7	fev. 2022 a fev. 2023	fev. 2022 a fev. 2023
8	fev. 2023 a fev. 2024	fev. 2022 a fev. 2023

4.4. Determinação do estoque de C no solo do IPF

Para determinar os estoques de C no solo do sistema IPF foram coletadas amostras de solo em sete profundidades (0,0-0,1 / 0,1-0,2 / 0,2-0,3 / 0,3-0,4 / 0,4-0,6 / 0,6-0,8 / 0,8-1,0 m). As amostras foram coletadas no período chuvoso (fevereiro de 2020) em dezesseis trincheiras de um metro de profundidade, distribuídas em quatro áreas na fazenda: quatro no renque de árvores (IPF-R), quatro entre os renques de árvores (IPF-ER), quatro em área de mata nativa de Cerrado e quatro na pastagem de referência. Em cada área as trincheiras foram distanciadas 20 m uma da outra (Figura 8).

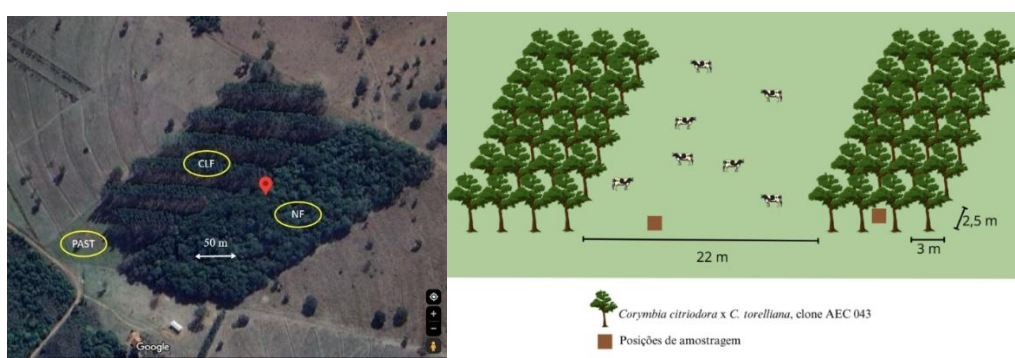


Figura 8 – (A) Sistema de integração pecuária-floresta (CLF), pastagem contínua (PAST) e mata nativa de Cerrado (NF) e (B) pontos de amostragem de solo dentro do renque das árvores e entre os renques de árvores no sistema de integração pecuária-floresta na Fazenda Santa Barbara. Fonte: Autores

As amostras de solo foram coletadas em duas paredes de cada trincheira nas sete profundidades: amostras indeformadas de solo com anéis volumétricos (cilindros de aço inox

com 5 cm de altura e 5 cm de diâmetro) para a determinação da densidade aparente do solo (DAS) e amostras deformadas de cerca de 500 g para determinação de conteúdo de C orgânico e análise textural (Figura 9). O solo sob pastagem contínua foi utilizado como referência para o status do solo antes da IPF. O solo sob mata nativa de Cerrado foi considerado como referência para área não antropizada. O solo das áreas foi caracterizado como franco-arenoso na camada superficial entre 0.0-0.3 m (198 g kg⁻¹ de argila; 770 g kg⁻¹ de areia); e franco-argilo-arenoso entre 0.3-1.0 m (247 g kg⁻¹ de argila; 722 g kg⁻¹ areia).



Figura 9. Trincheira de solo para coleta de amostras a fim de determinar a concentração de C e a densidade do solo em sistema integração lavoura-pecuária, na Fazenda Santa Barbara. Solo franco arenoso ou Argisol. Fonte: Autores, 2018.

As amostras de solo foram analisadas no Laboratório de Análise Agroambiental da Embrapa Arroz e Feijão, em Santo Antônio de Goiás. As amostras para o cálculo da densidade (D_s) foram secas em estufa por 48 h a 105 °C e foram determinadas como a razão entre a massa seca de solo contida no anel e o volume do anel (Equação 2).

$$D_s = \left(\frac{m_s}{V}\right) \quad \text{(Equação 2)}$$

Em que:

D_s é densidade do solo calculada considerando a amostra com estrutura indeformada, em g cm⁻³;

m_s é massa de solo seco mesmo deformado ou compactado após centrifugação (massa da amostra mais a massa do anel, após secagem em estufa a 105 °C até atingir peso constante, subtraídas da massa do anel vazio, limpo e seco), em g;

V é o volume do cilindro, que corresponde ao volume original da amostra indeformada, em cm^{-3} .

O C orgânico (Corg) no solo foi determinado por via úmida pela oxidação com o dicromato de potássio (Walkey-Black). Tendo em vista os diferentes níveis de compactação em cada classe de uso do solo, a média da densidade do solo em cada uma das 7 profundidades na área de referência, a pastagem contínua, foi considerada como padrão para o cálculo dos estoques de C para cada camada (ELLERT & BETTANY, 1995). Os estoques de Corg foram calculados considerando a massa de solo equivalente em $Mg\ ha^{-1}$ para três camadas: 0,0-0,3 m, 0,3-1,0 m e 0,0-1,0 m (SISTI *et al.*, 2004) (Equação 3).

$$\text{Estoque Corg} = (D_s * \text{camada (cm)} * 1ha * (C\%/100)) \quad (\text{Equação 3})$$

Em que:

D_s : é a densidade do solo;

C: é a porcentagem de C na camada.

A análise estatística dos estoques de C foi realizada utilizando o procedimento de modelo linear misto (Proc MIXED) do software estatístico SAS/STAT® considerando o teor de argila em cada profundidade do solo como covariável: (1) acima de 20% e (2) igual ou inferior a 20%. O teste de Dunnett foi aplicado para comparar se havia diferenças significativas entre pastagem referência, sistema IPF e mata nativa de Cerrado.

As magnitudes de incremento ou perda de C no solo em relação a pastagem de referência foram consideradas apenas para a área de ocupação de cada localidade avaliada (IPF-R e IPF-ER). Desta forma, o valor encontrado na IPF-R em $Mg\ ha^{-1}$ foi multiplicado por 3, referente a área da IPF em ha, e multiplicado por 0,39, referente a porcentagem da área de IPF ocupada pelo componente arbóreo. O valor encontrado na IPF-ER também foi multiplicado por 3, referente a área da IPF em ha, e multiplicado por 0,69, referente a porcentagem da área de IPF ocupado pela pastagem. Para o cálculo das taxas anuais de incremento e perda de C no solo em relação ao pasto de referência, o estoque total de C foi dividido por 4, referente a idade, em anos, do IPF até o momento da coleta do solo. Esse valor de incremento foi considerado como constante (fixo) para todo o período de análise.

4.5. Determinação do estoque de C no tronco das árvores do IPF.

Para determinar a capacidade de compensação das emissões de CO₂ eq. da produção de leite da fazenda Santa Barbara foram consideradas as taxas de crescimento do povoamento florestal do IPF de 1548 árvores de Eucalipto clone AEC 043 – *Corymbia citriodora* x *Corymbia torelliana*. Para tanto foram considerados os dados de inventários florestais realizados em setembro de 2018, 32 meses após o plantio, e em julho de 2024, 101 meses após a implementação.

Para os inventários foram mensuradas o diâmetro a altura do peito (DAP), através da suta, de 100 árvores e as alturas totais de 40% das alturas, utilizando o clinômetro eletrônico Haglof (Figura 10). O método de amostragem foi sistemático onde mensurou-se a primeira árvore de cada linha de plantio e a partir dessa árvore, foi adotado um espaçamento amostral, onde a cada árvore medida, quatro árvores subsequentes na mesma linha foram ignoradas (ou seja, não foram mensuradas), e a árvore da linha subsequente foi mensurada, como apresentado na Figura 11. Esse procedimento permitiu uma distribuição homogênea das amostras, assegurando que toda a área do plantio fosse adequadamente representada. As alturas não mensuradas foram estimadas utilizando o modelo de modelo de Curtis (Equação 4).



Figura 10. Mensuração do DAP das árvores de eucalipto em IPF na fazenda Santa Barbara aos 101 meses após o plantio. Fonte: Elaborado pelo autor.

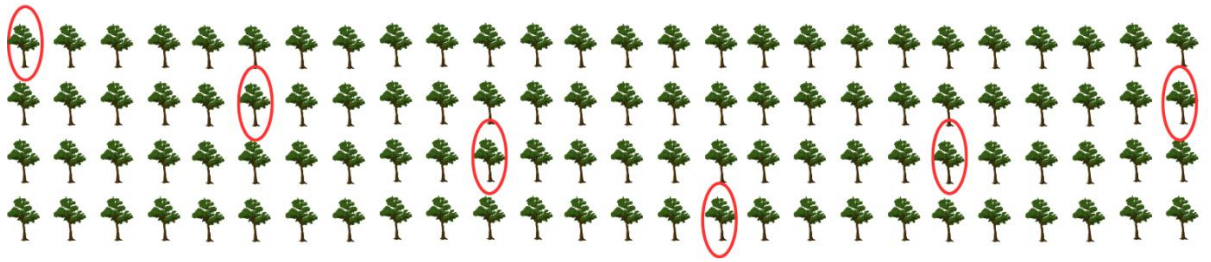


Figura 11. Método de amostragem sistemática realizada para inventário florestal na Fazenda Santa Bárbara. Fonte: Autor.

$$\ln(H) = b_0 + b_1 * (1/DAP) \quad (\text{Equação 4})$$

Em que:

H é a altura;

b0 é o coeficiente de intersecção;

b1 é o coeficiente da variável X 1;

DAP é o diâmetro a altura do peito

Para estimar a biomassa do tronco das árvores por ha (B) inicialmente é necessário calcular o volume individual médio das árvores (Vi) (Equação 5).

$FPCM = P \times 0,1226 \times \text{gordura}\% + 0,0776 \times \text{pv}\% + 0,2534$ (Equação). As equações foram aplicadas para os dados dos inventários realizados aos 32 meses e aos 101 meses após a implementação do IPF.

$$\text{Volume individual}(Vi) = (\pi * \left(\frac{DAP^2}{40000}\right) * H) * 0,55 \quad (\text{Equação 5})$$

Em que:

$\pi = 3,1415...$

DAP é o diâmetro a altura do peito;

H é a altura;

0,55 é o fator de forma.

Para o cálculo do Volume total de madeira do IPF (V) multiplicou-se o Vi pelo número total de árvores do IPF (Equação 6)

$$\text{Volume total médio} = Vi * 1548 \quad (\text{Equação 6})$$

Em que:

Vi é o volume individual médio;

1548 é o número total de árvores que compõem o IPF.

Para a determinação da densidade básica da madeira (DBM) (kg m^{-3}) foi considerado o estudo de Velozo (2021) realizado em área próxima (Inaciolândia-GO) com árvores de mesmo clone onde foram seccionados discos do lenho correspondentes a 0% (base), DAP, 25%, 50%, 75% e 100% da altura comercial do fuste (diâmetro mínimo de 6 cm). Em laboratório realizou-se o método hidrostático preconizado na NBR 11941/2003 (ABNT, 2003) resultando em 520 kg m^{-3} .

Para calcular a biomassa (B) do tronco das árvores por ha foram utilizados o volume total (V) e a densidade básica da madeira (DBM) (Equação 7).

$$\text{Biomassa arbórea acima do solo (B)} = V \times \text{DBM} \quad (\text{Equação 7})$$

Em que:

V é o Volume total do IPF;

DBM é a densidade básica da madeira.

Para calcular o teor de carbono (C) estocado no tronco das árvores, multiplicou-se a B (kg m^{-3}) pelo teor 0,5 de carbono contido na biomassa da madeira, como é o recomendado por IPCC (2006) (Equação 8).

$$\text{Carbono estocado na biomassa (C)} = B \times 0,5 \quad (\text{Equação 8})$$

Em que:

B é a biomassa do tronco das árvores;

0,5 é o teor de carbono contido na biomassa da madeira.

O estoque médio mensal de C (EMMc), considerado como as taxas de C acumulados por mês desde a implementação do IPF, foi calculado para dois momentos. Para o primeiro momento dividiu-se o C calculado aos 32 meses por 32 (idade das árvores em meses no primeiro inventário florestal) (Equação 9).

$$\text{Estoque médio mensal de C 1 (EMMc1)} = (C1/32) \quad (\text{Equação 9})$$

Em que:

C1 é o carbono estocado no tronco das árvores aos 32 meses;

32 é a idade das árvores em meses no primeiro inventário florestal;

Já o segundo momento (EMMc2), referente ao período entre o primeiro e o segundo inventário, subtraiu-se o C aos 101 meses pelo C aos 32 meses, resultando no C após o primeiro inventário, e dividiu-se por 69, que são a quantidade de meses entre o primeiro e o segundo

inventário (Equação 10). Desta forma foi possível avaliar o estoque de C mensal do povoamento florestal.

$$\text{Estoque mensal de C 2 (EMMc2)} = (C2 - C1)/69 \quad (\text{Equação 10})$$

Em que:

C2 é o carbono estocado na biomassa do tronco das árvores aos 101 meses;

C1 é o carbono estocado na biomassa do tronco das árvores aos 32 meses;

69 é a quantidade de meses entre o primeiro e o segundo inventário

Para o cálculo da captura média mensal de CO₂ eq. para 1 e 2 (CMMco₂ 1 e 2) multiplicou-se os resultados mensais de EMAC1 e EMAC2 por 3,67 obtido em função dos pesos moleculares do carbono e do CO₂ (RÜGNITZ *et al.*, 2009) (Equação 11).

$$\text{Captura Média Mensal de CO}_2 \text{ eq. (CMMco}_2 \text{ eq.)} = \text{EMMc} \times 3,67 \quad (\text{Equação 11})$$

Em que:

EMMc é o estoque médio mensal de C;

3,67 é a conversão em função dos pesos moleculares do carbono e do CO₂.

