



PAULO SEITI ARAÚJO HAMASAKI

**PEGADA DE CARBONO E CUSTEIO DO CICLO DE
VIDA NA PRODUÇÃO DE CAFÉ ORGÂNICO**

LAVRAS-MG

2026

PAULO SEIITI ARAÚJO HAMASAKI

**PEGADA DE CARBONO E CUSTEIO DO CICLO DE VIDA NA PRODUÇÃO
DE CAFÉ ORGÂNICO**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação Desenvolvimento Sustentável e Extensão, com o objetivo de obtenção do título de Mestre.

Profa. Dra. Marcela De Castro Nunes Santos Terra
Orientador

LAVRAS-MG

2026

**Ficha Catalográfica elaborada pelo Sistema de Geração
de Ficha Catalográfica da Biblioteca Universitária da UFLA, com
dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).**

Hamasaki, Paulo Seiiti Araújo.

Pegada de carbono e custeio do ciclo de vida na produção de café orgânico / Paulo
Seiiti Araújo Hamasaki. - 2026.

77 p. : il.

Orientadora: Marcela de Castro Nunes Santos Terra

Dissertação (Mestrado Profissional) - Universidade Federal de Lavras, 2026.
Bibliografia.

1. Pegada de carbono. 2. Cafeicultura orgânica. 3. Custeio do ciclo de vida. 4.
Gases de efeito estufa. 5. Viabilidade econômica. I. Terra, Marcela de Castro Nunes
Santos. II. Universidade Federal de Lavras. III. Título.

PAULO SEIITI ARAÚJO HAMASAKI

**PEGADA DE CARBONO E CUSTEIO DO CICLO DE VIDA NA PRODUÇÃO
DE CAFÉ ORGÂNICO**

**CARBON FOOTPRINT ASSESSMENT AND LIFE CYCLE COSTING IN
ORGANIC COFFEE PRODUCTION**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação Desenvolvimento Sustentável e Extensão, com o objetivo de obtenção do título de Mestre.

APROVADO em 29 de junho de 2026.

Profa. Dra. Marcela De Castro Nunes Santos Terra - UFLA

Prof. Dr. Rafael Eduardo Chiodi – UFLA

Profa. Dra. Elaine Cristina Teixeira - UFSJ

-

Documento assinado digitalmente
 **MARCELA DE CASTRO NUNES SANTOS TERRA**
Data: 13/10/2026 09:46:01-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Profa. Dra. Marcela De Castro Nunes Santos Terra
Orientadora

LAVRAS-MG

2026

A Deus, pela proteção e pelas oportunidades ao longo da minha caminhada.

Aos meus pais, Paulo e Quitéria, por serem meus pilares, pelo apoio incondicional e por todo esforço dedicado à minha formação e aos meus sonhos.

Aos meus irmãos, Takashi e Taiki, pelo companheirismo, amizade e por estarem sempre ao meu lado.

DEDICO

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, a Deus, pela vida, pela proteção constante e por me conceder força e sabedoria ao longo de toda a minha caminhada.

Aos meus pais, Paulo e Quitéria, por todo amor, apoio e dedicação. Obrigado por serem minha base, por acreditarem em mim mesmo nos momentos mais difíceis e por todos os ensinamentos que levarei para a vida.

Aos meus irmãos, Takashi e Taiki, pelo companheirismo, amizade e por sempre estarem ao meu lado em todos os momentos.

Aos meus avós, Célia e Arnelindo, que fizeram parte essencial da minha trajetória. Com vocês aprendi valores que levarei para toda a vida, como felicidade, comprometimento e amor.

Aos meus familiares, em especial aos meus primos e primas, pelo apoio, incentivo e por tornarem essa caminhada mais leve e significativa.

Aos colegas da Universidade Federal de Lavras (UFLA), pelos momentos compartilhados, pelas trocas de conhecimento e pelas amizades construídas ao longo dessa jornada.

À minha orientadora, Profa. Dra. Marcela de Castro Nunes Santos Terra, pela paciência, compreensão e apoio ao longo da graduação e agora na pós-graduação. Agradeço pela confiança, pelos ensinamentos e pela orientação que foram fundamentais para o desenvolvimento deste trabalho.

A todos os professores e colaboradores da UFLA, que contribuíram direta ou indiretamente para a minha formação acadêmica e profissional.

Agradeço a Universidade Federal de Lavras (UFLA), pela estrutura que foi concedida a mim, a todos os professores que encontrei em minha caminhada e que foram essenciais para o meu aprendizado, a todos os funcionários da universidade por dedicarem seus esforços para a manutenção da mesma.

Ao café, que ao longo da minha trajetória acadêmica proporcionou sustento a minha família

Por fim, a todos que, de alguma forma, contribuíram para a realização deste trabalho e para a minha caminhada até aqui, o meu sincero agradecimento.

RESUMO

A crescente demanda por sistemas agrícolas sustentáveis tem impulsionado o desenvolvimento de ferramentas capazes de avaliar simultaneamente o desempenho ambiental e econômico das atividades produtivas. Nesse contexto, a cafeicultura orgânica destaca-se como uma alternativa potencial para reduzir impactos ambientais, agregar valor ao produto e promover a sustentabilidade no meio rural. O presente estudo teve como objetivo avaliar o desempenho ambiental e econômico da produção de café orgânico (*Coffea arabica* L.) no município de Maria da Fé, Minas Gerais, por meio da elaboração de inventário de gases de efeito estufa (GEE), quantificação da pegada de carbono e aplicação da metodologia de Custeio do Ciclo de Vida (CCV). A pesquisa foi conduzida em uma propriedade certificada para produção orgânica e especial, com área de 2 hectares, durante o período de 2020 a 2025. O inventário de emissões foi realizado utilizando a ferramenta GHG Protocol Cafeicultura, desenvolvida para as condições da cafeicultura brasileira, considerando emissões diretas, indiretas e processos de remoção de carbono associados à biomassa vegetal e à mudança de uso e ocupação do solo. A avaliação econômica foi conduzida por meio do CCV, utilizando indicadores financeiros como Valor Presente Líquido (VPL), Taxa Interna de Retorno (TIR) e Payback Descontado. Os resultados demonstraram emissões acumuladas de 19,92 t CO₂e ao longo do período avaliado, correspondendo a uma pegada de carbono bruta de 1,92 kg CO₂e kg⁻¹ de café produzido. Entretanto, quando consideradas as remoções de carbono decorrentes do crescimento da biomassa e da conversão da área anteriormente ocupada por pastagem para cafezal, observou-se balanço líquido acumulado de -99,54 t CO₂e, resultando em pegada de carbono líquida de -9,59 kg CO₂e kg⁻¹ de café. Esses resultados evidenciam que o sistema produtivo atuou como sumidouro líquido de carbono durante todo o período analisado. Sob a perspectiva econômica, a atividade apresentou Valor Presente Líquido de R\$ 9.876,45, Taxa Interna de Retorno de 17,61% ao ano e Payback Descontado de 3,45 anos, indicando viabilidade financeira mesmo diante dos elevados investimentos iniciais associados à implantação da lavoura e à manutenção da certificação orgânica. A integração entre os indicadores ambientais e econômicos demonstrou que a produção de café orgânico pode conciliar rentabilidade econômica e mitigação das mudanças climáticas, reforçando seu potencial como estratégia de desenvolvimento sustentável para a cafeicultura brasileira. Além de contribuir para a geração de renda e fortalecimento da agricultura familiar, os resultados fornecem subsídios técnicos para produtores, cooperativas e formuladores de políticas públicas voltadas à agricultura de baixo carbono. O estudo amplia o conhecimento sobre a relação entre sustentabilidade ambiental e viabilidade econômica na cafeicultura, servindo como referência para futuras pesquisas e para a construção de sistemas produtivos mais resilientes, competitivos e alinhados às demandas ambientais contemporâneas.

Palavras-chave: cafeicultura orgânica; pegada de carbono; gases de efeito estufa; custeio do ciclo de vida; sustentabilidade; agricultura de baixo carbono.

ABSTRACT

The growing demand for sustainable agricultural systems has driven the development of tools capable of simultaneously assessing the environmental and economic performance of productive activities. In this context, organic coffee farming stands out as a potential alternative for reducing environmental impacts, adding value to agricultural products, and promoting sustainability in rural areas. This study aimed to evaluate the environmental and economic performance of organic coffee production (*Coffea arabica* L.) in the municipality of Maria da Fé, Minas Gerais, Brazil, through the preparation of a greenhouse gas (GHG) inventory, carbon footprint quantification, and the application of the Life Cycle Costing (LCC) methodology. The research was conducted on a certified organic and specialty coffee farm covering 2 hectares during the period from 2020 to 2025. The emissions inventory was developed using the GHG Protocol Coffee Production Tool, specifically designed for Brazilian coffee-growing conditions, considering direct and indirect emissions as well as carbon removal processes associated with plant biomass and land-use change. The economic assessment was carried out using Life Cycle Costing, employing financial indicators such as Net Present Value (NPV), Internal Rate of Return (IRR), and Discounted Payback Period. The results showed cumulative emissions of 19.92 t CO₂e over the evaluated period, corresponding to a gross carbon footprint of 1.92 kg CO₂e kg⁻¹ of coffee produced. However, when carbon removals resulting from biomass growth and the conversion of a former pasture area into a coffee plantation were considered, a cumulative net balance of -99.54 t CO₂e was observed, resulting in a net carbon footprint of -9.59 kg CO₂e kg⁻¹ of coffee. These findings demonstrate that the production system acted as a net carbon sink throughout the entire study period. From an economic perspective, the activity presented a Net Present Value of R\$ 9,876.45, an Internal Rate of Return of 17.61% per year, and a Discounted Payback Period of 3.45 years, indicating financial viability despite the substantial initial investments required for plantation establishment and maintenance of organic certification. The integration of environmental and economic indicators demonstrated that organic coffee production can reconcile economic profitability with climate change mitigation, reinforcing its potential as a sustainable development strategy for Brazilian coffee farming. In addition to contributing to income generation and strengthening family farming, the results provide technical support for farmers, cooperatives, and policymakers involved in low-carbon agriculture initiatives. The study expands current knowledge regarding the relationship between environmental sustainability and economic viability in coffee production, serving as a reference for future research and for the development of more resilient, competitive, and environmentally responsible production systems aligned with contemporary sustainability challenges.

Keywords: organic coffee farming; carbon footprint; greenhouse gas emissions; life cycle costing; sustainability; low-carbon agriculture.

Impactos sociais, tecnológicos, econômicos e culturais

A integração entre a quantificação da pegada de carbono e a análise econômica da produção de café orgânico contribui para o desenvolvimento de ferramentas de gestão capazes de apoiar a tomada de decisão no setor cafeeiro. A utilização conjunta do GHG Protocol Cafeicultura e do Custeio do Ciclo de Vida possibilita avaliar simultaneamente o desempenho ambiental e econômico dos sistemas produtivos, fornecendo informações estratégicas para produtores rurais, cooperativas e empresas do agronegócio. Resultados obtidos demonstram que práticas agrícolas sustentáveis podem ser compatíveis com a viabilidade econômica da atividade, incentivando a adoção de sistemas produtivos de menor impacto ambiental. Além disso, a geração de indicadores relacionados à pegada de carbono pode subsidiar processos de certificação orgânica, certificações socioambientais, rastreabilidade da produção e iniciativas voltadas para mercados diferenciados, agregando valor ao produto e ampliando sua competitividade. Sob a perspectiva social, a pesquisa fornece informações que podem auxiliar agricultores familiares na avaliação de investimentos e na implantação de novas lavouras, reduzindo incertezas associadas aos custos de produção, retorno financeiro e desempenho ambiental da atividade. A adoção de sistemas produtivos sustentáveis também pode contribuir para a geração de renda, fortalecimento das comunidades rurais e permanência das famílias no campo. Do ponto de vista ambiental, o estudo evidencia o potencial da cafeicultura orgânica como estratégia de mitigação das mudanças climáticas, demonstrando que sistemas agrícolas podem atuar simultaneamente como fontes e sumidouros de carbono. Dessa forma, a pesquisa contribui para a disseminação de práticas conservacionistas, para a promoção da agricultura de baixo carbono e para o fortalecimento de políticas públicas voltadas ao desenvolvimento sustentável. Os resultados obtidos ampliam o conhecimento sobre a integração entre desempenho ambiental e econômico na cafeicultura, área ainda pouco explorada na literatura nacional, servindo como referência para futuras pesquisas e para a construção de modelos produtivos mais sustentáveis, resilientes e alinhados às demandas ambientais, sociais e econômicas da sociedade contemporânea.

Social, technological, economic and cultural impacts

The integration of carbon footprint quantification and the economic analysis of organic coffee production contributes to the development of management tools capable of supporting decision-making in the coffee sector. The combined use of the GHG Protocol for Coffee Production and Life Cycle Costing (LCC) enables the simultaneous assessment of the environmental and economic performance of production systems, providing strategic information for farmers, cooperatives, and agribusiness companies. The results obtained demonstrate that sustainable agricultural practices can be compatible with the economic viability of the activity, encouraging the adoption of production systems with lower environmental impacts. Furthermore, the generation of carbon footprint indicators can support organic certification processes, socio-environmental certifications, production traceability, and initiatives aimed at differentiated markets, adding value to the product and increasing its competitiveness. From a social perspective, the research provides information that can assist family farmers in evaluating investments and establishing new coffee plantations, reducing uncertainties associated with production costs, financial returns, and the environmental performance of the activity. The adoption of sustainable production systems may also contribute to income generation, the strengthening of rural communities, and the permanence of families in rural areas. From an environmental perspective, the study highlights the potential of organic coffee production as a climate change mitigation strategy, demonstrating that agricultural systems can simultaneously act as both carbon sources and carbon sinks. In this way, the research contributes to the dissemination of conservation practices, the promotion of low-carbon agriculture, and the strengthening of public policies aimed at sustainable development. The findings also expand knowledge regarding the integration of environmental and economic performance in coffee production, a topic that remains relatively underexplored in the national scientific literature. As such, the study can serve as a reference for future research and for the development of more sustainable, resilient production models that are aligned with the environmental, social, and economic demands of contemporary society.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	12
2. OBJETIVOS.....	14
2.1. Objetivos Específicos	14
3. REFERENCIAL TEÓRICO.....	15
3.1. Cafeicultura Brasileira: Aspectos Econômicos e Sistemas de Produção	15
3.2. Mudanças climáticas e produção Orgânica	18
3.3. Inventário de gases de efeito estufa e pegada de carbono.....	20
3.3.1 Pegada de carbono na cafeicultura.....	22
3.3.2 Pegada de carbono na produção de café convencional e orgânico	24
3.4 Custeio do Ciclo de Vida (CCV)	26
4. MATERIAL E MÉTODOS	27
4.1. Metodologia para inventário de gases de efeito estufa e pegada de carbono. 28	
4.1.1 Caracterização da área de estudo	28
4.1.2 Ferramenta de cálculo e base metodológica	30
4.1.3 Limites do sistema	31
4.1.4 Inventário dos dados de atividade	32
4.1.5 Insumos complementares não contabilizados pelo GHG Protocol	
Cafeicultura 35	
4.1.6 Cálculo da pegada de carbono	37
4.2 Metodologia custeio do ciclo de vida (CCV)	39
4.2.1 Coleta dos dados econômicos	39
4.2.2 Estruturação dos custos e Horizonte de análise	41
4.2.3 Taxa mínima de atratividade.....	41
3.2.4 Indicadores de viabilidade econômica	41
5. RESULTADOS.....	44
5.1. Inventário de gases de efeito estufa e pegada de carbono	44

5.2. Custeio do Ciclo de vida (CCV).....	49
5.3. Discussão	54
5.3.1 Discussão da Pegada de Carbono	55
5.3.2 Discussão do Custeio do Ciclo de Vida	58
5.3.3 Integração entre desempenho ambiental e econômico	60
6. CONCLUSÃO	62
7. RESULTADOS ESPERADOS e IMPACTOS CIENTÍFICOS, TECNOLÓGICOS E SOCIAIS	64
7.1. Resultados esperados	64
7.2. Impacto científico.....	65
7.3. Impacto tecnológico	66
7.4. Impacto social	67
7.5. Impacto ambiental	68
8. REFERÊNCIAS	70

1. INTRODUÇÃO

O café é uma das culturas agrícolas de maior relevância no cenário mundial, exercendo papel estratégico na economia global. Reconhecido como a segunda commodity mais comercializada internacionalmente, atrás apenas do petróleo, o café apresenta ampla inserção nos mercados internacionais e elevada importância socioeconômica, especialmente para países produtores (MARCOMINI, 2020). Nesse contexto, o Brasil destaca-se como um dos principais centros de produção, consumo interno e exportação do produto. Entre 2014 e 2022, o consumo mundial de café aumentou de 144,1 para 170,2 milhões de sacas, enquanto o setor movimentou aproximadamente US\$ 23,5 bilhões em 2022 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DE CAFÉ, 2022). Dentre os estados produtores, Minas Gerais ocupa posição de liderança nacional, tendo sido responsável por cerca de 28,29 milhões das 30,6 milhões de sacas produzidas no Brasil em 2023, o que representou aproximadamente US\$ 6,4 bilhões em receitas (CONAB, 2023).

Apesar da expressiva importância econômica, o setor cafeeiro enfrenta desafios crescentes relacionados à sustentabilidade ambiental e à necessidade de adaptação a novas exigências de mercado. O modelo de agricultura convencional, historicamente predominante, tem sido progressivamente questionado em função dos impactos ambientais associados ao uso intensivo de insumos químicos, à degradação do solo e à contribuição para a emissão de gases de efeito estufa (GEE) (LANES JUNIOR, 2013). Paralelamente, observa-se uma ampliação da consciência socioambiental por parte dos consumidores, que passaram a demandar produtos obtidos por meio de sistemas produtivos mais sustentáveis, ambientalmente responsáveis e socialmente justos.

A compreensão das diferenças estruturais entre os sistemas de produção convencional e orgânico é fundamental para a contextualização das análises ambientais e econômicas. O manejo convencional caracteriza-se, em geral, pelo uso de fertilizantes minerais solúveis e defensivos sintéticos, com o objetivo de maximizar a produtividade, o que pode resultar em maior variabilidade espacial e alterações mais intensas nos atributos químicos do solo (SILVA et al., 2010). Em contraste, o sistema orgânico prioriza práticas agroecológicas, como adubação orgânica, cobertura vegetal permanente e manejo conservacionista, promovendo maior estabilidade dos atributos do solo e integração com processos naturais, além de restringir o uso de insumos sintéticos (AZEVEDO JÚNIOR, 2011). Essas distinções refletem-se não apenas no

desempenho agrônômico, mas também no perfil de emissões de GEE e nos custos associados às diferentes etapas do ciclo produtivo.

A produção convencional de café tem sido associada a impactos ambientais relevantes, especialmente no que se refere às emissões de GEE, contribuindo para o agravamento das mudanças climáticas (LOPES et al., 2014). Diante desse cenário, cresce a pressão por cadeias produtivas mais sustentáveis, impulsionando produtores, cooperativas e empresas a adotarem tecnologias, práticas de manejo e instrumentos de gestão capazes de reduzir impactos ambientais e, simultaneamente, manter a viabilidade econômica da atividade (DE AMORIM et al., 2022).

Nesse contexto, destaca-se o conceito de pegada de carbono, que busca quantificar as emissões de GEE associadas ao ciclo de vida de produtos e processos produtivos. Ferramentas baseadas no GHG Protocol, aliadas a metodologias de avaliação econômica como o Custeio do Ciclo de Vida (CCV), configuram-se como instrumentos fundamentais para mensurar, comparar e compreender, de forma integrada, os impactos ambientais e os custos associados a diferentes sistemas de produção (VLAD, 2023). Enquanto o inventário de emissões permite avaliar o desempenho ambiental ao longo das etapas produtivas, o CCV amplia essa abordagem ao incorporar custos diretos e indiretos relacionados à implantação, operação, manutenção e beneficiamento, possibilitando análises mais abrangentes e robustas (IANNONE et al., 2018; VLADISAVLJEVIĆ; VUKASOVIĆ, 2017).

No presente estudo, a estimativa da pegada de carbono foi realizada por meio de uma ferramenta específica para a cafeicultura brasileira, desenvolvida a partir da atualização da Ferramenta de Cálculo para Balanço de Emissões de Gases de Efeito Estufa em Florestas e Sistemas Agroflorestais no Brasil, elaborada pelo CEPAGRI/Unicamp, com apoio da Cooxupé, e adaptada às particularidades do sistema produtivo do café. A aplicação integrada do inventário de emissões de GEE e do CCV permite uma avaliação conjunta do desempenho ambiental e econômico da produção cafeeira, fortalecendo o embasamento técnico-científico necessário à proposição de práticas mais sustentáveis e competitivas.

Além disso, este estudo está inserido em um contexto real de produção, sendo conduzido em um sistema de café (*Coffea arabica*) orgânico localizado no município de Maria da Fé, Minas Gerais. A área de estudo corresponde a uma propriedade rural com aproximadamente 2 ha, cuja produção contempla todas as etapas do processo produtivo, desde a implantação da lavoura, adubação e correção do solo até o beneficiamento e secagem natural em estufa. A análise baseia-se em dados primários coletados em campo, obtidos por meio de pesquisa

quantitativa, seguindo diretrizes metodológicas consolidadas na literatura, o que confere rigor e confiabilidade aos resultados.

Dessa forma, a integração entre indicadores ambientais e econômicos permite não apenas caracterizar o desempenho do sistema de produção orgânico, mas também subsidiar a proposição de cenários produtivos que conciliem a redução da pegada de carbono com a viabilidade financeira da atividade cafeeira, contribuindo para a tomada de decisões mais sustentáveis no setor.

2. OBJETIVOS

Avaliar o desempenho ambiental e econômico de um sistema de produção de café orgânico certificado, conduzido em uma propriedade no município de Maria da Fé, Minas Gerais, no período de 2020 a 2025.

2.1. Objetivos Específicos

- Quantificar as emissões de gases de efeito estufa (GEE) associadas às diferentes etapas do processo produtivo do café orgânico, com base na metodologia do GHG Protocol e em diretrizes reconhecidas de inventário de emissões.
- Calcular a pegada de carbono da unidade funcional estabelecida (por exemplo, 1 kg de café beneficiado), considerando os limites do sistema previamente definidos.
- Levantar e estimar os custos de produção do café orgânico ao longo de todo o seu ciclo de vida, desde a fase de implantação até o beneficiamento, utilizando a metodologia de Custeio do Ciclo de Vida (CCV).
- Identificar os pontos críticos (hotspots) ambientais e financeiros do sistema, ou seja, as etapas responsáveis pelas maiores emissões e pelos maiores custos;
- Confrontar os resultados obtidos com valores reportados na literatura para sistemas de produção convencionais.
- Integrar os resultados ambientais e econômicos obtidos, a fim de propor cenários de produção que conciliem a redução da pegada de carbono com a viabilidade financeira da atividade cafeeira.
- Fornecer subsídios técnicos que possam apoiar produtores, cooperativas e formuladores de políticas públicas na adoção de práticas mais sustentáveis e competitivas no setor cafeeiro.