Os resultados de CMMco₂ 1 foram distribuídos ao longo dos 32 meses iniciais e o CMMco₂ 2 ao longo dos 69 meses restantes. Posteriormente foram agrupados em anos, a partir de fevereiro de 2016 até fevereiro de 2024, desta forma é possível analisar o comportamento da captura de CO₂ ano a ano.

4.6. Compensação de C da produção de leite

Para quantificar a compensação de C (Mg), a emissão total média estimada pela CFT foi calculada considerando o peso molar de C (12 g mol⁻¹) em uma molécula de CO₂ (44 g mol⁻¹). Todas as avaliações realizadas no IPF que compõem este estudo estão descritas na linha do tempo apresentada na Figura 12.

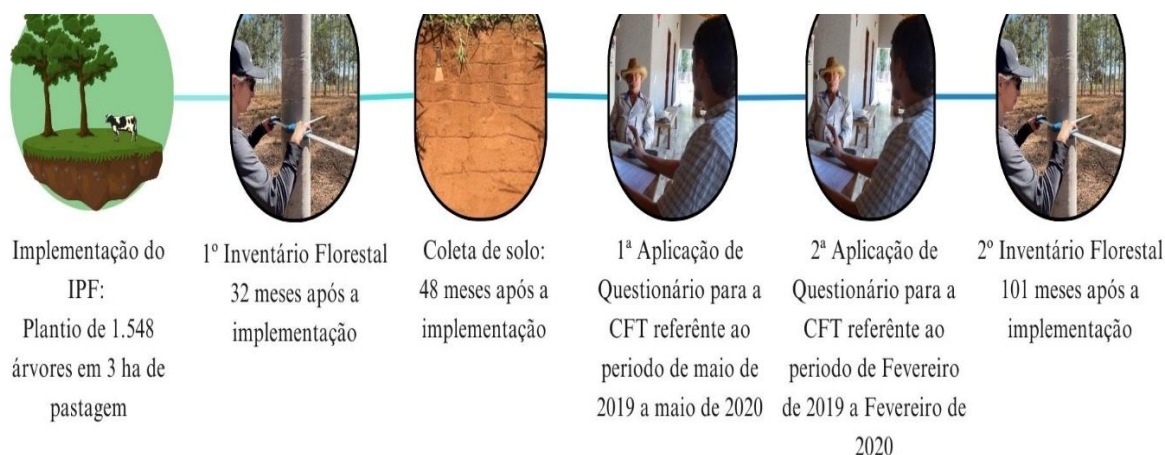


Figura 12. Linha do tempo de todas as avaliações realizadas no IPF e no sistema de produção de leite da Fazenda Santa Barbara. Fonte: Autor.

A compensação de Carbono foi estimada a partir dos dados de estoque de C no solo de amostras coletadas em fevereiro de 2020, emissões totais de GEE ($\text{CO}_2\text{-eq Mg}$) estimadas para os períodos de 2019-2020 e 2022-2023 e estoques de C (Mg ha^{-1}) em árvores de eucalipto a partir da mensuração em dois momentos, um aos 2 anos de idade (2018) e outro aos 8 anos (2024). Para tanto os estoques de C foram convertidos em acúmulo de CO_2 eq. e distribuídos a partir da data de implementação do IPF, de fevereiro de 2016 a fevereiro de 2024.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1. Emissões de GEE e CO_2 eq. da produção de leite

A fim de estimar as emissões GEE da produção de leite pela fazenda Santa Barbara, inicialmente os questionários aplicados foram avaliados e transcritos de forma descritiva (ANEXO C).

O resultado de emissões totais de GEE pela Fazenda Santa Barbara estimadas para o período de 2019-2020 foi de 326,55 Mg CO_2 eq. e para o período 2022-2023 foi de 267,37 Mg CO_2 eq. (Tabela 1). Já a intensidade de emissão foi de 0,93 kg CO_2 eq./ kg FPCM para o período 2019-2020 e 0,69 kg CO_2 eq./ kg FPCM para 2022-2023 (Tabela 1). Segundo FAO & GDP (2018) a emissão média global da produção, processamento e transporte do leite do berço até a porteira é de 2,5 kg CO_2 eq. / kg FPCM variando entre 1 e 2 kg CO_2 eq. / kg FPCM em países industrializados até 7 kg CO_2 eq. / kg FPCM na África Subsaariana.

Tabela 1 - Emissões de GEE por setor da fazenda e por GEE nos períodos de 2019-2020 e 2022-2023

Componentes da produção	CO ₂ (ton)		N ₂ O(ton)		CH ₄ (ton)		Total CO ₂ eq. (Ton)		kg CO ₂ eq. por kg FPCM.	
	2019-2020	2022-2023	2019-2020	2022-2023	2019-2020	2022-2023	2019-2020	2022-2023	2019-2020	2022-2023
Pastoreio	0,000	0,000	0,009	0,005	0,000	0,000	2,320	1,470	0,010	0,000
Fertilização de pastagens	18,060	7,930	0,090	0,042	0,000	0,000	42,640	19,310	0,120	0,050
Produção de ração	92,250	80,520	0,053	0,037	0,058	0,032	108,410	91,400	0,310	0,240
Fermentação entérica	0,000	0,000	0,000	0,000	4,930	4,700	137,540	131,210	0,390	0,340
Manejo de esterco	0,000	0,000	0,030	0,019	0,042	0,038	9,430	6,280	0,030	0,020
Energia e processamento	0,741	5,370	0,000	0,000	0,000	0,000	0,742	5,370	0,000	0,010
Transporte	25,470	12,330	0,000	0,000	0,000	0,000	25,470	12,330	0,070	0,030
TOTAL	136,521	106,150	0,182	0,097	5,030	4,790	326,552	267,370	0,930	0,690

Fonte: Autor.

Na região sul do Brasil as emissões calculadas por kg de FPCM variaram de 0,535 a 1,2 kg CO₂ e em sistema de confinamento, 0,778 kg CO₂ eq. kg para o sistema semiconfinado e entre 0,738 e 1,7 kg CO₂ e para o sistema baseado em pastagem (DE LÉIS *et al.*, 2015; OLSZENSVSKI, 2011). Em sistema semiconfinado na Zona da Mata de Minas Gerais PAULA (2022) calculou emissões de 1,43 kg CO₂ eq. /kg FPCM e em sistema semiconfinado no Centro-oriental do Paraná 1,29 kg CO₂ eq. /kg FPCM. Em sistema de produção semi-intensiva com vacas mestiças no Nordeste do Brasil Carvalho *et al.* (2021) relataram um valor de 1,42 kg CO₂ eq. (kg FPCM)⁻¹.

Em relação as fontes emissoras de GEE a emissão entérica é a principal emissora de CH₄ e CO₂ eq., sendo responsável por 42% das emissões totais de CO₂ eq. no período de 2019 a 2020 (137,54 Mg CO₂ eq.⁻¹) (Figura 13) e 49% no período de 2022-2023 (131,210 Mg CO₂ eq.⁻¹) (Figura 14). Em várias regiões do mundo a fermentação entérica é a maior responsável pelas emissões, representando em média 39% a 49% das emissões totais de uma fazenda

(O'BRIEN et al., 2014; DE LÉIS et al., 2015; GUYADER et al., 2017; ROTZ, 2018 WOLF et al., 2017).

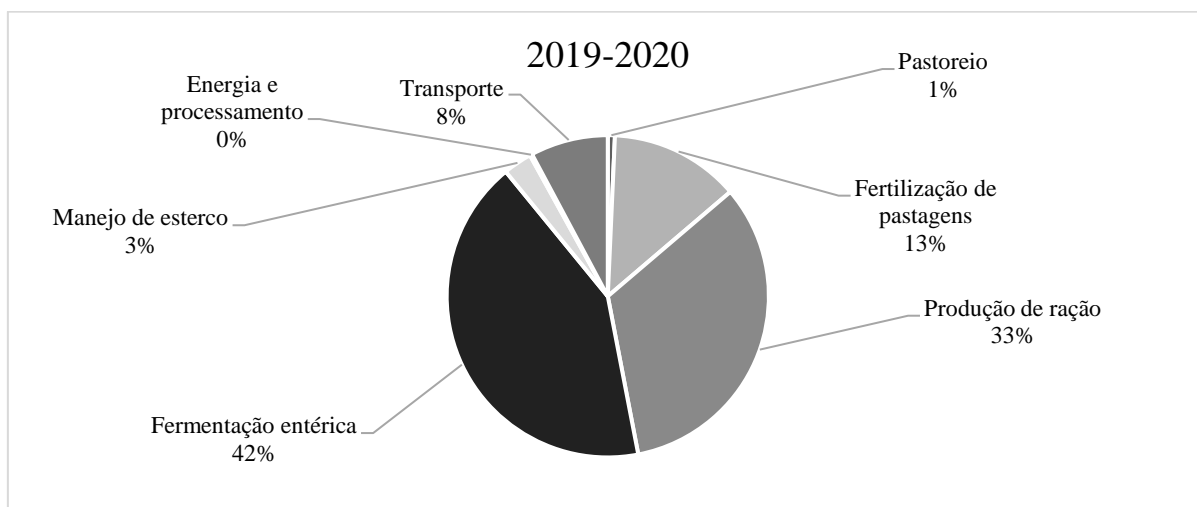


Figura 13. Participação das fontes emissoras na emissão total da fazenda no período de 2019-2020. Fonte: Autor.

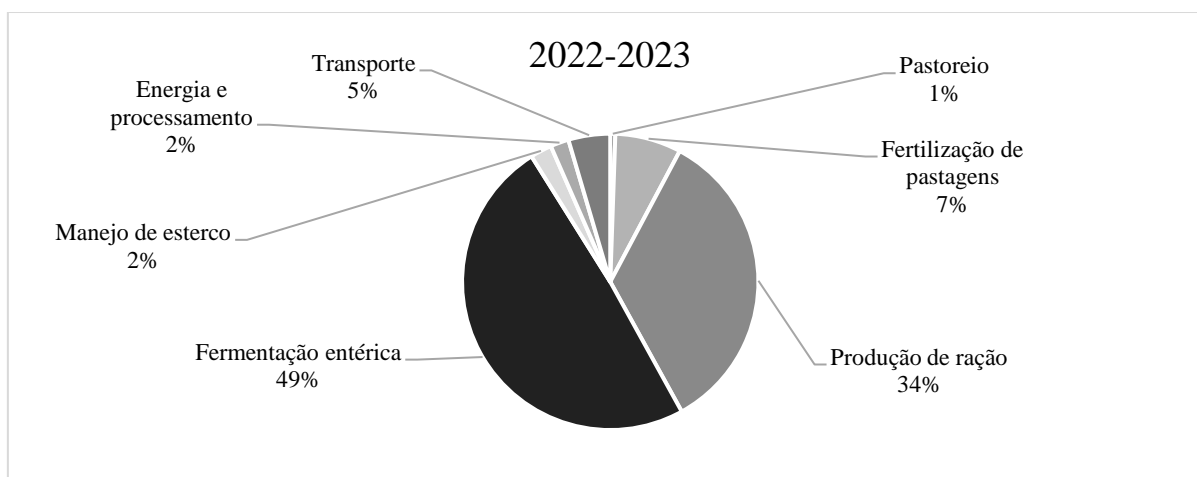


Figura 14. Participação das fontes emissoras na emissão total da fazenda no período de 2022-2023. Fonte: Autor.

A fermentação entérica é um processo natural da digestão dos ruminantes, onde micróbios fermentam e decompõem o alimento presente no trato digestivo, gerando energia e proteína para o animal além de emitir metano. O metano é o segundo gás com efeito estufa mais abundante com o potencial de aquecimento 21 vezes maior que o CO₂. Além disso, o metano representa de 2 a 12% de energia bruta perdida pela digestão que poderia ser convertida em aumento de produtividade (HEILIG, 1994; STEINFELD *et al.*, 2006).

Existem várias estratégias para a redução das emissões do metano entérico que, ao mesmo tempo, aumentam a produtividade animal, porém são caras e causam riscos à saúde humana e ao ambiente. As estratégias estão relacionadas a manipulação da dieta através da composição da ração, uso de aditivos, como probióticos, uso de ionóforos, inibidores de

metanogênese, óleos essenciais, aditivos orgânicos adicionais e entre outros (TSETEN *et al.*, 2022).

A segunda maior fonte de emissões de CO₂ eq. foi a produção de ração, responsável por 33% das emissões no período de 2019-2020 (Figura 13) e 34% no período de 2022-2023 (Figura 14). Como o apresentado por De Léis *et al.* (2014), o impacto das emissões relacionadas a alimentação é provavelmente devido as emissões de N₂O do ciclo do nitrogênio pelo uso de fertilizantes químicos e ao CO₂ fóssil emitido pela queima de combustível na colheita e transporte na produção de grãos e fertilizantes. Uma estratégia para redução das emissões relacionadas a alimentação é o cultivo dos alimentos consumidos na fazenda, ou o aumento da eficiência de conversão alimentar através de genéticas mais produtivas e a melhoria na digestibilidade do alimento.