3. REFERENCIAL TEÓRICO

O presente capítulo apresenta os fundamentos teóricos que sustentam a análise proposta, com o objetivo de contextualizar e embasar a avaliação comparativa dos sistemas de produção de café orgânico e convencional sob a perspectiva da sustentabilidade ambiental e econômica. Inicialmente, são discutidas as mudanças climáticas e seus desdobramentos sobre o setor agropecuário, destacando sua dupla condição de relevante fonte de emissões de gases de efeito estufa (GEE) e, simultaneamente, seu potencial de mitigação por meio da adoção de práticas conservacionistas e sistemas produtivos de base agroecológica.

Na sequência, aborda-se a pegada de carbono como instrumento metodológico central do estudo, amplamente reconhecido por sua capacidade de quantificar as emissões de GEE associadas às diferentes etapas do processo produtivo. Essa abordagem permite identificar as principais fontes emissoras, subsidiando a proposição de estratégias voltadas à redução de impactos ambientais e ao aumento da eficiência dos sistemas produtivos.

Adicionalmente, incorpora-se a abordagem do Custeio do Ciclo de Vida (CCV), que amplia a análise econômica ao considerar todos os custos associados ao sistema produtivo ao longo do tempo, desde a implantação até a fase produtiva. O CCV constitui uma ferramenta estratégica para o planejamento e a gestão de sistemas agroindustriais, permitindo avaliar a viabilidade econômica de forma integrada aos aspectos ambientais.

Dessa forma, a integração entre a pegada de carbono e o custeio do ciclo de vida configura-se como um arcabouço analítico robusto para a compreensão e o aprimoramento dos sistemas produtivos cafeeiros, especialmente em um contexto de transição para economias de baixo carbono e crescente pressão por sustentabilidade no setor agropecuário.

3.1. Cafeicultura Brasileira: Aspectos Econômicos e Sistemas de Produção

A cafeicultura possui expressiva relevância econômica, social e ambiental para o Brasil, sendo uma das principais atividades agrícolas do país. O Brasil ocupa posição de destaque no cenário mundial como maior produtor e exportador de café, desempenhando papel fundamental no abastecimento do mercado internacional e na geração de renda para milhares de produtores rurais. A atividade está distribuída em diferentes regiões brasileiras, com destaque para Minas Gerais, estado responsável pela maior parcela da produção nacional de café arábica,

consolidando-se como referência na produção e comercialização do grão (ARÊDES; PEREIRA, 2008).

Além de sua importância econômica, a cafeicultura exerce relevante função social, especialmente entre pequenos e médios produtores rurais. Em diversas regiões brasileiras, a produção de café constitui a principal fonte de renda das famílias agricultoras, contribuindo para a geração de empregos diretos e indiretos ao longo de toda a cadeia produtiva. Em estados como Rondônia, por exemplo, a atividade é desenvolvida majoritariamente por agricultores familiares, evidenciando sua relevância para o desenvolvimento regional e para a manutenção da população no meio rural (ROSA NETO; ARAÚJO; SILVA, 2025).

O mercado cafeeiro caracteriza-se por elevada competitividade e por forte influência de fatores externos, como condições climáticas, flutuações cambiais e oscilações na oferta e demanda mundial. Essas variáveis afetam diretamente os preços do produto e a rentabilidade dos sistemas produtivos. Além disso, a cultura do café apresenta a característica da bienalidade produtiva, que resulta em alternância entre safras de maior e menor produtividade, aumentando os riscos econômicos associados à atividade (ARÊDES; PEREIRA, 2008). Nos últimos anos, observou-se expressiva valorização do café no mercado brasileiro. Segundo dados da Cooperativa Regional de Cafeicultores em Guaxupé (COOXUPÉ, 2025), o preço médio da saca passou de R\$ 542,09 em 2020 para R\$ 1.962,27 em 2025, representando um aumento superior a 260% no período Tabela 1. Entretanto, essa trajetória não ocorreu de forma linear, sendo observadas oscilações anuais associadas a eventos climáticos, restrições na oferta global, custos crescentes de produção e alterações na dinâmica do comércio internacional. Embora a elevação dos preços possa aumentar a receita dos produtores, a volatilidade do mercado continua sendo um dos principais desafios da cafeicultura, exigindo estratégias que promovam maior estabilidade econômica e agregação de valor ao produto.

Tabela 1 Preço médio da saca de café dos últimos 5 anos.

Ano	Média (R\$)
2025	1.962,27
2024	1.303,97
2023	954,91
2022	1.185,98

Ano	Média (R\$)
2021	886,80
2020	542,09

Fonte: COOXUPÉ, 2025.

Historicamente, o sistema convencional de produção tem predominado na cafeicultura brasileira. Esse modelo produtivo é caracterizado pelo uso intensivo de fertilizantes minerais, corretivos de solo, defensivos agrícolas e mecanização, visando maximizar a produtividade e a eficiência operacional das lavouras. Embora esse sistema apresente elevados níveis de produção, sua dependência de insumos externos torna os custos produtivos fortemente suscetíveis às oscilações de preços dos fertilizantes, combustíveis e agroquímicos, fatores que podem comprometer a rentabilidade da atividade em determinados períodos (MARCOMINI, 2013).

Nesse contexto, observa-se nas últimas décadas o crescimento de sistemas produtivos diferenciados, especialmente aqueles voltados para a produção de cafés especiais e orgânicos. Esse movimento é impulsionado por consumidores cada vez mais preocupados com a qualidade dos alimentos, a sustentabilidade ambiental e as condições sociais de produção. A valorização desses atributos permite que produtores obtenham preços superiores aos praticados no mercado convencional, agregando valor ao produto final (MARCOMINI, 2013).

A produção orgânica de café baseia-se na utilização de práticas agrícolas que priorizam a manutenção da fertilidade natural do solo, o equilíbrio ecológico e a redução da dependência de insumos sintéticos (MÄDER et al., 2002; MEEMKEN; QAIM, 2018). Entre as principais técnicas empregadas destacam-se o uso de adubação orgânica, compostagem, adubação verde, cobertura do solo e controle biológico de pragas e doenças (LOPES et al., 2014; DE AMORIM; OLIVEIRA, 2022). Essas práticas buscam promover a sustentabilidade do sistema produtivo, reduzindo impactos ambientais e fortalecendo os processos biológicos naturais da propriedade agrícola, com efeitos já documentados sobre os atributos químicos e microbiológicos do solo em lavouras cafeeiras conduzidas sob manejo orgânico (AZEVEDO JUNIOR, 2015; SOUZA, 2023).

Apesar dos benefícios ambientais associados ao sistema orgânico, sua adoção ainda enfrenta diversos desafios. Entre os principais obstáculos destacam-se a menor disponibilidade de insumos certificados, a necessidade de maior conhecimento técnico, o período de transição exigido para certificação e, em muitos casos, produtividades inferiores às observadas nos

sistemas convencionais. Além disso, o manejo orgânico geralmente demanda maior intensidade de mão de obra, elevando os custos operacionais da produção.

Por outro lado, diversos estudos demonstram que a menor produtividade pode ser compensada pelos preços diferenciados obtidos no mercado de cafés orgânicos. O pagamento de prêmios ao produtor, associado a crescente demanda por produtos sustentáveis, tem contribuído para aumentar a atratividade econômica desse sistema produtivo. Dessa forma, a análise da viabilidade econômica da cafeicultura não deve considerar apenas a produtividade física da lavoura, mas também aspectos relacionados aos custos de produção, preços de comercialização e retorno financeiro ao longo do ciclo produtivo (ROSA NETO; ARAÚJO; SILVA, 2025).

A rentabilidade da cafeicultura está diretamente relacionada à eficiência do sistema produtivo. Estudos econômicos demonstram que a adoção de tecnologias adequadas pode elevar a produtividade, reduzir custos unitários de produção e aumentar os retornos financeiros da atividade. Entretanto, sistemas mais intensivos frequentemente exigem maiores investimentos iniciais e maiores gastos com insumos, exigindo análises detalhadas para verificar sua viabilidade econômica (ARÊDES; PEREIRA, 2008).

Diante desse cenário, a produção orgânica de café surge como uma alternativa estratégica para a diversificação da atividade cafeeira brasileira, especialmente em nichos de mercado que valorizam atributos relacionados à sustentabilidade e à qualidade do produto. Embora apresente desafios técnicos e produtivos, esse sistema possui potencial para agregar valor à produção, reduzir a dependência de insumos externos e contribuir para a sustentabilidade econômica das propriedades rurais, tornando-se uma importante alternativa para o fortalecimento da cafeicultura nacional.

3.2. Mudanças climáticas e produção Orgânica

A agropecuária é reconhecida como um dos setores mais relevantes nas discussões sobre mudanças climáticas, tanto por sua vulnerabilidade quanto pelo seu potencial de mitigação (IPCC, 2023). As atividades agrícolas e pecuárias contribuem significativamente para as emissões de gases de efeito estufa (GEE), destacando-se o dióxido de carbono (CO_2), proveniente da conversão do uso da terra e degradação do solo; o metano (CH_4), oriundo da fermentação entérica dos ruminantes; e o óxido nitroso (N_2O), resultante da aplicação de fertilizantes nitrogenados (LEWANDOWSKI et al., 2018). Ao mesmo tempo, práticas insustentáveis como o uso intensivo de insumos e a homogeneização das paisagens agrícolas

comprometem a integridade da biosfera e excedem os limites planetários de uso do solo, nutrientes e biodiversidade. Nesse contexto, a bioeconomia surge como um modelo promissor ao promover o uso sustentável da biomassa e o desenvolvimento de tecnologias baseadas no conhecimento biológico, com vistas à transição para uma economia de baixo carbono. Estratégias como a intensificação sustentável, o sequestro de carbono no solo e o uso eficiente de recursos naturais estão entre os pilares de uma agropecuária alinhada à bioeconomia. Assim, a integração entre produção agrícola e objetivos ambientais torna-se fundamental para garantir a segurança alimentar global sem extrapolar a capacidade de resiliência do planeta.

Diante desse cenário, a produção orgânica de alimentos tem ganhado destaque como alternativa sustentável, uma vez que adota práticas que favorecem o equilíbrio ecológico, a saúde do solo e a redução das emissões de GEE. Por outro lado, os sistemas convencionais de produção, com base na mecanização intensiva e no uso de insumos químicos sintéticos, têm sido amplamente associados à degradação ambiental, emissão de poluentes e esgotamento dos recursos naturais. Estudos indicam que, embora a agricultura convencional ofereça maior produtividade por área, os custos ambientais associados à sua prática são significativos (CLARK & TILMAN, 2017; MEEMKEN & QAIM, 2018).

Estudos baseados na quantificação da pegada de carbono indicam que, por hectare, os sistemas orgânicos tendem a emitir menos gases de efeito estufa, consumir menos energia e favorecer o sequestro de carbono no solo (COLTRO et al., 2022). No entanto, quando os impactos são avaliados por unidade de produto, as emissões podem se igualar ou até superar as do sistema convencional, devido à menor produtividade orgânica — o que representa um dos principais desafios à sua adoção em larga escala (SOUZA, 2023). Essa diferença de produtividade, frequentemente denominada “yield gap”, pode resultar em maior demanda por área cultivada, comprometendo parte dos benefícios ambientais associados aos sistemas orgânicos caso não sejam adotadas estratégias de intensificação sustentável.

Apesar desse desafio, a produção orgânica demonstra maior resiliência frente aos efeitos das mudanças climáticas. Práticas como adubação orgânica, cobertura vegetal permanente e ausência de defensivos químicos promovem maior retenção de umidade no solo, redução da erosão, incremento da matéria orgânica e estímulo à biodiversidade. Essas características tornam os sistemas orgânicos mais estáveis em períodos de estresse hídrico, como secas prolongadas. Experimentos de longo prazo, como o DOK, realizado na Suíça, evidenciaram que os sistemas orgânicos operam com 76% menos nitrogênio mineral, reduzem as emissões de óxidos de nitrogênio em até 56%, e mantêm cerca de 85% da produtividade dos sistemas convencionais (MÄDER et al., 2002).