A diferença mais expressiva entre as fontes foi a fertilização de pastagens, que em 2019-2020 houve a participação em 13% das emissões (Figura 13) e em 2022-2023 apenas 7% (Figura 14). Esta diferença se deu devido ao montante de fertilizantes nitrogenados que foram aplicados no período de 2019-2020 comparado a 2022-2023. Os fenômenos emissores de GEE relacionados aos fertilizantes são a nitrificação e desnitrificação do nitrogênio aplicado no solo. A nitrificação é um processo aeróbico que oxida o amônio (NH₄) para nitrato (NO₃), produzindo óxido nítrico (NO) e nitrato (NO₃) como intermediários, e a desnitrificação é um processo microbiano que reduz o (NO₃) para N₂. Dependendo da condição do solo esse processo pode produzir também NO e N₂O, um gás de efeito estufa 300 vezes mais potente que o CO₂ que contribui para aproximadamente 6% do efeito total dos gases de efeito estufa (ROTZ, 2018; WENDEBORN, 2020).

As atividades de transporte, manejo do esterco, energia e processamento e pastoreio somadas representaram 12% no período de 2019-2020 (Figura 13) e 10% em 2022-2023 (Figura 14).

5.2. Estoque de C no solo da IPF

Os estoques de C orgânico do solo (Corg) foram relativamente baixos, independente das áreas com diferentes usos, algo esperado para solos com alto teor de areia em sua composição, como aponta OLIVEIRA *et al.* (2023). Os teores variaram entre 65 e 88 Mg ha⁻¹ na camada de solo até 1,0 m, teores mais baixos do que os limites encontrados para solos do cerrado por

OLIVEIRA *et al.* (2023). Aproximadamente 50% do estoque de C está concentrado na camada de 0,0-0,3 m (31 a 47 Mg ha⁻¹) (Figura 15).

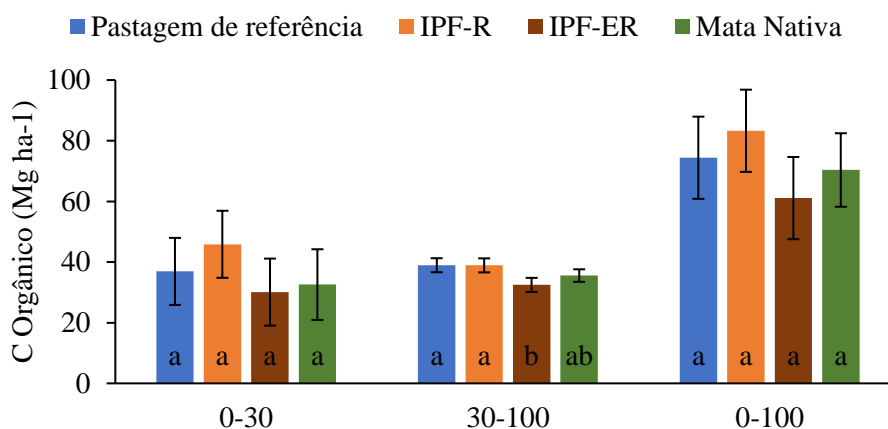


Figura 15. Estoques de C org (Mg ha⁻¹) em sistema de integração lavoura-pecuária (IPF) de 4 anos de idade: sob os renques de árvores (IPF-R) e pastagem entre renques (IPF-ER), e sob a área de pastagem contínua e mata nativa de Cerrado em três camadas de solo (0,0–0,3 m, 0,3–1,0 m e 0,0–1,0 m) de um Latossolo Arenoso, em Novembro de 2020, na Fazenda Santa Barbara, em Quirinópolis-GO. Colunas com letras diferentes são significativamente diferentes da pastagem contínua, Teste de tukey-kramer ($p < 0.05$), considerando a porcentagem de argila como covariável. A barra de erros representa o erro padrão da média ($n = 4$).

O C org das áreas de IPF não apresentou diferença significativa em relação a pastagem de referência. Entre as possíveis razões para a não diferenciação pode ser mencionado que a amostragem foi feita apenas 4 anos após a implementação das árvores em área de pastagem já consolidada, e a partir do histórico de manejo do local, a área de não passou por nenhum manejo específico visando a melhoria da qualidade da forragem.

Comparando os estoques de C entre a pastagem de referência e os componentes do IPF (IPF- Renque de Árvore e IPF- Entre Renque), no ano de 2020, 4 anos após a implementação do IPF, nos 30 cm superiores, não houve diferença significativa entre os tratamentos analisados. Porém, em relação a magnitude da diferença entre os estoques de C nos diferentes usos do solo, na camada 0,0-0,3 m, o renque de árvores (IPF-R) apresentou 9 Mg ha⁻¹ mais C do que na pastagem de referência, representando uma taxa de acúmulo anual de 2,25 Mg ha⁻¹ ano⁻¹., oposto ao encontrado por Madari *et al.* (2024), em estudo conduzido em ILPF com 3 anos, na mesma região em um Latossolo vermelho argiloso, onde encontrou estoque menor do que na pastagem de referência. Já a pastagem entre renques (IPF-ER) (Figura 15) apresentou um estoque de C menor do que na pastagem de referência em 7 Mg ha⁻¹ o que representa uma taxa de perda de 1,75 Mg ha⁻¹ ano⁻¹, estando próximo ao resultado encontrado por Madari *et al.* (2024).

Era esperando que as taxas de C aumentassem na camada 0,3-1,0 m no IPF-R devido as raízes do eucalipto acessarem camadas mais profundas do solo em áreas recentemente

plantadas, como descrito por Madari *et al.* (2024). No entanto, na camada de 0,3-1,0 m, somente o tratamento IPF-ER apresentou diferença estatística em relação ao estoque de C, apresentado uma taxa de 6,48 Mg ha⁻¹ de C a menos do que a pastagem de referência, o oposto ao encontrado por Madari *et al.* (2024). Já o IPF-R, apesar de não apresentar diferença estatística, apresentou o mesmo estoque de C do que a pastagem de referência (Figura 15), resultado diferente ao encontrado por Oliveira *et al.*(2018), em estudo conduzido no norte de Mato Grosso, região sul do Bioma Amazônico, em um Latossolo Caulinitico, onde encontrou-se taxas de acúmulo de C nas camadas de 0,3-1,0m nas fileiras de árvores ao longo dos anos em comparação com a pastagem degradada.

Na camada até 1m, o Corg em nenhum dos tratamentos apresentou diferença significativa em relação a pastagem de referência, semelhante ao encontrado por Madari *et al.* (2024). Neste sentido, Fialho e Zinn (2014), ao compilar estudos sobre estoques de Corg em vegetação nativa e em plantios de eucaliptos nos trópicos, apontam que os plantios de eucalipto podem ou não ter efeito líquido sobre os estoques de Corg no solo, podendo variar de acordo com o clima, solo, preparo de solo, manejo florestal e idade do povoamento. Em relação a magnitude da diferença do conteúdo de Corg na camada até 1m, apenas o IPF-R apresentou estoque de C com valores acima da pastagem de referência em 9 Mg ha⁻¹, o que representa uma taxa de acúmulo anual de 2,25 Mg ha⁻¹ ano⁻¹. Já para IPF-ER, a magnitude da diferença entre a pastagem de referência apresentou perdas de C em 13 Mg ha⁻¹ representando uma taxa de perda anual de 3,25 Mg ha⁻¹ ano⁻¹ (Figura 16).

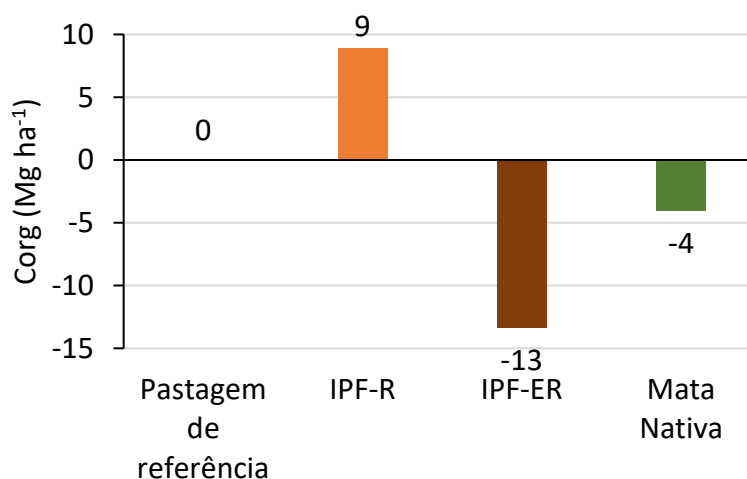


Figura 16. Acúmulo de Corg (Mg ha⁻¹) nos componentes de um IPF: sob os renques de árvores (IPF-R) e pastagem entre renques (IPF-ER), sob a área total de IPF; na mata nativa e na pastagem de referência não cultivada na camada de (0,0–1,0 m) de um Latossolo Arenoso, 4 anos. Fonte: Autores.

5.3. Estoque de C no tronco das árvores do IPF

5.3.1. Características dendrométricas

O diâmetro médio das árvores aos 32 meses de idade foi de $9,5 \pm 1,8$ onde 31% das árvores estão presentes na classe entre as classes de 7,2 e 8,7 cm (Figura 17A). O DAP médio encontrado está próximo ao encontrado por Carvalho *et al.* (2022) em um IPF de 29 meses com densidade de 400 árvores ha^{-1} no município de Garanhuns, PE. Já aos 101 meses o diâmetro médio das árvores foi de $21,2 \pm 4,33$ onde 39% das árvores estão entre as classes de diâmetro de 18,7 cm e 27,2 cm (Figura 17B). A altura média das árvores aos 32 meses foi de $10,7 \pm 1,5$ m tendo como altura mínima 6,9 m, a máxima de 14 m. Aos 101 meses o diâmetro médio das árvores foi de $21,2 \pm 4,3$ cm. A altura média das árvores aos 101 meses foi de $25,6 \pm 2,6$, tendo como altura mínima 18,5 m e máxima 30,8 m. Velozo (2021) ao avaliar o mesmo clone em um IPF com densidade de 485 árvores/ha, em município próximo ao do estudo aos 4 anos observou um diâmetro médio de 16,92 cm e altura média de 14,62.

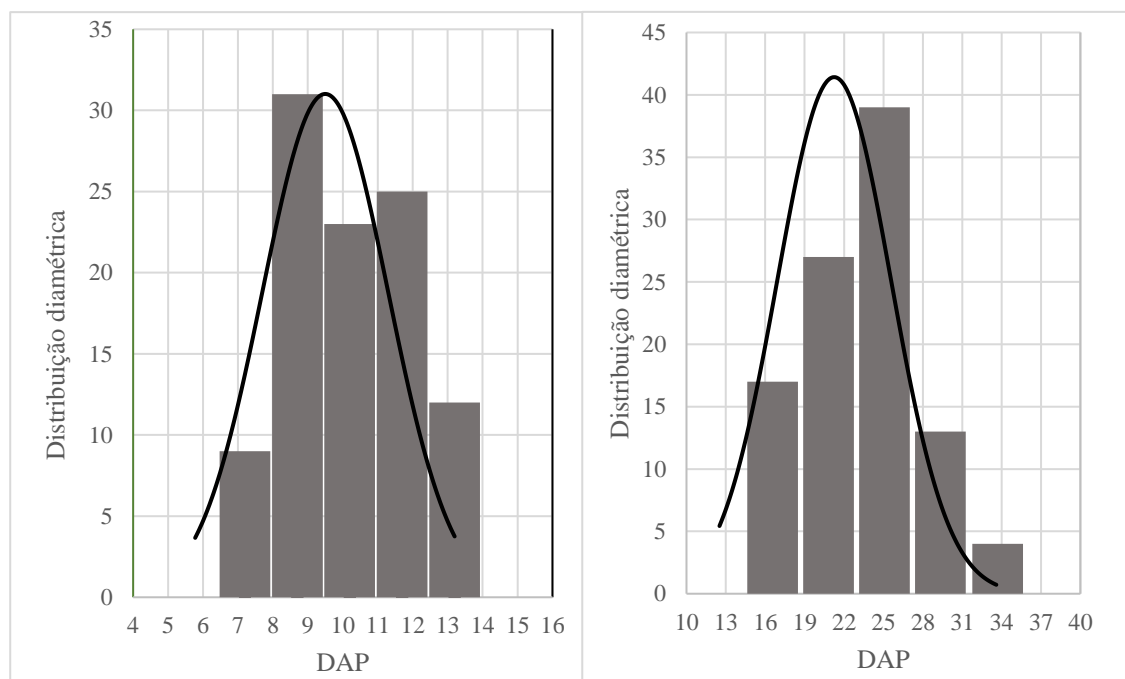


Figura 17. (A) Distribuição diamétrica das árvores aos 32 meses e (B) Distribuição diamétrica das árvores aos 101 meses

5.3.2. Estimativa do estoque médio anual de carbono e CO_2 eq. no tronco das árvores

As taxas de biomassa do tronco das árvores por hectare no IPF, aos 32 meses foi de $12,046 \text{ Mg ha}^{-1}$, um pouco abaixo ao encontrado por da Silva (2021) ($13,55 \text{ Mg ha}^{-1}$) em um IPF com densidade de 333 árvores ha^{-1} , mesmo clone, aos 3 anos de idade. Já aos 101 meses a

taxa de biomassa foi de 144,712 Mg ha⁻¹. Isso corresponde a aproximadamente 6,023 Mg ha⁻¹ e 72,356 Mg ha⁻¹ de C armazenados aos 32 e aos 101 meses respectivamente. Aos 32 meses, o tronco das árvores havia estocado 0,564Mg mês⁻¹, já entre os 32 e os 101 meses estocou 2,884 Mg mês⁻¹. (Tabela 2).