Além da redução no uso de fertilizantes sintéticos, os sistemas orgânicos frequentemente apresentam maior potencial de acúmulo de carbono no solo devido ao aporte contínuo de resíduos vegetais, compostos orgânicos e à menor intensidade de revolvimento do solo. O aumento dos estoques de carbono edáfico contribui para a mitigação das mudanças climáticas, uma vez que parte do carbono atmosférico é incorporada à matéria orgânica do solo e permanece armazenada por longos períodos. Dessa forma, o solo passa a desempenhar papel fundamental no balanço de carbono dos sistemas agrícolas, podendo reduzir significativamente a pegada de carbono líquida da produção.

Portanto, a comparação entre os sistemas orgânico e convencional, diante das mudanças climáticas e da sustentabilidade, exige uma análise sistêmica que considere tanto os aspectos produtivos quanto os impactos ambientais e sociais. Estudos como o presente, que avaliam a pegada de carbono de diferentes sistemas produtivos, contribuem significativamente para fundamentar políticas públicas, incentivar boas práticas agrícolas e apoiar uma transição agroecológica capaz de respeitar os limites planetários e assegurar a segurança alimentar. Em culturas perenes, como o cafeeiro, o acúmulo de carbono na biomassa e no solo pode representar parcela significativa do balanço de carbono do sistema produtivo.

No contexto da cafeicultura, a avaliação da pegada de carbono torna-se particularmente relevante, uma vez que permite identificar as principais fontes de emissão associadas ao sistema produtivo, bem como quantificar o potencial de sequestro de carbono da cultura e do solo. Essas informações contribuem para o desenvolvimento de estratégias de manejo mais sustentáveis, para a valorização de sistemas produtivos de baixa emissão de carbono e para a inserção da cadeia produtiva do café em mercados cada vez mais orientados por critérios ambientais, climáticos e de sustentabilidade.

3.3. Inventário de gases de efeito estufa e pegada de carbono.

As mudanças climáticas representam um dos principais desafios ambientais do século XXI, sendo impulsionadas pelo aumento das concentrações atmosféricas de gases de efeito estufa (GEE) provenientes das atividades antrópicas. Entre os principais gases responsáveis pelo aquecimento global destacam-se o dióxido de carbono (CO_2), o metano (CH_4) e o óxido nitroso (N_2O), cujas emissões têm contribuído para alterações nos padrões climáticos, aumento da frequência de eventos extremos e impactos significativos sobre os sistemas produtivos agrícolas (IPCC, 2023).

Nesse contexto, os inventários de gases de efeito estufa constituem importantes ferramentas para quantificação, monitoramento e gestão das emissões e remoções de carbono associadas às atividades humanas. Segundo o IPCC (2006), os inventários consistem na compilação sistemática das emissões antrópicas por fontes e das remoções por sumidouros, utilizando metodologias padronizadas que garantem transparência, consistência e comparabilidade dos resultados. Dessa forma, os inventários fornecem subsídios para políticas públicas, estratégias corporativas de mitigação e acompanhamento de metas climáticas.

Entre as metodologias mais difundidas para contabilização de emissões destaca-se o Greenhouse Gas Protocol (GHG Protocol), desenvolvido pelo World Resources Institute (WRI) e pelo World Business Council for Sustainable Development (WBCSD). O protocolo estabelece diretrizes para identificação e quantificação das fontes emissoras, classificando-as em emissões diretas (Escopo 1), emissões indiretas provenientes da aquisição de energia (Escopo 2) e outras emissões indiretas relacionadas à cadeia de valor (Escopo 3) (WRI; WBCSD, 2014). Na agricultura, essa metodologia possibilita a contabilização das emissões associadas ao uso de fertilizantes, corretivos agrícolas, combustíveis fósseis, manejo do solo e mudanças no uso da terra.

A quantificação das emissões em sistemas agrícolas apresenta elevada complexidade devido à diversidade de fontes envolvidas. Na cafeicultura, destacam-se as emissões provenientes da aplicação de fertilizantes nitrogenados, do uso de corretivos agrícolas, do consumo de combustíveis em operações mecanizadas e das emissões do solo decorrentes dos processos biogeoquímicos relacionados ao nitrogênio. Estudos recentes demonstram que a adubação nitrogenada frequentemente representa a principal fonte de emissões de gases de efeito estufa na produção cafeeira, evidenciando a importância do manejo nutricional como estratégia de mitigação (Ronquim et al., 2025).

Complementarmente aos inventários de emissões, a pegada de carbono tem sido amplamente utilizada como indicador do desempenho climático de produtos e sistemas produtivos. De acordo com a ISO 14067 (2023), a pegada de carbono corresponde à soma das emissões e remoções de gases de efeito estufa associadas a um produto, processo ou sistema, expressa em dióxido de carbono equivalente (CO₂eq). A metodologia busca quantificar a contribuição líquida de uma atividade para as mudanças climáticas, permitindo identificar fontes prioritárias de emissão e oportunidades de redução.

A norma ISO 14067 estabelece requisitos e orientações para quantificação, monitoramento, comunicação e relato da pegada de carbono, assegurando maior robustez metodológica e comparabilidade entre estudos. Além disso, a norma reconhece a importância

da inclusão das remoções de carbono quando cientificamente demonstradas, aspecto particularmente relevante para sistemas agrícolas que apresentam potencial de sequestro de carbono na biomassa e no solo.

Nos sistemas agrícolas, especialmente em culturas perenes, a consideração simultânea das emissões e remoções de carbono permite avaliar o balanço líquido de carbono do sistema produtivo. O cafeeiro possui capacidade de remover carbono atmosférico por meio da fotossíntese, armazenando-o na biomassa vegetal e contribuindo para o aumento dos estoques de carbono do solo. Dessa forma, a análise da pegada de carbono torna-se mais abrangente ao incorporar não apenas as fontes emissoras, mas também os processos de sequestro de carbono associados ao manejo agrícola (Zaro et al., 2020).

Na cafeicultura brasileira, estudos recentes evidenciam o potencial da cultura para atuar como sumidouro de carbono. Ronquim et al. (2025) verificaram que lavouras de café Robusta na Amazônia brasileira apresentaram remoções de carbono superiores às emissões geradas durante a produção, resultando em balanço líquido positivo de carbono. Resultados semelhantes foram observados por Araújo (2024), que constatou que os estoques de carbono na biomassa e no solo superaram as emissões associadas ao sistema produtivo, indicando potencial mitigador da cafeicultura quando manejada de forma sustentável.

Diante da crescente demanda por produtos com menor impacto climático, os inventários de gases de efeito estufa e os estudos de pegada de carbono assumem papel estratégico para a agricultura. Essas ferramentas permitem identificar as principais fontes de emissão, avaliar práticas mitigadoras, apoiar programas de certificação ambiental e fornecer informações que contribuem para a inserção de produtos agrícolas em mercados cada vez mais orientados pela sustentabilidade e pela neutralidade climática.

3.3.1 Pegada de carbono na cafeicultura

A crescente preocupação com as mudanças climáticas tem impulsionado a adoção de métricas capazes de quantificar os impactos ambientais associados às atividades produtivas. Nesse contexto, a pegada de carbono destaca-se como um dos principais indicadores utilizados para mensurar a contribuição de produtos, processos ou sistemas produtivos para o aquecimento global, sendo expressa em dióxido de carbono equivalente (CO₂eq). Esse indicador representa a soma das emissões dos diferentes gases de efeito estufa (GEE), ponderados pelo seu Potencial de Aquecimento Global (Global Warming Potential – GWP), permitindo a comparação entre diferentes atividades econômicas e sistemas produtivos (IPCC, 2019; GHG Protocol, 2025).

Na agricultura, a pegada de carbono constitui importante ferramenta para avaliação da sustentabilidade, uma vez que possibilita identificar as principais fontes emissoras de gases de efeito estufa ao longo do processo produtivo. A quantificação das emissões permite direcionar estratégias de mitigação, otimizar o uso de insumos e subsidiar políticas voltadas à produção de baixo carbono (Ronquim et al., 2025).

A cafeicultura apresenta relevância econômica e social em diversos países tropicais, incluindo o Brasil, maior produtor mundial de café arábica e segundo maior produtor de café robusta. Entretanto, assim como outras atividades agrícolas, o cultivo do café está associado à emissão de gases de efeito estufa decorrentes do uso de fertilizantes, corretivos agrícolas, combustíveis fósseis, energia elétrica e manejo do solo (Ronquim et al., 2025).

Na atividade agrícola, esses gases apresentam contribuições bastante distintas para o aquecimento global: o CH_4 possui potencial de aquecimento aproximadamente 28 vezes superior ao do CO_2 , e o N_2O , cerca de 265 vezes maior, o que torna este último especialmente relevante em sistemas que utilizam fertilização nitrogenada (ABREU et al., 2024). Na cafeicultura, a fertilização nitrogenada constitui a principal fonte de emissões de GEE: o nitrogênio aplicado ao solo sofre processos microbiológicos de nitrificação e desnitrificação, resultando na emissão de N_2O (ABREU et al., 2024; NOPONEN et al., 2012). Além disso, a produção industrial, o transporte e a aplicação desses fertilizantes contribuem significativamente para a pegada de carbono da atividade.

Resultados obtidos por Ronquim et al. (2025), avaliando 250 propriedades produtoras de café robusta na região das Matas de Rondônia, demonstraram que a pegada média de carbono da fase agrícola foi de $2.991,5 \text{ kg CO}_2\text{eq ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$, correspondendo a $0,84 \text{ kg CO}_2\text{eq}$ por quilograma de café verde produzido. Os autores identificaram que aproximadamente 79,7% das emissões estavam associadas à adubação nitrogenada, evidenciando a forte influência desse insumo sobre o desempenho ambiental da atividade.

A literatura internacional apresenta ampla variação nos valores da pegada de carbono do café, em função das diferenças de manejo, produtividade, condições edafoclimáticas e fronteiras metodológicas adotadas. Sistemas mais tecnificados tendem a apresentar maiores emissões por área devido ao maior uso de insumos, enquanto sistemas agroecológicos e orgânicos frequentemente apresentam menores emissões associadas ao uso reduzido de fertilizantes sintéticos e combustíveis fósseis (Van Rikxoort et al., 2014; Arellano e Hernández, 2023; Cornelius et al., 2025).

Por outro lado, a cafeicultura também apresenta potencial relevante para mitigação das mudanças climáticas. Por se tratar de uma cultura perene, os cafeeiros acumulam carbono na

biomassa aérea e radicular ao longo do ciclo produtivo, além de contribuírem para o aumento dos estoques de carbono no solo, especialmente quando associados a práticas conservacionistas e sistemas agroflorestais (Ronquim et al., 2025).

O sequestro de carbono pela biomassa vegetal pode compensar parcialmente ou integralmente as emissões provenientes do manejo agrícola. No estudo conduzido por Ronquim et al. (2025), o estoque médio anual de carbono acumulado na biomassa dos cafeeiros foi equivalente a $6.874,8 \text{ kg CO}_2\text{eq ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$, resultando em balanço líquido positivo de carbono de $3.883,3 \text{ kg CO}_2\text{eq ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$. Esses resultados demonstram que, sob determinadas condições de manejo, a cafeicultura pode atuar como importante sumidouro de carbono atmosférico.

Além do armazenamento de carbono na biomassa, práticas como adubação orgânica, utilização de cobertura vegetal, sistemas agroflorestais, plantio direto, manejo conservacionista do solo e uso de bioinsumos têm sido apontadas como estratégias eficientes para redução da pegada de carbono da cafeicultura. Essas práticas favorecem o aumento do estoque de carbono no solo, reduzem a dependência de fertilizantes sintéticos e contribuem para a melhoria da qualidade ambiental dos sistemas produtivos (Abreu et al., 2024).