Tabela 2 – Características dendrométricas, biomassa e estoque de C no tronco das árvores

	32 meses	101 meses	32 a 101 meses
DAP médio (cm)	9,498±1,8	21,250±4,33	
Altura média (m)	10,691±1,214	25,571±2,60	
Volume médio (m ³)	0,0448±0,02	0,539±0,26	
Volume total (m ³)	69,498	834,881	
Volume total (m ³ ha ⁻¹)	23,166	278,293	
Estoque de Biomassa no tronco das árvores (Mg)	36,139	434,138	
Estoque de Biomassa no tronco das árvores (Mg ha ⁻¹)	12,046	144,712	
Estoque de C (Mg)	18,069	217,069	
Estoque de C (Mg ha ⁻¹)	6,023	72,356	
Estoque médio mensal de C 1 e 2 (EMMc1 e EMMc1) (Mg mês ⁻¹)	0,564	2,149	2,884
Captura média mensal de CO ₂ eq (CMMco ₂ eq.) (Mg mês ⁻¹)	2,072	7,887	10,584

Fonte: Autor.

Veloze (2021), ao comparar 4 clones de eucalipto (AEC-2034(*Eucalyptus camaldulensis* x *E. grandis*) x *E. urophylla*), AEC-2111 (*E. urophylla* x (*E.camaldulensis* x *E. grandis*)), AEC-007 (*E. toreliana* x *E. citriodora*) e o AEC-043 (*E.citriodora* x *E. toreliana*)) com 4 anos de idade e densidade de 413 árvores ha⁻¹, encontrou uma amplitude de biomassa que variou de 22,5 Mg ha⁻¹ (clone AEC-007) e 44,1 Mg ha⁻¹ (clone AEC-0043).

Segundo Chará *et al.* (2018) o potencial estimado de sequestro de carbono acima do solo em IPF varia de 1,5 Mg Mg ha⁻¹ ano⁻¹ a 6,55 Mg ha⁻¹ ano⁻¹. Schettini *et al.* (2021) ao comparar o estoque de C em 6 IPF com diferentes clones de *Eucalyptus* spp. em diferentes espaçamentos na cidade de Porto Firme, Minas Gerais, encontrou EMAC que variou de 3,35 Mg ha⁻¹ ano⁻¹ com o clone I224 em espaçamento de 8x4 (312 árvores ha⁻¹) a 6, Mg ha⁻¹ ano⁻¹ para o mesmo clone com espaçamento de 6x4 (416,6 árvores ha⁻¹). Segundo Ibrahim *et al.* (2010) as taxas de fixação de C em IPF variam de acordo com as condições climáticas e do solo, tipo de pasto, espécies arbóreas, densidade e idade das árvores.

Nos dois primeiros anos de IPF a estimativa anual de eq. foi de 24,87 Mg abaixo do encontrado por Campanha, Costa e Gontijo Neto (2018) em IPF com densidade de 333 árvores de *Eucalyptus* spp. ha⁻¹ avaliado aos 36 meses e abaixo ao encontrado por Neto *et al.* (2017),

em IPF avaliado aos 43 meses. No terceiro ano as taxas de EM_{CO_2} se diferem dos demais pois é a transição entre os dados do primeiro inventário com o segundo inventário, sendo considerado os dados de CMMc1 até o oitavo mês e CMMc2 do nono ao décimo segundo mês (Figura 18).

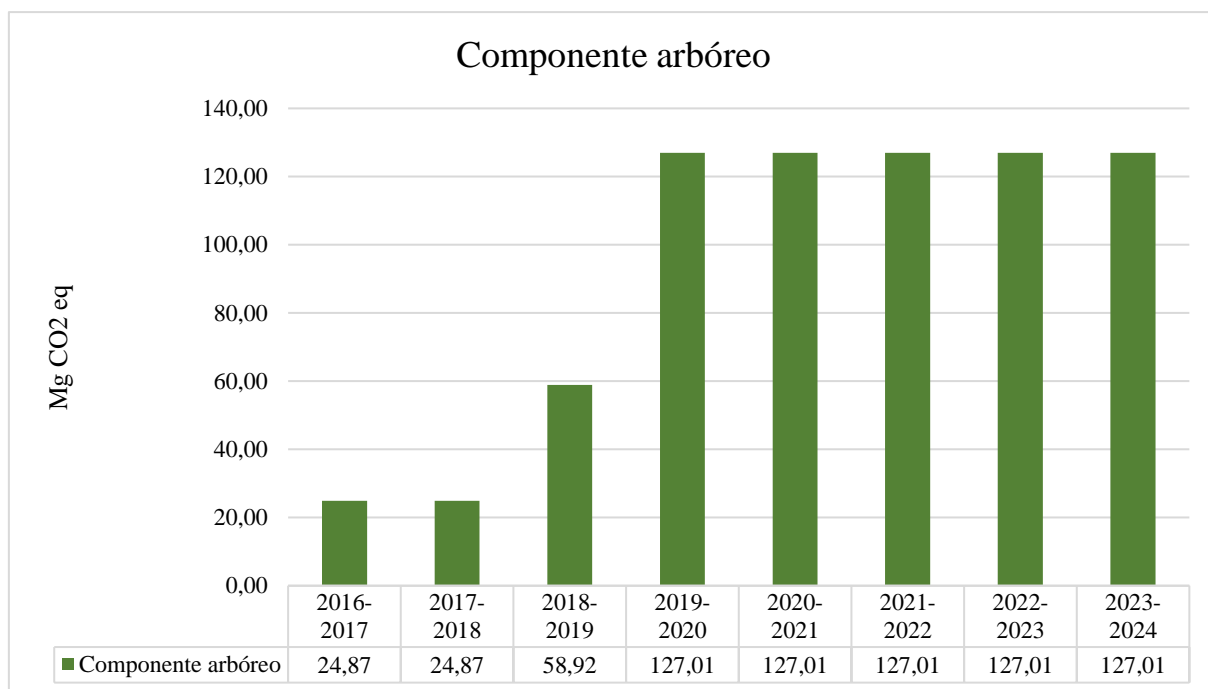


Figura 18. Captura Média Anual de CO_2 eq. do povoamento florestal

Em estudo realizado por Caldas *et al.* (2021), com o mesmo clone, mesmo espaçamento aos 4,5 anos identificou-se uma captura anual de CO_2 eq. de $113,5 \text{ Mg ha}^{-1}$, valores superiores ao encontrado no presente estudo. Estudos realizados em IPF com *Eucalyptus* spp. em idades mais avançadas apresentaram EM_{CO_2} mais elevados. Entre o quarto e o oitavo ano o EM_{CO_2} foi de $-127,01 \text{ Mg ano}^{-1}$, acima dos valores encontrados por Tonini (2023) ao avaliar IPF aos 7 anos de idade com diferentes densidades (312 e 208 árvores spp. ha^{-1}) no município de Bagé, RS encontrou um EM_{CO_2} que variou de $2,3$ a $11 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$. Gontijo Neto *et al.* (2018), encontrou EM_{CO_2} mínimo de $16,12 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$, em IPF com densidade de 236 árvores ha^{-1} entre os 42 e 54 meses, e máximo de $16,74 \text{ Mg ha}^{-1}$ em IPF com densidade de 295 árvores ha^{-1} com a mesma idade em Curvelo, MG.

De forma geral, as estimativas de estoque de C e CO_2 eq. variaram entre os estudos encontrados. Os resultados deste estudo estão dentro dos limites encontrados na literatura, porém como esta análise considerou apenas o tronco das árvores, na maioria dos casos os valores encontrados estão inferiores aos da literatura.

De acordo com Moreira (2021) a função de crescimento de uma floresta de *Eucalyptus* spp. apresenta um formato sigmóide, com taxas de crescimento ascendentes até atingir um ponto de inflexão, a partir do qual a taxa se torna decrescente. De forma geral o comportamento do crescimento da floresta é definido pelo material genético, tratamentos silviculturais, local de plantio e destinação da madeira, onde a determinação da idade ótima de corte é determinada pela maximização da produção de madeira e pela maximização do retorno econômico líquido por unidade de área por ano (MOREIRA, 2021).

Do ponto de vista técnico a idade ótima de corte da floresta de eucalipto será definida a quando o Incremento Médio Anual (IMA), que mede o crescimento médio da floresta até certa idade, se igualar ao Incremento Corrente Anual (ICA), que mede o quanto a floresta cresceu, em volume no último ano (MOREIRA, 2021). No caso das árvores no IPF da fazenda Santa Barbara espera-se que as taxas de $EMAc$ e $EMAcO_2$ aumentem no decorrer dos anos até alcançar um ponto de inflexão. Neste sentido a floresta pode ser manejada através da colheita total

5.4. Compensação de CO₂ eq. das emissões da produção de leite pela IPF

Por fim, considerando a compensação das emissões e dos estoques de carbono foi possível notar que os estoques de carbono aumentam ao longo dos anos de acordo com o crescimento florestal. As emissões de GEE foram menores a partir do sétimo ano pois houve alterações no manejo da fertilidade das áreas destinadas as vacas de leite e aumento produção de leite. Logo, as tecnologias de redução das emissões de GEE na produção de leite com a implementação do IPF garantiram uma redução no balanço líquido de emissões de CO₂ eq.

Os resultados de emissão e de compensação para todos os anos foram agrupados na figura 19 onde as emissões estão em sinal negativo e as compensações em sinal positivo como descrito por Soussana *et al.* (2010). Em nenhum ano as emissões foram completamente compensadas (Figura 19), porém, o tronco das árvores, especificamente do clone AEC0043 na região do estudo, apresenta um potencial de incremento de biomassa superior como o demonstrado por Velozo (2021) e Caldas (2023). Para tanto é importante salientar a importância do manejo silvicultural e do desbaste para a melhor condução do povoamento florestal, o que favorecerá o melhor desempenho da produção de biomassa e conseqüentemente do sequestro de CO₂.

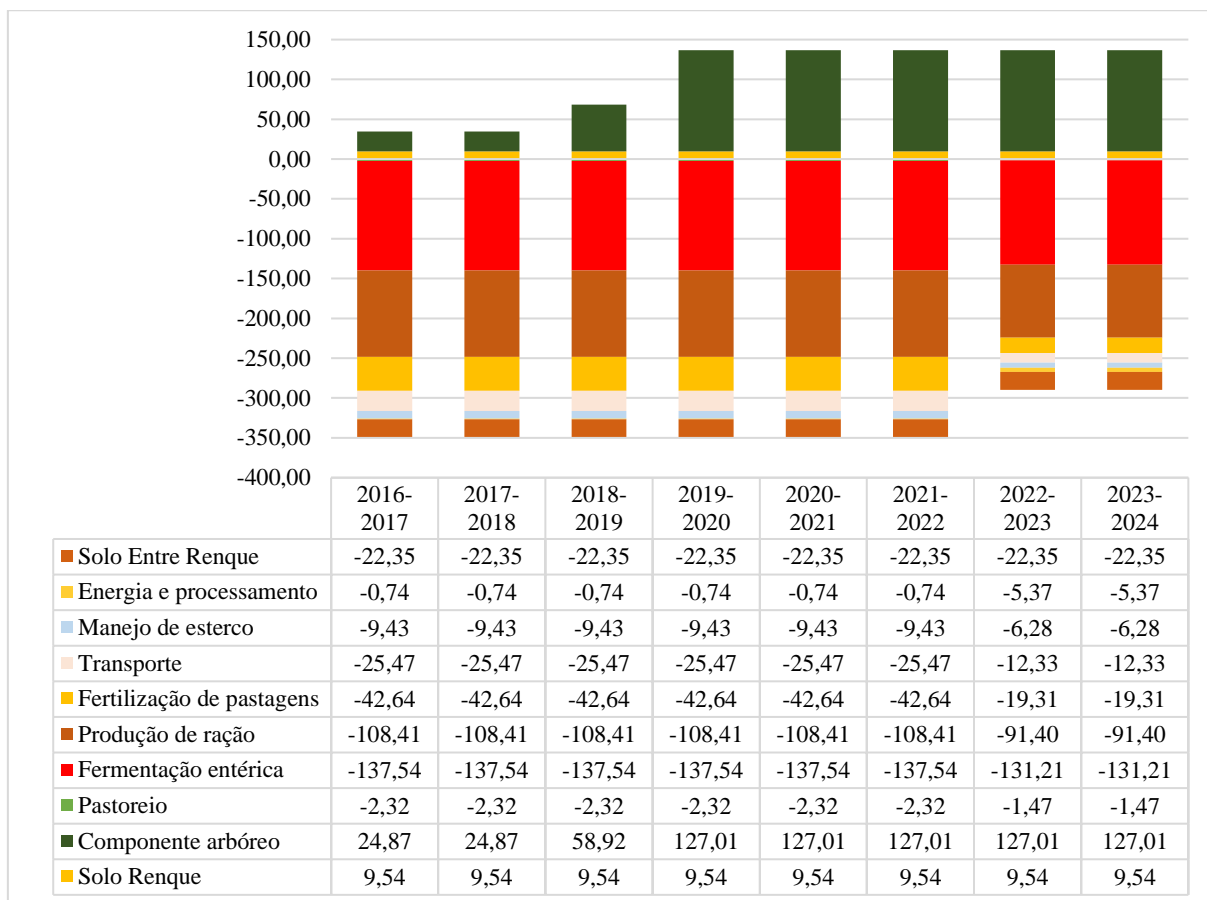


Figura 19 - Taxas de emissão da produção de leite e de compensação de CO₂ eq. pela IPF.

As taxas compensação aumentam ao longo dos anos proporcionalmente ao crescimento do povoamento florestal. Considerando as taxas de compensação das emissões de CO₂ eq., no primeiro e o segundo ano, 9,86% das emissões provenientes da produção de leite e do solo da área entre renque do IPF foram compensados pelo tronco das árvores do componente florestal e pelo solo nos renques. No terceiro ano, a compensação das emissões aumentou para 19,62%, do quarto ao sexto ano, para 39,14% e do sétimo ao oitavo, para 47,16%.

Relacionando o balanço de CO₂ com os protocolos do selo “Carne Carbono Neutro”, voltado para a neutralização das emissões de metano entérico de bovinos de corte, é necessário que a compensação dos GEE sejam efetivas e garantam que o CO₂ seja imobilizado na madeira por um período mínimo de anos. Para tanto é indicado que a madeira seja destinada para produtos de maior valor agregado (PMVA’s) e maior vida útil, como madeira serrada, laminação e faqueados, produção de móveis e materiais para a construção civil (ALVES *et al.*, 2015). Neste sentido, é importante garantir também que a madeira produzida em IPF, em sistemas de produção de leite, seja destinada para produtos PMVA’s e de maior vida útil, garantindo um maior tempo de mobilização do CO₂.

6. CONCLUSÃO

A partir deste estudo foi possível constatar a capacidade de mitigação de GEE pelo componente florestal do IPF em sistemas pecuários leiteiros. Desde o primeiro ano de implementação do IPF o tronco das árvores foi capaz de sequestrar 9,86% das emissões de GEE da produção leiteira, chegando a 47,16% no oitavo ano. Já em relação ao solo, as emissões de C da área entre renque sobressaíram em relação ao sequestro de C da área no renque, sendo este componente da produção responsável pela emissão de 4 Mg ha⁻¹.

7. RECOMENDAÇÕES TÉCNICAS

A partir deste estudo foi possível constatar a capacidade de mitigação de GEE pelo IPF em sistemas pecuários leiteiros, porém, alguns aspectos metodológicos podem ser incorporados. Indica-se a realização de inventários florestais anuais a fim de uma análise do estoque de C no componente florestal de forma mais precisa. Para a análise e estoque de C no solo indica-se uma nova coleta e análise, a fim de compreender a variação temporal do conteúdo de C. Para a quantificação das emissões de GEE, indica-se a coleta de dados de emissões de GEE anualmente, a partir de diferentes calculadoras e ferramentas, a fim de comparar a precisão dos resultados.

Neste estudo o estoque médio anual de C no tronco das árvores foi considerado para a análise, tendo em vista que foram realizados apenas 2 inventários florestais em um período de 8 anos de crescimento florestal. Havendo a possibilidade de realização de inventários florestais anuais, é possível realizar o cálculo de Estoque Corrente Anual, que mede o quanto a floresta cresceu de um ano para o outro. Com os dados do estoque e incremento, é possível identificar o valor máximo de produção de volume de madeira por unidade de área por ano, definido pelo ponto em que as taxas de estoque e incremento se igualam (MOREIRA, 2021).

Orienta-se que, em projetos de implementação de sistemas de integração ILPF, o planejamento do arranjo florestal, da densidade arbórea, o manejo do solo, os tratamentos silviculturais, a espécie e o clone devem levar em consideração o potencial de estocagem de CO₂ eq. e o potencial de neutralização das emissões das atividades desenvolvidas na fazenda

A compensação das emissões de GEE deve ser constante e, de acordo com os acordos internacionais de neutralização das emissões de GEE, devem ocorrer durante todo o ciclo de uma atividade produtiva. Desta forma indica-se que os sistemas IPF sejam implementados anualmente em fazendas produtoras de leite com a finalidade de compensação de GEE.

Foi constatado o potencial que os produtores de leite têm em contribuir com a agenda 2030, e este estudo contribui especificamente com os objetivos 13 “Ação contra a mudança global do clima” e 15 “Vida Terrestre” ao abordar a redução das emissões de GEE, adaptação a mudança climática, implementação de ações concretas alinhadas a PNMC e a promoção do uso sustentável de ecossistemas terrestres. Este estudo pode estimular formuladores de políticas públicas e o mercado privado de laticínios para a criar certificações relacionadas a mitigação e compensação das emissões de GEE, promovendo, através de aumento do pagamento do preço do leite, a implementação de sistemas IPF.

Em relação as políticas públicas brasileiras, apesar de o setor agropecuário brasileiro ficar de fora da regulamentação do SBCE, foi observado, a partir deste estudo, o potencial que o setor possui de compensar as emissões de GEE através dos sistemas IPF. Neste sentido, o Brasil deixará de estimular a compensação de emissões de GEE do setor mais emergente no que se refere à mitigação de GEE do país.

8. IMPACTO SOCIAL E RELEVÂNCIA DA PESQUISA

Em um contexto de mudança climática, promoção de uma agricultura sustentável e erradicação da pobreza é de notável relevância compreender o comportamento dos GEE em sistemas integrados de produção em pequenas propriedades agropecuárias. A temática em questão promove meios de adaptação a mudança climática global, estimulando a implementação de sistemas de produção agropecuários mais biodiversos e eficientes quanto ao sequestro de CO₂. Simultaneamente, a promoção de ações que contribuam para uma assistência técnica e extensão rural voltadas para a implementação de sistemas agropecuários mais sustentáveis em pequenas propriedades rurais, pode contribuir na resiliência, permanência, visibilidade e melhoria das condições de vida dessas populações.

A partir deste estudo, é possível desenvolver ferramentas capazes de quantificar as emissões e as compensações de GEE em sistemas leiteiros com índices mais regionalizados, em nível municipal. Esse trabalho também pode impactar o setor de produção de leite ao demonstrar a capacidade do sistema IPF de compensar as emissões de GEE na produção

leiteira de uma fazenda. Nesse sentido, ele estimula a formulação de políticas públicas que incentivem os agropecuaristas de Goiás a implementarem sistemas IPF com o objetivo de mitigar as emissões de GEE do estado e incentiva o setor de laticínios a assumir compromissos com os impactos da cadeia produtiva e a criar programas de valorização para produtores que adotam tecnologias de compensação de emissões.

Por fim, este estudo pode contribuir para validar o potencial dos sistemas integrados e dos pequenos agricultores na mitigação da mudança climática, além de proporcionar meios de adaptação para pequenas propriedades rurais. Além disso, fornece informações quantitativas para que o Comitê Estadual de Gestão da Agropecuária de Baixo Carbono e Sustentável de Goiás possa construir suas perspectivas de redução e compensação das emissões de GEE do setor.

REFERÊNCIAS

ALLWOOD, J. M. *et al.* **Glossary**. In: EDENHOFER, O. *et al.* (Ed.). **Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change**. Cambridge: Cambridge University Press, 2014. Disponível em: https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/ipcc_wg3_ar5_annex-i.pdf . Acesso em: 12 set. 2024.

ALVES, F. V. *et al.* **Carne Carbono Neutro: um novo conceito para carne sustentável produzida nos trópicos**. Campo Grande: Embrapa Gado de Corte, 2014. 32 p. (Documentos, 201).

ALVES, F. V.; ALMEIDA, R. G.; LAURA, V. A. **Carbon neutral Brazilian beef: a new concept for sustainable beef production in the tropics**. Campo Grande: Embrapa Gado de Corte, 2017. 32 p. (Documentos, 243).

AMERICAN UNIVERSITY. **Carbon Removal Glossary**. Washington, DC: American University, 2020. Disponível em: <https://www.american.edu/sis/centers/carbon-removal/carbon-removal-glossary.cfm>. Acesso em: 12 set. 2024.

ASSAD, E. D. *et al.* **Sequestro de carbono e mitigação de emissões de gases de efeito estufa pela adoção de sistemas integrados**. In: BUNGESTAB, D. J.; ALMEIDA, R. G.; LAURA, V. A.; BALBINO, L. C.; FERREIRA, A. D. (Eds.). **ILPF: inovação com integração de lavoura, pecuária e floresta**. 1. ed. Brasília: Embrapa Cerrados, 2019. p. 153-167. Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/1112696/1/PLSequestroCarbonoAssad.pdf>. Acesso em: 12 set. 2024.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 11941: Madeira- Determinação Da Densidade Básica**. Rio de Janeiro: ABNT, 2003. 6 p.

BURRAS, L. *et al.* **Carbon Sequestration: Position of the Soil Science Society of America**. SSSA AD HOC COMMITTEE S893, 2001. Disponível em: https://www.academia.edu/64533350/Carbon_Sequestration_Position_of_the_Soil_Science_Society_of_America . Acesso em: 12 set. 2024.

BANCO CENTRAL DO BRASIL. **Relatório de Macroprudencial e de Estabilidade Financeira Rural**. Brasília: Banco Central do Brasil, 2024. Disponível em: <https://www.bcb.gov.br/estabilidadefinanceira/reportmicrrural?path=conteudo%2FMDCR%2FReports%2FqvcRegiaoUF.rdl>. Acesso em: 12 set. 2024.

BRASIL. Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (IBAMA). **Protocolo de Montreal**. 2022. Disponível em: <https://www.gov.br/ibama/pt-br/assuntos/emissoes-e-residuos/emissoes/protocolo-de-montreal> . Acesso em: 10 set. 2024.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Plano setorial de mitigação e de adaptação às mudanças climáticas para a consolidação de uma economia de baixa emissão de carbono na agricultura: plano ABC (Agricultura de Baixa Emissão de Carbono) / Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, Ministério do Desenvolvimento Agrário, coordenação da Casa Civil da Presidência da República**. – Brasília: MAPA/ACS, 2012. 173 p.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Plano Setorial para Adaptação à Mudança do Clima e Baixa Emissão de Carbono na Agropecuária 2020-2030**. Brasília: Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, 2021a. Disponível em: <https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/sustentabilidade/planoabc-abcmais/publicacoes/download.pdf>. Acesso em: 12 set. 2024.

BRASIL. Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações. **Quarta Comunicação Nacional do Brasil à Convenção Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima**. Brasília: Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações, 2021b.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Rebanho bovino brasileiro alcançou recorde de 234,4 milhões de animais em 2022**. 2023a. Disponível em: <https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/noticias/rebanho-bovino-brasileiro-alcancou-recorde-de-234-4-milhoes-de-animais-em-2022>. Acesso em: 12 set. 2024.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Metas do ABC+**. 2023b. Disponível em: <https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/sustentabilidade/planoabc-abcmais/abc/metas-do-abc> . Acesso em: 20/09/2024.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Histórico do Plano ABC**. Brasília: Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, 2023c. Disponível em: <https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/sustentabilidade/planoabc-abcmais/plano-abc/historico>. Acesso em: 12 set. 2024.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Plano ABC: Dez anos de sucesso e uma nova forma sustentável de produção agropecuária**. Brasília: Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, 2023d. Disponível em: <https://repositorio-dspace.agricultura.gov.br/handle/1/2117> . Acesso em: 17 set. 2023.

BRUNI, E. *et al.* Additional carbon inputs to reach a 4 per 1000 objective in Europe: feasibility and projected impacts of climate change based on Century simulations of long-term arable experiments. **Biogeosciences**, v. 18, p. 3981–4004, 2021. DOI: 10.5194/bg-18-3981-2021.

CALDAS, D. J. **Bioenergia e estoque de carbono de clones de *Eucalyptus spp.* em Sistema Integrado de Produção**. 2023. 72 p. Tese (Doutorado em Agronomia) – Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2023.

CÂMARA DOS DEPUTADOS. **Câmara aprova projeto que regulamenta o mercado de carbono no Brasil; texto segue para sanção**. Brasília, DF: Câmara dos Deputados, 21 nov. 2024a. Disponível em: <https://www.camara.leg.br/noticias/1112521-CAMARA-APROVA-PROJETO-QUE-REGULAMENTA-O-MERCADO-DE-CARBONO-NO-BRASIL;-TEXTO-SEGUE-PARA-SANCAO>. Acesso em: 7 jan. 2025.

CÂMARA DOS DEPUTADOS. **Entra em vigor lei que regula mercado de carbono no Brasil**. Brasília, DF: Câmara dos Deputados, 12 dez. 2024b. Disponível em: <https://www.camara.leg.br/noticias/1121040-entra-em-vigor-lei-que-regula-mercado-de-carbono-no-brasil/>. Acesso em: 7 jan. 2025.

CEPEA – Centro de Estudos Avançados em Economia Aplicada. **PIB do agronegócio brasileiro**. São Paulo: CEPEA, 2024. Disponível em: <https://www.cepea.esalq.usp.br/br/pib-do-agronegocio-brasileiro.aspx> . Acesso em: 12 set. 2024.

CHAZOURNES, L. B. de. **United Nations Framework Convention on Climate Change**. Audiovisual library of international law. Nova York: Audiovisual library of international law, set. 2008. Disponível em: <https://legal.un.org/avl/ha/ccc/ccc.html> . Acesso em: 15 abr. 2024.

CLIMATE CHANGE AUTHORITY. **CCA glossary**. Disponível em: <https://www.climatechangeauthority.gov.au/cca-glossary>. Acesso em: 3 mar. 2025.

COELHO, C. After the 1972 stockholm conference: 50 years of coastal management in portugal. **Coastal Engineering Proceedings**, n. 37, p. 57, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.9753/icce.v37.papers.57>. Acesso em: 04 mar. 2024.

CONFERENCE STATEMENT. **The changing atmosphere**: implications for global security. Toronto: Conference on the Changing Atmosphere, 1988. 26 p.

COOL FARM ALLIANCE. **About us**. [s.l.]: Cool Farm Alliance, 2024. Disponível em: <https://coolfarm.org/about-us/>. Acesso em: 12 set. 2024.

DA SILVA, H. A. **Sistemas de integração lavoura-pecuária-floresta: cienciometria, biomassa florestal e raízes deforrageiras**. 2021. 114 p. Dissertação (Mestrado em Agronomia: Produção Vegetal) – Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2021.