Dessa forma, a avaliação da pegada de carbono na cafeicultura constitui importante instrumento para compreender a relação entre produção agrícola e mudanças climáticas, permitindo identificar oportunidades de mitigação, aumentar a eficiência produtiva e subsidiar iniciativas voltadas à inserção do setor cafeeiro em mercados sustentáveis e mecanismos de valorização ambiental, como os mercados voluntários de carbono e programas de certificação socioambiental.

3.3.2 Pegada de carbono na produção de café convencional e orgânico

Conforme apresentado no item anterior, a fertilização nitrogenada responde pela maior parte das emissões da produção primária de café. É justamente por isso que o manejo da adubação constitui o principal fator de diferenciação entre os sistemas convencional e orgânico, tornando a pegada de carbono um indicador adequado para compará-los e para identificar estratégias de mitigação (CORNELIUS; HARDY; HARVEY, 2025).

Essa comparação pode ser realizada por duas abordagens principais: a pegada de carbono por área cultivada (*Area Carbon Footprint* – ACF), expressa em $\text{kg CO}_2\text{eq ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$, e a pegada de carbono por unidade de produto (*Product Carbon Footprint* – PCF), expressa em $\text{kg CO}_2\text{eq kg}^{-1}$ de café verde produzido. As duas métricas são complementares: a primeira reflete a intensidade de uso de insumos por unidade de área, enquanto a segunda incorpora a

eficiência produtiva do sistema, permitindo confrontar lavouras com produtividades distintas (CORNELIUS; HARDY; HARVEY, 2025).

Em revisão meta-analítica reunindo 21 estudos sobre pegada de carbono da cafeicultura, Cornelius, Hardy e Harvey (2025) verificaram que a produção e a aplicação de fertilizantes nitrogenados representam entre 65% e 100% das emissões totais da produção primária, constituindo o principal ponto crítico (hotspot) ambiental da cadeia. Os autores identificaram pegada mediana de $1.370 \text{ kg CO}_2\text{eq ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ em sistemas orgânicos, contra aproximadamente $3.785 \text{ kg CO}_2\text{eq ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ nos sistemas não orgânicos — redução superior a 60% associada ao manejo orgânico.

Resultados semelhantes foram observados por Noponen et al. (2012), que compararam sistemas convencionais e orgânicos em países da América Central. Os autores verificaram que propriedades conduzidas sob manejo orgânico apresentaram menores emissões de GEE, em razão da ausência de fertilizantes sintéticos e da menor dependência de combustíveis fósseis, e que os sistemas agroflorestais orgânicos registraram os menores valores de pegada de carbono dentre todos os avaliados.

A adoção de sistemas agroflorestais tem sido apontada como estratégia relevante de mitigação climática na cafeicultura. Segundo Cornelius, Hardy e Harvey (2025), esses sistemas apresentaram pegadas de carbono inferiores a 50% das observadas em cultivos a pleno sol, resultado atribuído à menor utilização de fertilizantes nitrogenados e à maior capacidade de remoção de carbono atmosférico pela biomassa arbórea. Os autores verificaram remoção média de $17.676 \text{ kg CO}_2 \text{ ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ em sistemas agroflorestais, contra cerca de $6.990 \text{ kg CO}_2 \text{ ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ em sistemas sem sombreamento. Comportamento análogo foi relatado por van Rikxoort et al. (2014), que associaram maiores estoques de carbono a sistemas sombreados em diferentes regiões produtoras.

No Brasil, Santos et al. (2025) compararam sistemas conservacionistas e convencionais de produção de café e demonstraram que práticas sustentáveis de manejo reduzem as emissões e ampliam o estoque de carbono na biomassa vegetal, favorecendo balanços de carbono mais positivos ao longo do ciclo produtivo. Na mesma direção, Ronquim et al. (2025) e Araújo (2024) evidenciaram, em condições brasileiras, a importância de incorporar as remoções de carbono à avaliação ambiental da cafeicultura.

De maneira geral, a literatura converge quanto ao papel determinante do manejo da fertilidade do solo — especialmente do uso de fertilizantes nitrogenados — sobre a pegada de carbono da produção de café. Sistemas orgânicos e agroflorestais tendem a apresentar menores

emissões e maior potencial de sequestro de carbono quando comparados aos sistemas convencionais intensivos (NOPONEN et al., 2012; VAN RIKXOORT et al., 2014; ARELLANO; HERNÁNDEZ, 2023; CORNELIUS; HARDY; HARVEY, 2025; SANTOS et al., 2025). Dessa forma, a quantificação da pegada de carbono constitui ferramenta importante para subsidiar estratégias de mitigação climática, processos de certificação ambiental e iniciativas relacionadas aos mercados voluntários de carbono na cadeia produtiva do café.

3.4 Custeio do Ciclo de Vida (CCV)

O Custeio do Ciclo de Vida (CCV) é uma metodologia que permite avaliar a viabilidade econômica de projetos considerando todos os custos associados ao produto ou sistema ao longo de sua vida útil, desde sua concepção até a desativação. Esta abordagem é particularmente útil em sistemas agrícolas de longo prazo, como a produção de café, pois permite mensurar não apenas os investimentos iniciais, mas também os custos operacionais e de manutenção em diferentes cenários de mercado (VLAD et al., 2023).

Ao contrário da contabilidade tradicional, que foca majoritariamente na produção e comercialização, o CCV oferece uma visão abrangente e estratégica dos custos, permitindo a identificação de direcionadores econômicos, o apoio à tomada de decisões e o planejamento sustentável de longo prazo. Essa abordagem se mostra especialmente relevante para cadeias agroindustriais, como a do café, onde a adoção de práticas sustentáveis deve ser técnica e economicamente justificada (DHILLON, 1989; PRASARA & GHEEWALA, 2017).

Segundo VLAD et al. (2023), o CCV é uma ferramenta decisória importante para o setor agrícola por integrar dados financeiros distribuídos ao longo do tempo, permitindo comparações entre sistemas produtivos com estruturas de custo distintas. A análise cobre desde o custo de implantação até os gastos com insumos, mão de obra, energia e transporte, favorecendo uma compreensão ampla da sustentabilidade econômica dos sistemas analisados.

A metodologia é ainda mais poderosa quando associada a indicadores clássicos de análise de investimentos, como:

- Valor Presente Líquido (VPL): mede a diferença entre os fluxos de caixa descontados ao valor presente e o investimento inicial. Um VPL positivo indica que o projeto é financeiramente viável (BRUNI et al., 1998).
- Taxa Interna de Retorno (TIR): representa a taxa de desconto que iguala os fluxos de entrada e saída do projeto ao longo do tempo. Um projeto é considerado atrativo se a TIR for superior ao custo de capital (SOUZA, 2018).

Essas métricas permitem comparar a rentabilidade de sistemas de produção distintos, como o café orgânico e o convencional. SOUZA (2018) destaca que em estudos de cafeicultura, a aplicação da TIR e do VPL foi fundamental para verificar a viabilidade econômica sob diferentes cenários de preços, câmbio e custos de produção, revelando que cerca de 70% dos cenários simulados apresentaram viabilidade econômica positiva.

A análise de sensibilidade, como proposto por RODRIGUES (1991), e a simulação de cenários com variáveis de mercado (como preço internacional do café e taxa de câmbio), são técnicas complementares que aumentam a robustez da avaliação, especialmente em setores expostos a alta volatilidade como o agroindustrial.

A integração do custeio do ciclo de vida CCV com o inventário de emissões de gases de efeito estufa permite a análise conjunta de impactos econômicos e ambientais. Essa estratégia é recomendada por FREITAS e RENÓ (2022), ao avaliarem diferentes formas de aproveitamento de resíduos da produção de café e constatarem que práticas sustentáveis, embora economicamente menos atrativas em curto prazo, podem gerar benefícios ambientais expressivos.

Além disso, os métodos financeiros como o Payback descontado, o Custo Médio de Produção (CMPr) também podem ser utilizados para oferecer uma visão complementar da viabilidade dos sistemas analisados.

4. MATERIAL E MÉTODOS

A metodologia deste estudo está estruturada em três etapas complementares, que permitem uma avaliação integrada do desempenho ambiental e econômico do sistema de produção de café orgânico avaliado.

Primeiramente, foi realizado o inventário de emissões de gases de efeito estufa (GEE), com base em dados primários, visando à identificação e quantificação das emissões associadas às etapas de cultivo e processamento inicial do café. A partir desse inventário, será estimada a pegada de carbono, expressa em dióxido de carbono equivalente (CO₂e), considerando fatores de emissão reconhecidos internacionalmente, como os propostos pelo IPCC e pelas diretrizes do GHG Protocol.

Em seguida, foi conduzida a Análise de Custo do Ciclo de Vida (CCV), com o objetivo de estimar os custos diretos e indiretos ao longo do ciclo produtivo de ambos os sistemas, abrangendo desde a implantação da lavoura até o beneficiamento inicial do café.

Por fim, os resultados obtidos nas etapas ambiental e econômica serão integrados, permitindo a comparação de diferentes cenários produtivos com base em critérios ambientais (pegada de carbono) e econômicos (indicadores financeiros). Essa etapa possibilitará a identificação de trade-offs entre desempenho ambiental e viabilidade econômica, contribuindo para a proposição de estratégias mais sustentáveis e eficientes para o setor cafeeiro.

4.1. Metodologia para inventário de gases de efeito estufa e pegada de carbono.

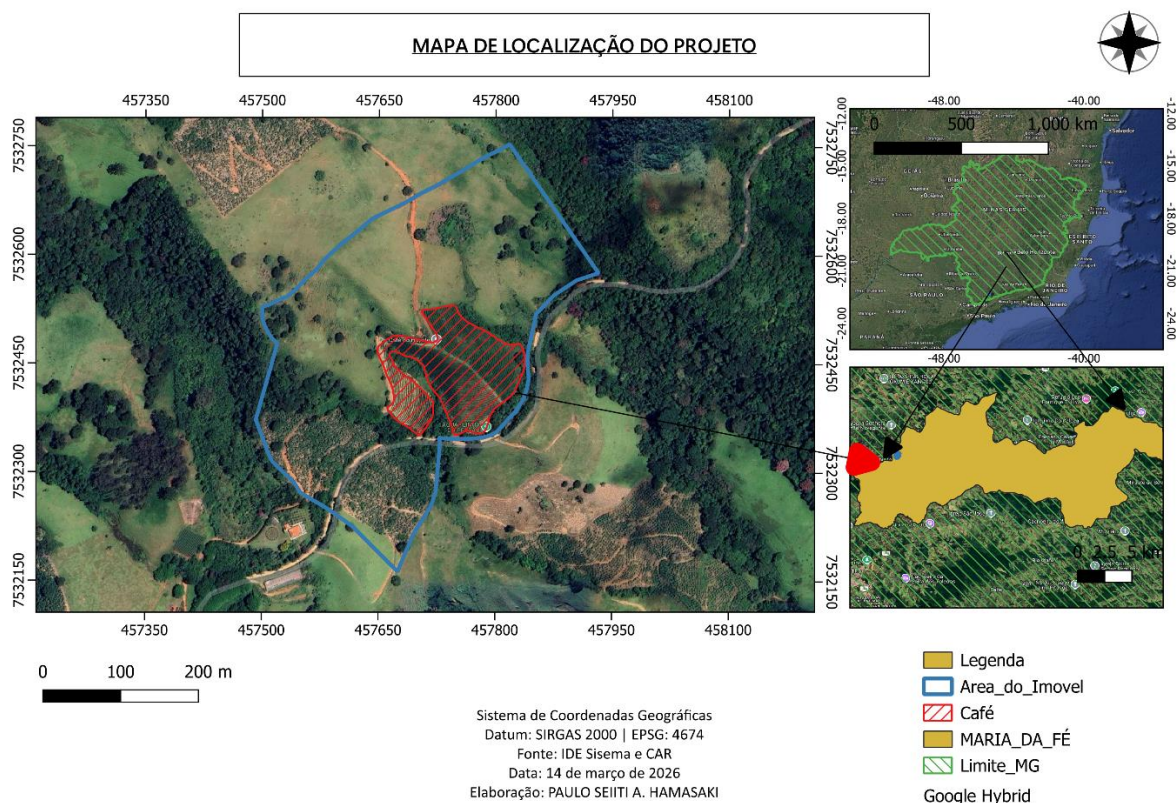
A metodologia empregada para a elaboração do inventário de gases de efeito estufa e para o cálculo da pegada de carbono da produção de café orgânico foi estruturada de forma a contemplar todas as etapas necessárias para a quantificação das emissões e remoções de carbono associadas ao sistema produtivo. O procedimento metodológico foi dividido em subtópicos que abordam a caracterização da área de estudo, a ferramenta de cálculo e base metodológica utilizada, os limites do sistema, o inventário dos dados de atividade, os insumos complementares empregados na propriedade e os procedimentos adotados para o cálculo da pegada de carbono. Essa organização visa proporcionar maior clareza e transparência na descrição dos métodos empregados, permitindo a rastreabilidade dos dados utilizados e a reprodutibilidade dos resultados obtidos. O inventário foi elaborado com base nas diretrizes do Programa Brasileiro GHG Protocol e do Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), enquanto a quantificação da pegada de carbono seguiu os princípios estabelecidos pela ABNT NBR ISO 14067:2023, possibilitando a avaliação do balanço entre emissões e remoções de gases de efeito estufa associadas à atividade cafeeira.