DE LÉIS, C. M. *et al.* Carbon footprint of milk production in Brazil: a comparative case study. **International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 20, p. 46–60, 2015. DOI: 10.1007/s11367-014-0813-3. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11367-014-0813-3>. Acesso em: 12 set. 2024.

ESTEVAM, C. G.; PAVÃO, E. M.; ASSAD, E. **Quantificação das emissões de GEE no setor agropecuário: fatores de emissão, métricas e metodologias**. Observatório de Conhecimento e Inovação em Bioeconomia. São Paulo: Fundação Getúlio Vargas – FGV, 2023. p.1-88. Disponível em: <https://agro.fgv.br/sites/default/files/2023-10/M%C3%A9tricas%20Agropecu%C3%A1rias.pdf> . Acesso em: 12 set. 2024.

EUROPEAN COMMISSION. **Kyoto Protocol enters into force – a milestone in the fight against climate change**. MEMO/05/49. Bruxelas, 16 fev. 2005. Disponível em: https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/MEMO_05_49. Acesso em: 19 set. 2024.

FAO. **Terms and Definitions for the National Reporting Tables for FRA2005**. 2005. FAO Corporate Document Repository. Disponível em: http://www.fao.org/docrep/007/ae156e/AE156E03.htm#P236_10121. Acesso em: 2 jul. 2009.

FAO. **Recarbonization of global soils: a dynamic response to offset global emissions**. Roma: FAO, 2019. 8 p. Disponível em: <https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/b21c297b-ef69-47e8-b12f-5c5df3451ac6/content> . Acesso em: 19 mar. 2024.

FAO – Food and Agriculture Organization of the United Nations. **FAOSTAT**: Statistical Database. Roma: FAO, 2024. Disponível em: <https://www.fao.org/faostat/en/> . Acesso em: 12 mar. 2024.

FAO & GDP. **Climate change and the global dairy cattle sector: the role of the dairy sector in a low-carbon future**. Roma: FAO, 2018. 36 p. Disponível em: <https://www.fao.org/3/ca8662en/CA8662EN.pdf>. Acesso em: 19 mar. 2024.

FIALHO, R. C.; ZINN, Y. L. Changes in soil organic carbon under Eucalyptus plantations in Brazil: a comparative analysis. **Land Degradation & Development**, Chichester, v. 25, n. 5, p. 428-437, set./out. 2014. DOI: 10.1002/ldr.2158.

GHG PROTOCOL. **The Greenhouse Gas Protocol: A Corporate Accounting and Reporting Standard**. Revised edition. Washington: World Resources Institute; World Business Council for Sustainable Development, 2004. 116 p. Disponível em: <https://ghgprotocol.org/sites/default/files/standards/ghg-protocol-revised.pdf>. Acesso em: 02 jun. 2024.

GIANETTI, G. W.; FERREIRA FILHO, J. B. de S. O Plano e Programa ABC: uma análise da alocação dos recursos. **Revista de Economia e Sociologia Rural**, v. 59, n. 1, p. 1-15, 2021. DOI: 10.1590/1806-9479.2021.216524. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/1806-9479.2021.216524>. Acesso em: 25 jan. 2024.

GRISCOM, B. W. *et al.* Natural climate solutions. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 114, n. 44, p. 11645-11650, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1073/pnas.1710465114>. Acesso em: 12 set. 2024.

GUYADER, J.; *et al.* Comparison of greenhouse gas emissions from corn- and barley-based dairy production systems in Eastern Canada. **Agricultural Systems**, v. 152, p. 38-46, 2017. ISSN 0308-521X. DOI: 10.1016/j.agsy.2016.12.002. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0308521X16301500>. Acesso em: 08 jun. 2024.

HEILIG, G. K. The greenhouse gas methane (CH₄): Sources and sinks, the impact of population growth, possible interventions. **Population and Environment**, [S.l.], v. 16, p. 109–137, nov. 1994.

HOTT, M. C.; ANDRADE, R. G.; MAGALHAES JUNIOR, W. C. P. **Produção brasileira de leite e sua geografia**. Milkpoint, 2021. Disponível em: <https://www.milkpoint.com.br/noticias-e-mercado/giro-noticias/producao-brasileira-de-leite-e-sua-geografia-225203/#:~:text=Em%202020%2C%20esta%20expans%C3%A3o%20foi,no%20pa%C3%ADs%20em%209%20anos>. Acesso em: 05/02/2024.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Censo Agropecuário 2017**: resultados definitivos. Rio de Janeiro: IBGE, 2019. Disponível em: <https://censoagro2017.ibge.gov.br/>. Acesso em: 05 ago. 2024.

IISD - INTERNATIONAL INSTITUTE FOR SUSTAINABLE DEVELOPMENT. Summary of the First Conference of the Parties for the Framework Convention on Climate Change: 28 March - 7 April 1995. **Earth Negotiations Bulletin**, v. 12, n. 21, p. 1-11, 1995. Disponível em: https://cetesb.sp.gov.br/proclima/wp-content/uploads/sites/36/2014/08/cop-1_ingles.pdf. Acesso em: 10 jul. 2024.

INSTITUTE FOR CARBON REMOVAL LAW AND POLICY. **Explainer: Carbon Removal**. Washington: American University, 2020. Disponível em: <https://www.american.edu/sis/centers/carbon-removal/carbon-removal-glossary.cfm>. Acesso em: 05 ago. 2024.

INTERNATIONAL DAIRY FEDERATION. **A common carbon footprint approach for the dairy sector**. Brussels: International Dairy Federation, 2015. 70 p. Disponível em:

https://www.fil-idf.org/wp-content/uploads/2016/09/Bulletin479-2015_A-common-carbon-footprint-approach-for-the-dairy-sector.CAT.pdf . Acesso em: 12 set. 2024.

IPCC. **Climate change**: The IPCC scientific assessment. Cambridge: Cambridge University Press, 1990. 365 p. Disponível em: https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/ipcc_far_wg_I_full_report.pdf . Acesso em: 29 abr. 2024.

IPCC. **Good practice guidance for land use, land-use change and forestry**. [J. Penman, M. Gytarsky, T. Hiraiishi, *et al.* (eds.)]. Tóquio: Institute for Global Environmental Strategies - IPCC, 2003. 590 p. Disponível em: https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/03/GPG_LULUCF_FULLEN.pdf . Acesso em: 19 set. 2024.

IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change. **Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories**, Prepared by the National Greenhouse Gas Inventories Programme. Japão: IGES, 2006.

IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change. **Annex I: Glossary**. In: SHUKLA, P. R. *et al.* (eds.). **Climate Change and Land: an IPCC special report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems**. [s.l.]: [s.n.], 2019. p. 803-830 DOI: 10.1017/9781009157988.010. Disponível em: <https://doi.org/10.1017/9781009157988.010>. Acesso em: 12 set. 2024.

IPCC. **History of the IPCC**. 2023a. Disponível em: <https://www.ipcc.ch/about/history/>. Acesso em: 16 out. 2023.

IPCC. **Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change**. [Core Writing Team, H. Lee e J. Romero (eds.)]. Genebra: IPCC, 2023b. p. 35-115. DOI: 10.59327/IPCC/AR6-9789291691647. Disponível em: <https://doi.org/10.59327/IPCC/AR6-9789291691647> . Acesso em: 19 jun. 2024.

IPCC. **IPCC 60 AR7 Work Programme**. 19 jan. 2024a. Disponível em: <https://www.ipcc.ch/2024/01/19/ipcc-60-ar7-work-programme/> . Acesso em: 10 set. 2024.

IPCC. About. 2024b. Disponível em: <https://www.ipcc.ch/about/>. Acesso em: 10 set. 2024.

IVANOVA, M. Designing the United Nations Environment Programme: a story of compromise and confrontation. **International Environmental Agreements: Politics, Law and Economics**, v. 7, n. 4, p. 337-361, 2007. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10784-007-9052-4>. Acesso em: 10 set. 2024.

MADARI B. E. *et al.* Soil carbon stock changes in a crop-livestock-forestry integration in Southern Goiás State, Brazil. **Agroforestry Systems**, v. 98, p. 2141–2156, 2024. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10457-024-01056-w> . Acesso em: 05/11/2024.

MACHADO, P. L. O. A. *et al.* **Mudança do clima e a agropecuária brasileira: Noções, mitigação e adaptação**. Santo Antônio: Embrapa Arroz e Feijão, 2022. 38 p. (Documentos, 322).

MOREIRA, J. M. M. Á. P. **Idade ótima de corte.** In: EMBRAPA. **Agência Embrapa de Informação Tecnológica: Eucalipto.** Brasília, DF: Embrapa, 20 dez. 2021. Disponível em: <https://www.embrapa.br/agencia-de-informacao-tecnologica/cultivos/eucalipto/producao/gestao/tecnica/idade-otima-de-corte>. Acesso em: 27 nov. 2024.

NESTLÉ. **Regenerative agriculture.** Disponível em: <https://www.nestle.com/sustainability/nature-environment/regenerative-agriculture>. Acesso em: 10 dez. 2024.

O'BRIEN, D. *et al.* A case study of the carbon footprint of milk from high-performing confinement and grass-based dairy farms. **Journal of Dairy Science**, v. 97, n. 3, p. 1835-1851, 2014. ISSN: 0022-0302. DOI: 10.3168/jds.2013-7174. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022030214000319>. Acesso em: 12 set. 2024.

OLIVEIRA, P. P. A. *et al.* Balanço e emissões de gases de efeito estufa em sistemas integrados. In: JAMHOUR, Jorge; ASSMANN, Tangriani Simioni (orgs.). Palestras: intensificação com sustentabilidade. **Congresso Brasileiro de Sistemas Integrados de Produção Agropecuária, 1.; Encontro de Integração Lavoura-Pecuária no Sul do Brasil, 4.**, 2017, Cascavel. Pato Branco: UTFPR Câmpus Pato Branco, 2017. p. 23-32. ISBN 978-8599584-10-1. Disponível em: <http://www.utfpr.edu.br/patobranco/estrutura-universitaria/diretorias/dirgrad/departamentos/dagro/publicacoes/cbsipaeilpsb>. Acesso em: 01 nov. 2024.

OLIVEIRA, D. M. S. *et al.* Climate-smart agriculture and soil C sequestration in Brazilian Cerrado: a systematic review. **Revista Brasileira de Ciência do solo**, special issue, p. 1-20, 2023. Disponível em: <https://www.rbcjournal.org/article/climate-smart-agriculture-and-soil-c-sequestration-in-brazilian-cerrado-a-systematic-review/>. Acesso em: 25 set. 2024.

OLSON, K. R. Soil organic carbon sequestration, storage, retention and loss in U.S. croplands: Issues paper for protocol development. **Geoderma**, v. 195-196, p. 201-206, mar. 2013. DOI: 10.1016/j.geoderma.2012.01.010. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com.ez49.periodicos.capes.gov.br/science/article/pii/S0016706112004211?via%3Dihub>. Acesso em: 12 set. 2024.

OLSZENSVSKI, F. T. **Avaliação do ciclo de vida da produção de leite em sistema semi-extensivo e intensivo: estudo aplicado.** 2011. 198 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2011.

PACHECO, A. R. *et al.* **Implantação da unidade de referência tecnológica de integração pecuária leiteira e floresta na Fazenda Santa Bárbara, em Quirinópolis, Goiás - Etapa 1.** Colombo: Embrapa Florestas, 2019. 16 p. (Comunicado técnico, 432).

PAULA, V. R. de. **Análise do ciclo de vida da produção de leite no estado de Minas Gerais.** 2022. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, 2022. Disponível em: <https://repositorio.ufjf.br/jspui/bitstream/ufjf/14202/1/vanessaromariodepaula.pdf>. Acesso em: 12 set. 2024.

PAUSTIAN, K. *et al.* Climate-smart soils. **Nature**, v. 532, n. 7597, p. 49–57, 6 abr. 2016. Disponível em: <https://www-nature.ez49.periodicos.capes.gov.br/articles/nature17174> . Acesso em: 13 ago. 2023.

POTENZA, R. F *et al.* **Análise das emissões brasileiras de gases de efeito estufa e suas implicações para as metas climáticas do Brasil 1970-2020**. SEEG, 2021. p. 55. Disponível em: <https://energiaeambiente.org.br/produto/analise-das-emissoes-brasileiras-de-gases-de-efeito-estufa-e-suas-implicacoes-para-as-metas-climaticas-do-brasil-1970-2020> . Acesso em: 26 jun. 2023.

REDE ILPF. **O que é a Rede ILPF**. Disponível em: <https://redeilpf.org.br/o-que-e-a-rede-ilpf/>. Acesso em: 23 dez. 2024.

ROBERTS, J. T.; PARKS, B. C. **A Climate of Injustice: Global Inequality, North-South Politics, and Climate Policy**. Cambridge: MIT Press, 2006. 384 p.

ROTZ, C. A. Modeling greenhouse gas emissions from dairy farms. **Journal of Dairy Science**, v. 101, n. 7, p. 6675-6690, jul. 2018. DOI: 10.3168/jds.2017-13272. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S002203021731069X> . Acesso em: 23 ago. 2024.

SENADO FEDERAL. **Coleção ambiental**: Protocolo de Kyoto e a legislação correlata. Brasília: Senado Federal, 2004. v. 3, 84 p. Disponível em: <https://www2.senado.leg.br/bdsf/bitstream/handle/id/70328/693406.pdf?sequence=2> . Acesso em: 10 set. 2024.

SENADO FEDERAL. **Protocolo de Kyoto**. 2024. Disponível em: <https://www12.senado.leg.br/noticias/entenda-o-assunto/protocolo-de-kyoto#:~:text=Acordo%20ambiental%20fechado%20durante%20a,de%20efeito%20estufa%20na%20atmosfera>. Acesso em: 10 set. 2024.