4.1.1 Caracterização da área de estudo

O estudo foi conduzido na Chácara Santa Bernadete, propriedade arrendada localizada no município de Maria da Fé, Minas Gerais, certificada para produção de café orgânico e especial. A área situa-se nas coordenadas geográficas 22°18'54,79"S e 45°24'44,04"O, inserida em região de Floresta Estacional Semidecidual Montana (SCOLFORO; CARVALHO; OLIVEIRA, 2008), conforme ilustrado na Figura 1. A área avaliada corresponde a 2 hectares de cultivo de *Coffea arabica* L., implantados em terreno anteriormente ocupado por pastagem.

O período de avaliação compreendeu cinco anos agrícolas consecutivos, da safra 2020/2021 à safra 2024/2025, correspondentes às fases de implantação e desenvolvimento da lavoura.

Figura 1 Área de estudo do projeto



Fonte: Do autor (2026).

Cabe destacar que, durante o primeiro ano de implantação da lavoura (2020/2021), foram utilizados fertilizantes minerais convencionais no manejo da cultura. Essa prática ocorreu em função do processo de transição para o sistema de produção orgânica, uma vez que a certificação exige um período mínimo de conversão, no qual a área deve permanecer sem a utilização de insumos químicos sintéticos por, no mínimo, dois anos antes da obtenção da certificação. Dessa forma, visando favorecer o estabelecimento inicial das mudas, o desenvolvimento do sistema radicular e o rápido crescimento vegetativo do cafeeiro, foram empregados insumos convencionais durante a fase de implantação da lavoura.

A partir do segundo ano agrícola, todas as práticas de manejo nutricional passaram a seguir os princípios da agricultura orgânica, utilizando exclusivamente insumos permitidos pelas normas de certificação vigentes, incluindo fertilizantes orgânicos, condicionadores de solo e bioinsumos.

4.1.2 Ferramenta de cálculo e base metodológica

O inventário de gases de efeito estufa (GEE) e a quantificação da pegada de carbono foram realizados utilizando a ferramenta GHG Protocol Calculation Tool for Coffee Production, desenvolvida pelo World Resources Institute Brasil (WRI Brasil), em parceria com instituições de pesquisa e representantes do setor cafeeiro. A ferramenta foi elaborada com base nas diretrizes metodológicas do Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), adaptadas às condições produtivas da cafeicultura brasileira, permitindo a quantificação das emissões e remoções de gases de efeito estufa associadas aos sistemas de produção de café (WRI Brasil, 2025).

O desenvolvimento da ferramenta ocorreu a partir da necessidade de disponibilizar um instrumento capaz de mensurar o balanço de emissões e remoções de carbono na cafeicultura brasileira, considerando as particularidades dos sistemas produtivos nacionais. A metodologia foi baseada nos princípios do GHG Protocol Corporate Standard, do GHG Protocol Agricultural Guidance e das Diretrizes do IPCC para Inventários Nacionais de Gases de Efeito Estufa, incorporando fatores de emissão específicos para o Brasil sempre que disponíveis.

A ferramenta adota prioritariamente fatores de emissão classificados como Tier 2, ou seja, desenvolvidos especificamente para as condições brasileiras. Na ausência desses fatores, são utilizados valores internacionais classificados como Tier 1, recomendados pelo IPCC.

O cálculo da pegada de carbono considera tanto as fontes de emissão quanto os sumidouros de carbono existentes no plantio. Entre as principais fontes de emissão contabilizadas destacam-se:

- aplicação de fertilizantes nitrogenados sintéticos;
- aplicação de ureia;
- aplicação de fertilizantes orgânicos;
- calagem;
- uso de gesso agrícola;
- adubação verde;
- consumo de combustíveis em máquinas e equipamentos;
- consumo de energia elétrica;
- emissões indiretas decorrentes da deposição atmosférica de nitrogênio, lixiviação e escoamento superficial;
- mudanças de uso da terra;

- transporte associado à produção cafeeira.

Além das emissões, a metodologia contempla a remoção de carbono por meio do acúmulo de carbono no solo e na biomassa vegetal. Para a cafeicultura, foram incorporadas taxas específicas de variação dos estoques de carbono do solo desenvolvidas a partir de pesquisas conduzidas pela Cooxupé e pelo CEPAGRI/UNICAMP. Essas taxas permitem estimar o sequestro de carbono decorrente da conversão de áreas agrícolas, pastagens ou áreas degradadas para sistemas de produção cafeeira.

A ferramenta organiza os resultados conforme a estrutura do GHG Protocol, classificando as emissões em:

- Escopo 1: emissões diretas provenientes das atividades realizadas na propriedade, como fertilização, calagem e consumo de combustíveis;
- Escopo 2: emissões indiretas associadas ao consumo de energia elétrica adquirida;
- Escopo 3: emissões indiretas relacionadas ao transporte de insumos, trabalhadores e produtos.

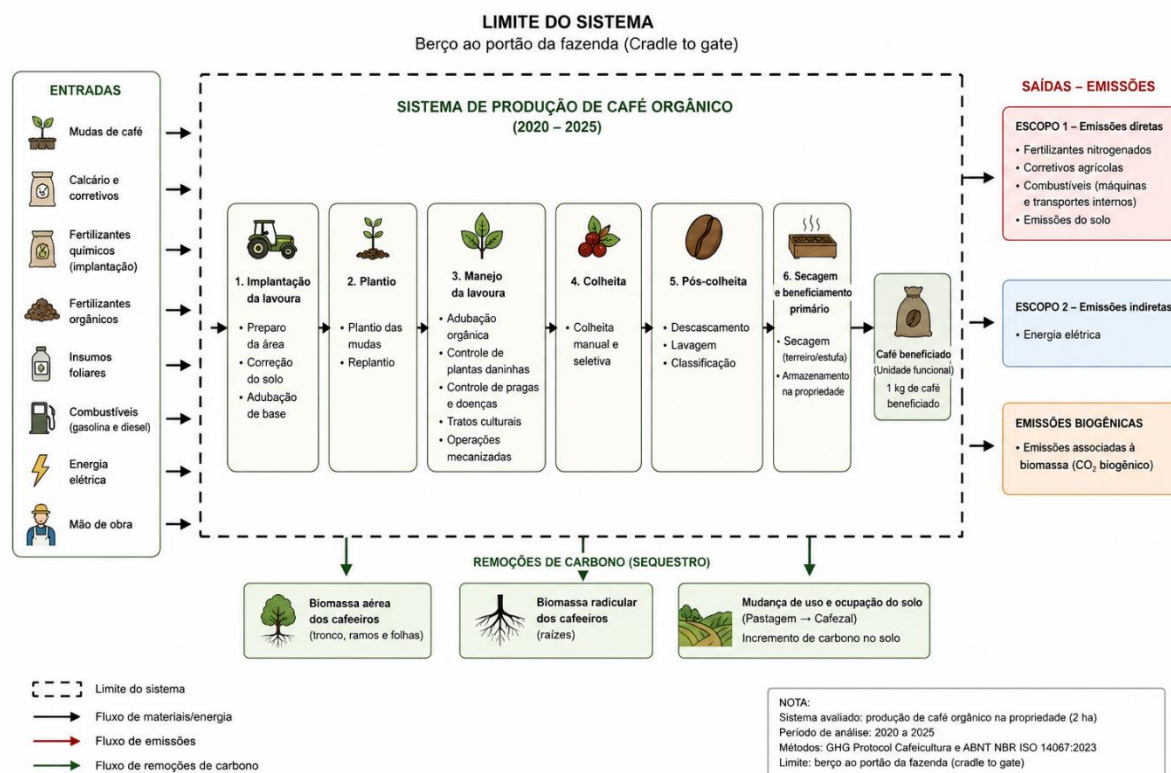
O balanço final da pegada de carbono é obtido pela soma das emissões dos Escopos 1 e 2, acrescida das emissões e remoções decorrentes das mudanças de uso da terra e dos processos biogênicos, resultando na emissão líquida da atividade agrícola.

4.1.3 Limites do sistema

A coleta de dados foi realizada por meio de registros de manejo fornecidos pelo produtor rural, notas fiscais de aquisição de insumos, controle de operações agrícolas e entrevistas semiestruturadas. Foram levantadas informações referentes à utilização de fertilizantes minerais e orgânicos, corretivos agrícolas, defensivos permitidos para agricultura orgânica, consumo de combustíveis, energia elétrica, produtividade, área cultivada e histórico de uso da terra.

Os limites do inventário são apresentados na Figura 2.

Figura 2 Limites do sistema para a produção de café orgânico.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

A coleta de dados seguiu uma abordagem quantitativa, conforme metodologia proposta por da Silva Meirelles et al. (2019), considerando todas as etapas do processo produtivo do café, desde a adubação e correção do solo até a colheita e secagem natural em estufa.

4.1.4 Inventário dos dados de atividade

Os dados utilizados para elaboração do inventário de gases de efeito estufa foram obtidos a partir dos registros de manejo da propriedade, incluindo informações referentes à aplicação de fertilizantes, corretivos agrícolas, bioinsumos, consumo de combustíveis, energia elétrica e demais operações realizadas ao longo do ciclo produtivo. Para cada ano agrícola foram levantadas as quantidades efetivamente utilizadas de cada insumo, permitindo a estimativa das emissões e remoções de carbono por meio da ferramenta GHG Protocol Cafeicultura.

Os principais insumos utilizados durante o período de estudo, bem como os respectivos quantitativos empregados em cada ano agrícola, são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2- Inventário de insumos, manejo e consumo de recursos utilizados na produção de café orgânico durante o período de avaliação (2020-2025).

Variável	Unidade	Ano 0 (2020/2021)	Ano 1 (2021/2022)	Ano 2 (2022/2023)	Ano 3 (2023/2024)	Ano 4 (2024/2025)
Área cultivada	ha	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0
Idade do plantio	anos	0	1	2	3	4
Número de plantas	plantas ha ⁻¹	7.273	7.273	7.273	7.273	7.273
Produtividade	sacas ha ⁻¹	0	1.5	33	40	12
Uso anterior da terra	-	Pastagem	Café	Café	Café	Café
Tempo de transição	-	>20 anos	≤20 anos	≤20 anos	≤20 anos	≤20 anos
Calcário calcítico	kg ha ⁻¹	1.000	1.875	2.000	1.000	1.500
Calcário dolomítico	kg ha ⁻¹	1.000	0	0	0	0
Nitrogênio sintético	kg ha ⁻¹	909,1	0	0	0	0
MAP	kg ha ⁻¹	727,3	0	0	0	0
Composto orgânico (torta de mamona + bokashi)	kg ha ⁻¹	0	2.000	4.500	3.250	2.750
Esterco de aves	kg ha ⁻¹	0	1.750	0	0	6.500
Esterco (outros)	kg ha ⁻¹	0	0	0	0	0
Outros produtos orgânicos	kg ha ⁻¹	0	0	6,5	300	0
Combustível – operações internas	L ano ⁻¹	310	600	825	560	387
Combustível – transporte da produção	L ano ⁻¹	30	150	120	133,13	140
Combustível – transporte de pessoas	L ano ⁻¹	520	487,1	270	253,95	342

Área cultivada	ha	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0
----------------	----	-----	-----	-----	-----	-----

Fonte: Elaborado pelo autor com base nos registros da propriedade e nos dados de entrada da ferramenta GHG Protocol Cafeicultura (2026).

O sistema avaliado passou por transição de manejo ao longo do período. No primeiro ano agrícola, correspondente à implantação da lavoura, foram utilizados fertilizantes minerais convencionais — MAP, fertilizantes nitrogenados sintéticos e calcário dolomítico. A partir do segundo ano, em conformidade com as exigências do processo de conversão para a certificação orgânica, a adubação passou a ser realizada predominantemente com compostos orgânicos, esterco de aves e corretivos permitidos pela legislação da agricultura orgânica. O consumo de combustíveis, associado às operações de manejo, ao transporte da produção e ao deslocamento de pessoas, foi registrado anualmente e utilizado como dado de entrada no cálculo das emissões de gases de efeito estufa.

4.1.5 Insumos complementares não contabilizados pelo GHG Protocol Cafeicultura

A ferramenta GHG Protocol Cafeicultura contabiliza no cálculo das emissões apenas os insumos para os quais existem fatores de emissão consolidados na literatura científica e nas diretrizes do IPCC — fertilizantes nitrogenados, corretivos agrícolas, combustíveis fósseis, energia elétrica e alterações de uso da terra —, por serem essas as fontes de maior contribuição reconhecida em sistemas agrícolas.

Diversos insumos empregados na condução da lavoura, contudo, não dispõem de fatores de emissão específicos nas diretrizes do IPCC nem na base metodológica do Programa Brasileiro GHG Protocol. É o caso dos fertilizantes foliares, aminoácidos, extratos vegetais, produtos biológicos para controle fitossanitário, fungicidas à base de cobre, inoculantes e demais bioinsumos permitidos na agricultura orgânica, apresentados na Tabela 3. Embora esses produtos apresentem emissões associadas às etapas de fabricação, transporte e aplicação, não foram localizadas metodologias padronizadas que permitissem sua quantificação de forma consistente e comparável no âmbito do inventário agrícola adotado.

Essa exclusão constitui uma limitação metodológica do presente estudo e merece atenção particular no contexto avaliado. Em sistemas orgânicos, os bioinsumos e os fungicidas cúpricos substituem parte relevante dos insumos de síntese e assumem papel central no manejo, diferentemente do que ocorre em sistemas convencionais, nos quais a fertilização nitrogenada concentra a maior parte das emissões.

Ao longo do período avaliado foram aplicados 44,4 L de fungicida à base de cobre, 21,4 L de demais produtos fitossanitários biológicos, 85,6 L e 112,6 kg de fertilizantes foliares e 1.950 kg de fertilizante mineral natural aplicado via solo, além de inseticidas botânicos e

agentes de controle biológico. As emissões associadas à fabricação, ao transporte e à aplicação desses insumos não puderam ser incorporadas ao balanço, por ausência de fatores de emissão consolidados.

Destaca-se, nesse conjunto, o fertilizante mineral natural aplicado via solo, cuja massa acumulada (1.950 kg) é substancialmente superior à dos demais insumos complementares, embora sua composição isenta de nitrogênio, não implique emissões diretas de óxido nitroso no solo.

Dessa forma, os insumos listados na Tabela 3 foram utilizados para caracterizar integralmente o sistema produtivo avaliado, mas não foram incorporados ao cálculo das emissões. Os resultados de pegada de carbono apresentados neste estudo devem, portanto, ser interpretados como uma estimativa conservadora das emissões totais do sistema, referida ao escopo de insumos coberto pela metodologia do GHG Protocol Cafeicultura.

Tabela 3- Insumos complementares utilizados na condução da lavoura e não contabilizados diretamente no cálculo das emissões da ferramenta GHG Protocol Cafeicultura.

Categoria	Produto	Unidade	Ano 2 (2022/2023)	Ano 3 (2023/2024)	Ano 4 (2024/2025)
Adubação foliar	Extrato vegetal (Zym Troppa)	L	45,1	5,5	-
Adubação foliar	Açúcar/Melaço	L	-	35,0	-
Adubação foliar	Viça Café	kg	33,6	43,0	36,0
Adubação via solo	Yoorin Master	kg	350	1.600	-
Controle biológico	H17	L	-	0,14	0,25
Fungicida	Cobre (Supera)	L	18,8	12,0	13,56
Fungicida	Bio Imune	L	-	8,0	7,0
Fungicida biológico	Bayer Serenade	L	-	-	6,4
Inseticida biológico	Óleo de Neem	kg	3,5	-	-
Inseticida biológico	Torta de Nim	kg	-	20,0	10,0
Lubrificante	Óleo 10W30 (motor 2T)	L	-	2,0	-
Lubrificante	Óleo 2T para pulverizador	L	-	-	0,2

Fonte: Elaborado pelo autor com base nos registros operacionais da propriedade (2026).

Ressalta-se que a não contabilização desses insumos não implica ausência de impacto ambiental, mas sim uma limitação metodológica relacionada à disponibilidade de fatores de emissão e à abrangência da ferramenta utilizada. Assim, eventuais emissões associadas à produção, transporte e uso desses produtos não foram consideradas no inventário, podendo representar oportunidades para futuras pesquisas voltadas ao aprimoramento das metodologias de quantificação de emissões na agricultura orgânica.

4.1.6 Cálculo da pegada de carbono

O cálculo da pegada de carbono seguiu os princípios da ABNT NBR ISO 14067:2023, segundo a qual a pegada de carbono de um produto corresponde ao balanço entre emissões e remoções de gases de efeito estufa, expresso em dióxido de carbono equivalente (CO₂eq).

As emissões provenientes da fertilização foram estimadas a partir das quantidades efetivamente aplicadas em cada ano agrícola, considerando os fertilizantes minerais utilizados na implantação da lavoura e os fertilizantes orgânicos empregados na condução do sistema. As emissões de óxido nitroso (N₂O) decorrentes da aplicação de nitrogênio ao solo foram calculadas pelos fatores de emissão incorporados à ferramenta GHG Protocol Cafeicultura, baseados nas diretrizes do IPCC para sistemas agrícolas. Foram ainda contabilizadas as emissões relacionadas ao uso de corretivos agrícolas, as decorrentes do consumo de combustíveis nas operações de implantação, manejo e colheita, e as associadas ao consumo anual de energia elétrica registrado na propriedade. O conjunto dessas fontes compõe a pegada de carbono bruta do sistema.

As remoções foram estimadas considerando os processos biogênicos associados ao crescimento da biomassa aérea e radicular dos cafeeiros e o incremento dos estoques de carbono do solo decorrente da conversão da área, anteriormente ocupada por pastagem, para cultivo perene.

O balanço entre emissões e remoções define a pegada de carbono líquida, calculada conforme as diretrizes do Programa Brasileiro GHG Protocol e da ISO 14067:

$$\text{Emissões Líquidas} = \text{Escopo 1} + \text{Escopo 2} \pm \text{Processos Biogênicos} \pm \text{Mudança de Uso e Ocupação do Solo}$$

em que os Escopos 1 e 2 representam as emissões diretas e indiretas associadas às atividades produtivas, enquanto os processos biogênicos e as mudanças de uso e ocupação do solo podem atuar como fontes ou sumidouros de carbono, dependendo das condições avaliadas.

No presente estudo, a unidade produtiva possui área total de 2 hectares e produziu, entre os anos de 2020 e 2025, um total acumulado de 173 sacas de café beneficiado. Considerando a equivalência de 60 kg por saca, a produção total correspondeu a 10.380 kg de café ao longo do período analisado. Dessa forma, os resultados foram apresentados tanto em toneladas de CO₂ equivalente por propriedade e por hectare (t CO₂eq ha⁻¹) quanto em quilogramas de CO₂ equivalente por quilograma de café produzido (kg CO₂eq kg⁻¹ de café verde), permitindo a comparação com estudos nacionais e internacionais.

Para obtenção da pegada de carbono por unidade de produto, o total de emissões líquidas do sistema foi dividido pela quantidade total de café produzida durante o período de avaliação. Assim, caso as remoções de carbono provenientes da biomassa e do solo sejam superiores às emissões geradas pelas atividades agrícolas, a propriedade apresentará uma pegada de carbono líquida negativa, caracterizando-se como um sistema com balanço positivo de carbono. Em contrapartida, quando as emissões superam as remoções, o resultado é uma pegada de carbono líquida positiva, indicando contribuição líquida para o aquecimento global.

Pegada bruta:

$$PC_{bruta} = E_{escopo1} + E_{escopo2} + E_{biogenicas}$$

Pegada líquida:

$$PC_{liquida} = PC_{bruta} - R_{carbono}$$

Onde:

- PC_{bruta} = emissões associadas à produção;
- PC_{líquida} = emissões menos remoções de carbono;
- R_{carbono} = remoções por crescimento da biomassa e mudança de uso do solo.

Por fim, os resultados foram normalizados utilizando diferentes unidades funcionais, incluindo toneladas de CO₂ equivalente por propriedade, toneladas de CO₂ equivalente por hectare e quilogramas de CO₂ equivalente por quilograma de café produzido. Essa abordagem permitiu comparar os resultados obtidos com estudos nacionais e internacionais que avaliaram a pegada de carbono em sistemas cafeeiros convencionais e sustentáveis, proporcionando uma avaliação mais abrangente da sustentabilidade climática da cafeicultura, uma vez que considera

não apenas as emissões associadas às atividades produtivas, mas também a capacidade do sistema agrícola em remover e armazenar carbono ao longo do tempo.

4.2 Metodologia custeio do ciclo de vida (CCV)

A avaliação econômica da produção de café orgânico foi realizada por meio da metodologia de Custeio do Ciclo de Vida (CCV), abordagem amplamente utilizada para mensurar os custos associados a um produto ou sistema produtivo ao longo de todo o seu ciclo de vida. O método permite identificar e quantificar os custos incorridos desde a implantação da lavoura até a fase produtiva, fornecendo subsídios para análises de viabilidade econômica e tomada de decisão.

O Custeio do Ciclo de Vida foi aplicado de forma complementar à pegada de carbono, possibilitando a integração entre os resultados ambientais e econômicos da produção cafeeira. Conforme descrito por Hunkeler et al. (2008), o CCV considera todos os custos relevantes associados ao sistema produtivo, permitindo avaliar sua sustentabilidade econômica ao longo do tempo.

4.2.1 Coleta dos dados econômicos

Os dados econômicos utilizados neste estudo são de natureza primária e foram obtidos diretamente junto ao produtor rural responsável pela área de estudo. Foram considerados os registros financeiros referentes ao período de implantação e desenvolvimento da lavoura, abrangendo uma área total de 2 hectares cultivados sob manejo orgânico certificado e vendidos como café especial.

As informações coletadas contemplaram despesas com implantação da lavoura, aquisição de mudas, corretivos e fertilizantes, manejo fitossanitário, operações de colheita e pós-colheita, combustíveis, manutenção de equipamentos, certificação orgânica, despesas administrativas e demais custos associados ao sistema produtivo.