STEINFELD, H.; GERBER, P.; WASSENAAR, T. D.; CASTEL, V.; DE HAAN, C. **Livestock's long shadow: environmental issues and options**. Roma: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2006.

STODDARD, I. *et al.* Three Decades of Climate Mitigation: Why Haven't We Bent the Global Emissions Curve? **Annual Review of Environment and Resources**, v. 46, n. 1, p. 653–689, out. 2021. Disponível em: <https://www.annualreviews.org/content/journals/10.1146/annurev-environ-012220-011104> . Acesso em: 10 set. 2024.

SISTI C. P. J. *et al.* Change in Carbon and Nitrogen Stocks in Soil under 13 Years of Conventional or Zero Tillage in Southern Brazil. **Soil Tillage Research**, v. 76, n. 1, p. 39-58, 2004. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S016719870300196X> . Acesso em: 12 abr. 2024.

SOUSSANA, J. F.; TALLEC, T.; BLANFORT, V. Mitigating the greenhouse gas balance of ruminant production systems through carbon sequestration in grasslands. **Animal**, Cambridge, v. 4, n. 3, p. 334-350, mar. 2010. DOI: 10.1017/S1751731109990784.

SOUSSANA, J.-F. *et al.* Matching policy and science: Rationale for the '4 per 1000 - soils for food security and climate' initiative. **Soil and Tillage Research**, v. 188, p. 3-15, 2019. DOI: 10.1016/j.still.2017.12.002.

TSETEN, T.; SANJORJO, R. A.; KWON, M.; KIM, S. Strategies to mitigate enteric methane emissions from ruminant animals. **Journal of Microbiology and Biotechnology**, [S.l.], v. 32, n. 3, p. 269–277, mar. 2022. DOI: 10.4014/jmb.2202.02019.

UNFCCC. **Glossary**. In: **Greenhouse Gas Inventories**. [s.l.]: UNFCCC, 2024. Disponível em: https://unfccc.int/resource/cd_roms/na1/ghg_inventories/english/8_glossary/Glossary.htm. Acesso em: 12 set. 2024.

UNITED NATIONS. **United Nations Conference on the Human Environment 5-16 June 1972, Stockholm**. 1972. Disponível em: <https://www.un.org/en/conferences/environment/stockholm1972#:~:text=The%201972%20United%20Nations%20Conference%20on%20the%20Human,Plan%20for%20the%20Human%20Environment%20and%20several%20resolutions>. Acesso em: 15 abr. 2024.

UNITED NATIONS. **General Assembly**. Resolution 38/161: Process of preparation of the Environmental Perspective to the Year 2000 and Beyond. New York: UNITED NATIONS, 1983. Disponível em: <https://undocs.org/en/A/RES/38/161> . Acesso em: 15 abr. 2024.

UNITED NATIONS. **United Nations Conference on Environment and Development, Rio de Janeiro, Brazil, 3-14 June 1992**, 1992. Disponível em: <https://www.un.org/en/conferences/environment/rio1992>. Acesso em: 10 set. 2024.

UNITED NATIONS. **Declaration of the United Nations Conference on the Human Environment**. Estocolmo: United Nations, 2012. 3 p. Disponível em: https://legal.un.org/avl/pdf/ha/dunche/dunche_ph_e.pdf?_gl=1*k44kqw*_ga*MTMyOTA0MTk2OC4xNzI2NzUxMzA4*_ga_TK9BQL5X7Z*MTcyNjc1NzUyOS4xLjEuMTcyNjc1Nzc5OS4wLjAuMA.. Acesso em: 15 abr. 2024.

UNITED NATIONS. **Paris Agreement**. Paris: United Nations, 2015. Disponível em: https://unfccc.int/sites/default/files/english_paris_agreement.pdf . Acesso em: 12 set. 2024.

UNITED NATIONS. **UN Climate Conferences**. 2024. Disponível em: <https://www.un.org/en/climatechange/un-climate-conferences#:~:text=The%20first%20Conference%20of%20the,charted%20a%20course%20of%20action>. Acesso em: 10 set. 2024.

UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME. **Handbook for the Vienna Convention for the Protection of the Ozone Layer**. 12. ed. Nairobi: Ozone Secretariat ; The Secretariat for the Vienna Convention for the Protection of the Ozone Layer and for the Montreal Protocol on Substances that Deplete the Ozone Layer, 2019. p. 1–100.

UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME. **UNEP: 50 years of Environmental Milestones**. 2024. Disponível em: <https://www.unep.org/environmental-moments-unep50-timeline> . Acesso em: 9 set. 2024.

VELOZO, A. P. **Biomassa e estoque de nutrientes no componente arbóreo e na serapilheira em sistema de integração lavoura-pecuária-floresta na região sul de Goiás**. 2021. 115 p. Dissertação (Mestrado em Agronomia: Produção Vegetal) – Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2021.

VIGLIZZO, E. F. **Pecuária bovina e mudança do clima nas Américas**: rumo a modelos de desenvolvimento baixos em carbono. San José: Instituto Interamericano de Cooperação para a

Agricultura (IICA), 2023. Disponível em: <https://repositorio.iica.int/bitstream/handle/11324/21972/BCO23119393f%20%282%29.pdf?sequence=3&isAllowed=y>. Acesso em: 16 set. 2024.

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS. **50 anos da Conferência de Estocolmo:** evolução das discussões ambientais ao longo das últimas décadas. 2022. Disponível em: <https://www.ufmg.br/sustentabilidade/noticia/50-anos-da-conferencia-de-estocolmo-evolucao-das-discussoes-ambientais-ao-longo-das-ultimas-decadas/>. Acesso em: 16 jun. 2024.

WENDEBORN, S. The chemistry, biology, and modulation of ammonium nitrification in soil. **Angewandte Chemie International Edition**, v. 59, n. 6, p. 2125-2519, 3 fev. 2020.

WIEDMANN, T.; MINX, J. **A definition of 'carbon footprint'**. In: PERTSOVA, C. C. (Ed.). **Ecological Economics Research Trends**. Hauppauge: Nova Science Publishers, 2008. p. 1-11.

WOLF, P. *et al.* Assessing greenhouse gas emissions of milk production: which parameters are essential? **The International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 22, n. 3, p. 441-455, 2017. DOI: 10.1007/s11367-016-1165-y. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11367-016-1165-y>. Acesso em: 12 set. 2024.

WCED - WORLD COMMISSION ON ENVIRONMENT AND DEVELOPMENT. **Our common future**. Oxford: Oxford University Press, 1987.

YORK, L.; HEFFERNAN, C.; RYMER, C. A. Systematic review of policy approaches to dairy sector greenhouse gas (GHG) emission reduction. **Journal of Cleaner Production**, vol. 172, p. 2216–2224, 2018. DOI 10.1016/j.jclepro.2017.11.190. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0959652617328639> . Acesso em: 22 abr. 2024.

ANEXOS

ANEXO A

CFT-PRODUÇÃO LEITEIRA INTELIGENTE

QUIRINÓPOLIS

Produtor: [REDACTED] Data: 13/05/2020

Responsável pela coleta dos dados: [REDACTED]

1. Produção de leite

Introduza as informações básicas sobre a produção de leite do rebanho.

1.1. Raça predominante: Holandês 7/8 (Ex. Girolanda, 70%)

1.2. Início do ano de referência: 2020 (Ex. 2019)

1.3. Produção de leite total: 920 litros

1.4. Percentagem média de gordura no leite: 3,62%

1.5. Percentagem média de proteína no leite: 3,37 %

2. Rebanho

Preencha o número médio de animais na fazenda para o ano de referência, o número de animais vendidos e comprados.

Categoria	Animais na fazenda		Animais vendidos		Animais comprados	
	Nº de animais	Peso	Nº de animais	Peso	Nº de animais	Peso
Bezerros de leite (0-1 ano)	<u>22</u>	<u>132kg</u>	-	-	-	-
Bezerros de carne (0-1 ano)	-					
Novilhas (1 ano até ao primeiro parto)	<u>53</u>	<u>332kg</u>	-	-	-	-
Vacas de leite (vacas em lactação)	<u>50</u>	<u>495kg</u>	-	-	-	-
Vacas secas (vacas que não estão em lactação)	<u>19</u>	<u>493kg</u>	-	-	-	-

Vacas em lactação

Peso por animal.

3. Pastagem

Tipo de pasto predominante. Anotar com um "X":

- Braquiária brizanta (Ex. Xaraés, Piatã, Paiaguás)
- Braquiária ruziziensis
- Braquiária humidicola (Ex. Tupi)
- Braquiaria decumbens (Ex. Brasilisk)
- Colonião (Panicum, Zuri, Mombaça, Tanzania)
- Capim elefante (ex. Capim Pioneiro, BRS Kurumi)

Lotação (vacas/ha/ano)

- 3 – 4
- 4 – 5
- 4 - 7

Tempo de pastejo (**dias** de pastejo por semana e **horas** de pastejo por dia) e

Tipo de pastejo (Anotar com um "X" a opção 'a' ou 'b') e

Qualidade da pastagem (Anotar com um "X" a opção 'a' ou 'b').

Categoria	Dias por semana	Horas por dia	Tipo de pastejo	Qualidade da pastagem
Bezerros de leite (0-1 ano)	7	8	a. Confinado <input checked="" type="checkbox"/> Livre	a. Alta <input checked="" type="checkbox"/> Baixa
Bezerros de carne (0-1 ano)	-	-	a. Confinado b. Livre	a. Alta b. Baixa
Novilhas (1 ano até primeiro parto)	7	8	a. Confinado <input checked="" type="checkbox"/> Livre	a. Alta <input checked="" type="checkbox"/> Baixa
Vacas de leite (vacas em lactação)	7	4	a. Confinada <input checked="" type="checkbox"/> Livre	<input checked="" type="checkbox"/> Alta b. Baixa
Vacas secas (vacas que não estão em lactação)	7	8	a. Confinada <input checked="" type="checkbox"/> Livre	a. Alta <input checked="" type="checkbox"/> Baixa

Adubação da pastagem

Complete esta seção para a área de pastagem usada apenas pelo rebanho leiteiro.

Tipo de fertilizante (20-05-20; uréia, supersimples, calagem etc)	Qtde aplicada (kg/ha)	Frequência (anual, bianual etc)	Tipo de pasto (braquiaria, Panicum etc)	Area (ha)	Local fabricação
ureia	100kg/ha	6 em 6 mts	Braquiaria/mondego	8 ha	
calcário	34T 13/ha	Anual	" "	23 ha	
KCl	2,1 Ton	Anual	" "	2 ha	
MAP+D.3 Boro	3,5 Ton	Anual	Broch/mondego	23 ha	
S-30-20	0,5 Ton	Anual	" "	2 ha	

Faz análise de solo?

Não.

Sim. Frequência: X A cada dois anos; (Anual)

___ A cada 5 anos;

___ Realizada uma vez na implantação ou recuperação do pasto
em _____ (indicar o ano).

4. Alimentação

Uso médio de alimentos pelo rebanho. Repetir para todos os componentes alimentares envolvidos na alimentação do rebanho.

Alimento	Tipo (ex. Silagem, soja etc)	Porcentagem ou quantidade (kg)	Origem do alimento (produção local, vem do vizinho, vem de outra cidade – qual?)
Volumoso (ex. silagem, feno, capim-elefante, cana-de-açúcar)	Silagem/capim	50%	Produção na fazenda
	cana-de-açúcar in natura	50%	
Concentrado (ex. milho, soja, farelo de algodão)	concentrado comercial	30%	Cooperativa Agrovale de Quirinópolis
	Pronto	30%	
Casquinha/soja	Concentrado	20%	vem de outra cidade

5. Energia e processamento

Selecione a fonte de energia e insira a quantidade usada durante um ano.

Inclua a energia (óleo ou eletricidade) usada na produção de leite e de gramíneas (áreas de pastagem, feno, silagem) e na produção de ração ou concentrado.

Fonte de energia	Unidade (kWh, litros, etc.)	Finalidade (ordenha, silagem etc)
Enel Goiás	510 kWh	ordenha/Residência/Tanque de expansão

6. Transporte

O transporte de insumos para a propriedade como a ração da fábrica ou o fertilizante do comerciante para a fazenda deve ser incluído. Incluir também o transporte de saída de produtos acabados (ex. Leite) para o local de processamento.

Para cada meio de transporte, calcule ou estime o peso das mercadorias (leite e outros produtos) e distâncias transportadas aproximadas. Pode ser necessário alocar transporte em massa ou compartilhado. Repetir de forma a incluir cada tipo de transporte utilizado pelo produtor (caminhonete, F-75, Mercedinho etc).

Mercadoria transportada	Meio de transporte (Caminhonete, Mercedinho etc)	Peso da mercadoria (kg)	Distância (km)	Frequência (Diária, mensal, semestral, anual)
Ração	Caminhão	10 TON/mês	80 km	mensal
Coque	Caminhão	30 TON/mês	400 km	semanal
Adubo	Caminhão	39,6 TON/Anual	120 km	Anual.
Leite	Caminhão	27,3 TON/mes.	240 km	mes.

ANEXO B

CFT-PRODUÇÃO LEITEIRA INTELIGENTE

Produtor: [REDACTED]

Data: 14.03.2023

Responsável pela coleta dos dados: [REDACTED]

1. Produção de leite

Introduza as informações básicas sobre a produção de leite do rebanho.

- 1.1. Raça predominante: Holandês (Nome da raça e proporção do rebanho. Ex. Girolanda, 70%.)
- 1.2. Início do ano de referência: 2022 (Ex. 2020) (Pensar um período de produção que seja de acordo com o ciclo de vacas gestantes)
- 1.3. Produção de leite total anual (conferir registros com o/a produtor/a): 365000 L/ano
1000 L/dia
- 1.4. Percentagem média de gordura no leite: 3,75 %
- 1.5. Percentagem média de proteína no leite: _____ %

2. Rebanho

Preencha o número médio de animais na fazenda para o ano de referência, o número de animais vendidos e comprados.

Categoria	Animais na fazenda		Animais vendidos		Animais comprados	
	Nº de animais	Peso	Nº de animais	Peso	Nº de animais	Peso
Bezerros de leite (0-1 ano)	25	120				
Bezerros de carne (0-1 ano)						
Novilhas (1 ano até ao primeiro parto)	32	270				
Vacas de leite (vacas em lactação)	51	420				
Vacas secas (vacas que não estão em lactação)	20	370				
Enfermagem / amamentação de vacas						

3. Pastagem

Tipo de pasto predominante. Anotar com um "X": Braquiária brizanta (Ex. Xaraés, Piatã, Paiaguás)

- Braquiária ruziziensis
- Braquiária humidicola (Ex. Tupi)
- Braquiária decumbens (Ex. Brasilisk)
- Colônia (Panicum, Zuri, Mombaça, Tanzania)
- Capim elefante (ex. Capim Pioneiro, BRS Kurumi)

Lotação (vacas/ha/ano)

- 1 - 2 2 - 3 3 - 4 4 - 5 5 - 6

Tempo de pastejo (dias de pastejo por ano e horas de pastejo por dia) e

Tipo de pastejo (Anotar com um "X" a opção 'a' ou 'b') e

Qualidade da pastagem (Anotar com um "X" a opção 'a' ou 'b').

Bezerros até
02 3 meses

Categoria	Dias por ano	Horas por dia	Tipo de pastejo	Qualidade da pastagem	Tamanho da pastagem
Bezerros fêmeas (0-1 ano)	365-90 275 dias	24	a. Confinado b. Livre	a. Alta b. Baixa	
Bezerros machos (0-1 ano)			a. Confinado b. Livre	a. Alta b. Baixa	
Novilhas (1 ano até primeiro parto)	365	24	a. Confinado b. Livre	a. Alta b. Baixa	
Vacas de leite (vacas em lactação)	365	20	a. Confinada b. Livre	a. Alta b. Baixa	
Vacas secas (vacas que não estão em lactação)	365	24	a. Confinada b. Livre	a. Alta b. Baixa	

4. Fertilização da pastagem

Complete esta seção apenas para a área de pastagem utilizada por seu rebanho leiteiro.

Área de pastagem: 38 (ha)

- Somente área de pastagem
 Pastagem, silagem de grama e área de feno combinados

Tipo de fertilizante (20-05-20; uréia, supersimples, calagem etc)	Quantidade aplicada (kg/ha)	Frequência de aplicação (anual, bianual etc)	Tipo de pasto (braquiaria, Panicum etc)	Área aplicada (ha)	Local fabricação
Calcarício	122 Ton/ha			38	
20-0-20	150 Kg/ha			38	
KCl	70 Kg/ha			38	

Faz análise de solo?

- Não.
 Sim. Frequência: _____

5. Alimentação

Uso médio de alimentos pelo rebanho. Repetir para todos os componentes alimentares envolvidos na alimentação do rebanho. (Valores de consumo de matéria seca (CMS))

Categoria de rebanho (Bezerro, novilha, vaca seca...)	Alimento (Volumoso, concentrado ou mineral)	Tipo (ex. Silagem, soja etc) Especificar a % de soja	Quantidade (kg MS/animal/dia - média para o ano inteiro)	Origem do alimento (produção local, vem do vizinho, vem de outra cidade - qual?)	Período de alimentação (Anual, período de seca, 1 mês, 2 meses...)
Bezerros	concentrado	comercial pronto	0,3 kg/dia		
Bezerros lactação	"	"	30%		
Bezerros lactação	"	carca de soja	20%		
Bezerros lactação	Volume	Bezerros	50%		
Bezerros lactação	Mineral	sal	196g/dia		

5.1 Aditivos alimentares

Quando aplicável, insira qualquer aditivo alimentar que tenha sido fornecido a uma categoria animal com o objetivo de reduzir a fermentação entérica. A porcentagem da categoria animal não deve somar mais de 100% para aditivos administrados à mesma categoria animal.

Categoria de rebanho (Bezerro, novilha, vaca seca, vaca lactante, vacas enfermas)	Tipo (Nitrato ou 3NOP)	Dose do aditivo por kg de MS (g/kg ou mg/Kg)	NDF (%DM)	Gordura Bruta (%DM)	Número de dias	Porcentagem da categoria animal

6. Energia e processamento

Fonte de energia	Quantidade/Ano (kWh, litros, etc./Ano)	Finalidade (ordenha, silagem etc)
Energia da Rede	1492,53 KWh/mês	Toda a produção
Querosel	80 l/mês	Toda a produção

7. Transporte

Mercadoria transportada	Meio de transporte (Caminhonete, Mercedinho etc)	Peso da mercadoria (kg/ano)	Distância (km/ano)	Frequência (Diária, mensal, semestral, anual)
Foraça	Caminhão	70 364,7 Kg/ano	80 Km	anual
Sal	"	3 650 kg/ano	30 Km	"
Casos de soja	"	46 909 kg/ano	400 Km	"
Carvão vegetal	"	2757,5 Kg/ano	80 Km	"
Leite	"	365 000 Kg/ano	240 Km	"
Aduba	"	8 360 Kg/ano	120 Km	"
Calcaris	"	46 360 Kg/ano	50 Km	"

ANEXO C

Entre maio de 2019 e maio de 2020 a fazenda possuía um rebanho médio de 144 vacas mestiças leiteiras brasileiras (Holstein x Gir *Bos indicus*) com 50 vacas em lactação pesando em média 700 kg e produção média de 335.800,00 litros de leite no ano. O restante do rebanho era composto por 22 bezerras com peso médio de 44 kg, 53 novilhas com peso médio de 530 e 19 vacas secas com peso médio de 209 kg. Todas as classes de rebanho eram criadas sob pastejo e somente as vacas em lactação receberam suplementação com alimentos concentrados. O pasto de maior qualidade era destinado apenas para as vacas em lactação.

Todas as classes de rebanho pastoreiam somente no período chuvoso, onde as pastagens estão vigorosas, para tanto foi considerado apenas 182 dias do ano de pastoreio. Em relação ao período diário de pastoreio foi considerado 8 horas para as bezerras, novilhas e vacas secas e 4 horas para as vacas em lactação. Somente as vacas em lactação consomem o pasto de alta qualidade.

A adubação das pastagens realizada naquele período foi feita em diferentes proporções e em diferentes áreas. Foram aplicados 200 kg de Ureia por hectare em 8 ha, 34 toneladas de calcário em 23 ha, 2,1 Mg de KCl em 2 ha, 3,5 Mg de MAP + 0,3 Boro em 23 ha e 0,5 Mg de NPK 05-30-20 em 2 ha. Como a ferramenta não considera a adubação em diferentes dimensões de áreas foi considerada como área total de aplicação de todos os adubos 23 ha. Este ajuste superestimarás as emissões relacionadas a aplicação de fertilizantes.

Para a alimentação dos bovinos em lactação o teor recomendado de matéria seca (MS) foi de 3% do peso médio dos animais, totalizando 13,65 kg MS/animal/dia. Deste montante 50% foram oriundos de silagem de capim misturado com cana de açúcar in natura, 30% de concentrado comercial pronto e 20% de casquinha de soja. O alimento concentrado utilizado para a alimentação dos bovinos é fabricado a partir de soja produzida em uma região próxima a fazenda Santa Bárbara (Rio Verde-GO) portanto livre de desmatamento recente (sem mudança no uso da terra nos últimos 20 anos). Os bezerros consomem aproximadamente 0,3 kg/dia de concentrado. O Quadro 9 demonstra as opções de alimentação que foram selecionadas na ferramenta para cada alimento informado.

Quadro 9 - Alimentos selecionados na ferramenta

Classe de rebanho	Alimento informado	Alimento selecionado na ferramenta	Quantidade (kg matéria seca dia⁻¹)
Bezerros leiteiros	Concentrado 18%	Ração leiteira composta: padrão 15%	0,3 kg dia ⁻¹
Vacas em lactação	Concentrado comercial pronto 24%	Ração leiteira composta: Brasil (30%)	4,095 kg dia ⁻¹
	Casquinha de soja	Casca de soja	2,73 kg dia ⁻¹
	Silagem capim	Silagem de gramíneas – fora da fazenda	3,4125 kg dia ⁻¹
	Cana de açúcar in natura	Capim fresco manejado – na fazenda	3,4125 kg dia ⁻¹

Para o manejo do esterco considerou-se que na área de ordenha, onde as vacas em lactação ficam por aproximadamente 2 horas por dia, é depositado 10% do esterco das vacas em lactação. O esterco da sala de ordenha é lavado e distribuído em um pasto ao lado, desta forma considerou-se como “distribuição diária”. Na área onde estão os cochos de alimentação as vacas em lactação ficam aproximadamente 3 horas por dia, parte do esterco sólido é retirado e amontoado. Considerou-se então que 15% do esterco é “lote seco”.

O consumo médio de energia oriunda da rede de distribuição de energia era de 510 kWh/mês, totalizando em 6120 kWh/ano. Os transportes realizados pelas atividades da fazenda foram de 10 ton/mês de ração por 80 km, 30 ton/mês de casquinha de soja por 400 km, 39,6 Mg de fertilizantes por 120 km e 27,3 ton/mês de leite por 240 km. Todos estes valores foram convertidos para o período de um ano.

Entre fevereiro de 2022 e fevereiro de 2023 a fazenda possuía um rebanho médio de 128 vacas mestiças leiteiras brasileiras (Holstein x Gir *Bos indicus*) com 51 vacas em lactação pesando em média 420 kg e produção média de 365.000,00 litros de leite no ano. O restante do rebanho era composto por 25 bezerras com peso médio de 120 kg, 32 novilhas com peso médio de 270 e 20 vacas secas com peso médio de 307 kg. Todas as classes de rebanho eram criadas sob pastejo e somente as vacas em lactação e as bezerras receberam suplementação com alimentos concentrados. Todas as classes de rebanho receberam uma pastagem de alta qualidade.

Todas as classes de rebanho pastoreiam somente no período chuvoso, onde as pastagens estão vigorosas, para tanto foi considerado apenas 182 dias do ano de pastoreio. Em relação ao período diário de pastoreio foi considerado 8 horas para as bezerras, novilhas e vacas secas e 4 horas para as vacas em lactação. Somente as vacas em lactação consomem o pasto de alta qualidade.

A adubação realizada naquele período foi feita em diferentes proporções e em diferentes áreas. Foram aplicadas 53,48 toneladas de calcário em 38 ha, 3,08 Mg de KCl em 38 ha, 6,6 Mg de NPK 20-00-20 em 38 ha.

Para a alimentação dos bovinos em lactação a média recomendada de matéria seca foi de 3% do peso médio dos animais, totalizando 12,6 kg/animal/dia. Deste montante 50% foram oriundos de silagem de capim misturado com cana de açúcar in natura, 30% de concentrado comercial pronto e 20% de casquinha de soja. O alimento concentrado utilizado para a alimentação dos bovinos é fabricado a partir de soja produzida em uma região próxima a fazenda Santa Bárbara (Rio Verde-GO) portanto livre de desmatamento recente (sem mudança no uso da terra nos últimos 20 anos). Os bezerros consomem aproximadamente 0,3 kg/dia de concentrado. O Quadro 10 demonstra as opções de alimentação que foram selecionadas na ferramenta para cada alimento informado.

Quadro 10 - Alimentos selecionados na ferramenta

Classe de rebanho	Alimento informado	Alimento selecionado na ferramenta	Quantidade (kg matéria seca dia⁻¹)
Bezerros leiteiros	Concentrado 18%	Ração leiteira composta: padrão 15%	0,3 kg dia ⁻¹
Vacas em lactação	Concentrado comercial pronto 24%	Ração leiteira composta: Brasil (30%)	3,78 kg dia ⁻¹
	Casquinha de soja	Casca de soja	2,52 kg dia ⁻¹
	Silagem capim	Silagem de gramíneas – fora da fazenda	3,15 kg dia ⁻¹
	Cana de açúcar in natura	Capim fresco manejado – na fazenda	3,15 kg dia ⁻¹

Para o manejo do esterco considerou-se o mesmo método utilizado entre 2019 e 2020. O consumo médio de energia oriunda da rede de distribuição de energia era de 1492,53

kWh/mês, totalizando em 17910,36 kWh/ano e 960 litros de Óleo Diesel destinado aos geradores. Os transportes realizados pelas atividades da fazenda no período de um ano foram de 70,36 Mg de ração percorrido por 80 km, 3,650 Mg de sal mineral por 30 km, 46,909 Mg de casca de soja por 400 km, 365 Mg de leite por 240 km, 8,36 Mg de fertilizantes por 120 km e 46,36 Mg de calcário por 30 km.

Cabe ressaltar que a alimentação fornecida aos bovinos sofre variações sazonais relacionadas ao período chuvoso (dez-mai) e seco (jun-nov), pois a precipitação interfere diretamente na produção das pastagens. A alimentação informada é referente ao período seco, onde é ofertado silagem de gramíneas, cana de açúcar in natura e maiores taxas de alimentos concentrados. Como a ferramenta CFT considera os dados para o período de um ano não há meios de considerar a sazonalidade no manejo do rebanho. Sendo assim espera-se que os resultados de emissão de GEE sejam superestimados.