Tabela 4 Despesas, receitas e saldo anual da produção agrícola por safra em R\$

Categoria	2021 (ano 0)	2022 (ano 1)	2023 (ano 2)	2024 (ano 3)	2025 (ano 4)
Mudas (15 mil plantio/replante)	10000				
Plantio	10000				
Adubação via solo (químico pré-plantio)	15000				
Adubação via solo (orgânico)		7349.98	22,349.98	21128,76	19453.85
Adubação via folha			1629.44	2300.79	2294.5
Corretivos de solo	5550	1950	3950	1950	
Análise de solo	90	100	90	100	108
Controle de plantas daninhas	5941.7	6116	21289,6	12116	10186.03
Controle de pragas e doenças	1035.76	2500	4035.76	4589.28	5113.71
Colheita (inclui M.O. e materiais)			35807.75	36707.2	19702
Pós-colheita			4082.9	5218.8	6797
Gastos com combustíveis	3000	2000	7000	6000	5000
Despesas administrativas	500	3500	5632.8	4453	3722.7
Certificações				600	600
Conservação de máquinas e equipamentos	1520	360	1518	360	750
Associações/Sindicatos			960	960	800
Telefone/Internet	600	600	600	600	450
IPVA	600	600	600	600	400
Total de despesas	53,837.46	25,075.98	109546.23	97683.83	75,377.79
Receita		6000	162000	180000	40000
Saldo anual	-53,837.46	-19075.98	52482.37	82316.17	-35.377,79

Fonte: Elaboração própria, com base nos registros do produtor (2020–2025)

4.2.2 Estruturação dos custos e Horizonte de análise

Os custos foram organizados em três categorias principais:

- Investimentos iniciais: despesas relacionadas à implantação da lavoura, incluindo aquisição de mudas, preparo do solo e plantio;
- Custos operacionais: gastos anuais associados à manutenção da produção, tais como fertilizantes, corretivos, defensivos permitidos na agricultura orgânica, mão de obra, combustíveis e operações agrícolas;
- Custos indiretos: despesas administrativas, certificações, associações, manutenção de máquinas e equipamentos e demais gastos não diretamente vinculados à produção.

A soma dessas categorias constituiu o custo total do sistema produtivo para cada ano avaliado.

A análise econômica considerou um horizonte temporal de cinco anos, compreendendo o período entre a implantação da lavoura e o início da estabilização produtiva do cafeeiro. Esse intervalo é compatível com o ciclo inicial de desenvolvimento da cultura, período em que ocorrem os maiores investimentos e a consolidação da capacidade produtiva.

4.2.3 Taxa mínima de atratividade

Para atualização monetária dos fluxos de caixa foi adotada uma Taxa Mínima de Atratividade (TMA) de 10% ao ano conforme referências técnicas do setor. Essa estimativa baseia-se na obra de Rodrigues (1991). A utilização dessa taxa está em conformidade com estudos de avaliação econômica aplicados ao setor agropecuário e florestal, sendo compatível com o nível de risco associado a empreendimento agrícolas de médio prazo.

3.2.4 Indicadores de viabilidade econômica

A viabilidade econômica do sistema foi avaliada por meio dos indicadores Valor Presente Líquido (VPL) e Taxa Interna de Retorno (TIR).

Valor Presente Líquido (VPL)

O Valor Presente Líquido representa a diferença entre o valor presente das receitas e o valor presente dos custos ao longo do horizonte de análise. Valores positivos indicam que o empreendimento gera retorno superior à taxa mínima de atratividade adotada.

$$VPL = \sum_{t=1}^n \frac{FC_t}{(1+K)^t} - I_0 + \sum_{t=1}^n \frac{I_t}{(1+K)^t}$$

FC_t = fluxo de caixa no período t;

k = taxa mínima de atratividade;

I₀ = investimento inicial;

n = horizonte temporal do projeto.

O critério de decisão adotado foi:

VPL > 0: projeto economicamente viável;

VPL = 0: situação de indiferença econômica;

VPL < 0: projeto economicamente inviável.

Taxa Interna de Retorno (TIR)

A Taxa Interna de Retorno corresponde à taxa de desconto que torna o Valor Presente Líquido igual a zero. Esse indicador expressa a rentabilidade percentual do investimento ao longo do período analisado.

$$TIR = I_0 + \sum_{t=1}^n \frac{I_t}{(1+K)^t} - I_0 + \sum_{t=1}^n \frac{FC_t}{(1+K)^t}$$

Onde:

FC_t = fluxo de caixa do período t;

I₀ = investimento inicial;

n = horizonte temporal do projeto.

O critério de decisão adotado foi:

TIR > TMA: projeto economicamente viável;

TIR = TMA: situação de indiferença econômica;

TIR < TMA: projeto economicamente inviável.

Payback Descontado (PD)

O Payback Descontado foi utilizado para determinar o tempo necessário para que o fluxo de caixa acumulado, atualizado pela taxa mínima de atratividade (TMA), recuperasse o investimento inicial realizado na implantação da lavoura. Diferentemente do Payback Simples, esse indicador considera o valor do dinheiro no tempo, proporcionando uma avaliação mais realista da recuperação do capital investido.

O cálculo foi realizado por meio da atualização dos fluxos de caixa anuais utilizando a taxa de desconto adotada no estudo, sendo o período de retorno determinado quando o fluxo de caixa acumulado descontado se torna igual ou superior ao investimento inicial.

$$PD = t + \frac{|FCA_t|}{FCD_{t+1}}$$

Onde:

PD = Payback Descontado (anos);

t = último período em que o fluxo acumulado descontado permaneceu negativo;

FCA_t = fluxo de caixa acumulado descontado no período t;

FCD_{t+1} = fluxo de caixa descontado no período subsequente.

O critério de interpretação adotado foi:

Menor Payback Descontado: maior rapidez na recuperação do investimento e menor exposição ao risco econômico;

Maior Payback Descontado: recuperação mais lenta do capital investido e maior risco financeiro.

Esse indicador complementa as análises de VPL e TIR, permitindo avaliar não apenas a rentabilidade do empreendimento, mas também o tempo necessário para recuperação dos recursos aplicados na implantação e condução da lavoura cafeeira.

5. RESULTADOS

5.1. Inventário de gases de efeito estufa e pegada de carbono

O inventário de gases de efeito estufa da propriedade foi elaborado com auxílio da ferramenta GHG Protocol Cafeicultura, considerando as emissões diretas (Escopo 1), emissões indiretas associadas ao consumo de energia elétrica (Escopo 2), emissões indiretas da cadeia de valor (Escopo 3), emissões biogênicas e remoções de carbono decorrentes da mudança de uso e ocupação do solo.

Tabela 5 Emissões de gases de efeito estufa por escopo entre os anos agrícolas de 2020 a 2025

Indicador	Ano 0 (2020/2021)	Ano 1 (2021/2022)	Ano 2 (2022/2023)	Ano 3 (2023/2024)	Ano 4 (2024/2025)
Escopo 1 (t CO ₂ e)	4,04	3,68	4,11	2,55	4,30
Escopo 2 (t CO ₂ e)	0,02	0,02	0,02	0,04	0,03
Escopo 3 (t CO ₂ e)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Emissão biogênica (t CO ₂)	0,13	0,25	0,34	0,23	0,16
Emissões totais anuais (t CO ₂ e)	4,19	3,95	4,47	2,82	4,49

Fonte: Elaborado pelo autor com base nos resultados obtidos na ferramenta GHG Protocol Cafeicultura (2026).

O inventário de gases de efeito estufa da propriedade foi elaborado com auxílio da ferramenta GHG Protocol Cafeicultura, considerando as emissões diretas (Escopo 1), emissões indiretas associadas ao consumo de energia elétrica (Escopo 2), emissões indiretas da cadeia de valor (Escopo 3), emissões biogênicas e remoções de carbono decorrentes da mudança de uso e ocupação do solo.

A inexistência de emissões contabilizadas no Escopo 3 não implica necessariamente ausência de impactos indiretos na cadeia produtiva, mas sim que tais emissões não foram contempladas pela base de dados disponível e pelos limites operacionais adotados na ferramenta utilizada. Em estudos de pegada de carbono do café, o Escopo 3 pode incluir emissões associadas à fabricação e transporte de insumos agrícolas, processamento, embalagem, distribuição e consumo do produto. Portanto, os resultados obtidos representam

principalmente as emissões diretas da propriedade rural e devem ser interpretados sob essa perspectiva metodológica.

Balanço líquido de carbono

Além das emissões, a metodologia adotada permitiu contabilizar as remoções de carbono associadas à mudança de uso e ocupação do solo. A área estudada era anteriormente ocupada por pastagem e foi convertida para cultivo de café orgânico, possibilitando o incremento dos estoques de carbono na biomassa vegetal e no solo ao longo do desenvolvimento da lavoura.

Tabela 6 Balanço líquido de carbono da propriedade

Indicador	Ano 0 (2020/2021)	Ano 1 (2021/2022)	Ano 2 (2022/2023)	Ano 3 (2023/2024)	Ano 4 (2024/2025)
Mudança de uso e ocupação do solo (t CO ₂ e)	-23,27	-23,27	-23,27	-23,27	-23,27
Balanço líquido (t CO ₂ e)	-19,07	-20,10	-19,58	-21,23	-19,56

Fonte: Elaborado pelo autor com base nos resultados obtidos na ferramenta GHG Protocol Cafeicultura (2026).

Os resultados demonstram que a propriedade apresentou balanço líquido negativo durante todos os anos avaliados. O balanço variou entre -19,07 e -21,23 t CO₂e, indicando que as remoções de carbono superaram as emissões geradas pelas atividades agrícolas.

A média anual do balanço líquido foi de -19,91 t CO₂e, resultando em remoção acumulada de aproximadamente -99,54 t CO₂e ao longo dos cinco anos avaliados.

Esse resultado evidencia que o sistema cafeeiro orgânico estudado atuou como um sumidouro líquido de carbono durante o período de implantação e desenvolvimento da lavoura, contribuindo potencialmente para a mitigação das mudanças climáticas.

Pegada de carbono bruta da produção

A pegada de carbono bruta foi calculada considerando exclusivamente as emissões geradas pelas atividades produtivas, sem contabilizar os processos de remoção de carbono.

Tabela 7 Emissões acumuladas do sistema produtivo

Ano agrícola	Emissões totais (t CO ₂ e)
2020/2021	4,19
2021/2022	3,95
2022/2023	4,47
2023/2024	2,82
2024/2025	4,49
Total	19,92

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Pegada de carbono líquida da produção

A pegada de carbono líquida foi obtida pela diferença entre as emissões totais do sistema e as remoções de carbono associadas à biomassa e à mudança de uso do solo.

Tabela 8 Pegada de carbono líquida da produção

indicador	Resultado
Balanço líquido acumulado	-99,54 t CO ₂ e
Produção total	10.380 kg
Pegada líquida	-9,59 kg CO ₂ e kg ⁻¹
Pegada líquida por saca	-575,4 kg CO ₂ e saca ⁻¹

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Os resultados demonstram que, embora a produção de café tenha gerado emissões equivalentes a 1,92 kg CO₂e kg⁻¹ de café produzido, as remoções de carbono decorrentes do crescimento da biomassa e da conversão da área de pastagem para cafezal superaram amplamente essas emissões. Dessa forma, a pegada de carbono líquida foi estimada em -9,59 kg CO₂e kg⁻¹ de café, indicando que o sistema removeu da atmosfera mais carbono do que emitiu durante o período avaliado.

Comparando-se os resultados obtidos com estudos nacionais e internacionais, verifica-se que a pegada de carbono bruta observada encontra-se dentro da faixa reportada para sistemas cafeeiros tropicais. Por outro lado, a pegada líquida negativa evidencia a importância da inclusão dos estoques de carbono na biomassa e no solo em avaliações ambientais da

cafeicultura, especialmente em sistemas orgânicos conduzidos em áreas recentemente convertidas de pastagem para cultivos perenes. citar

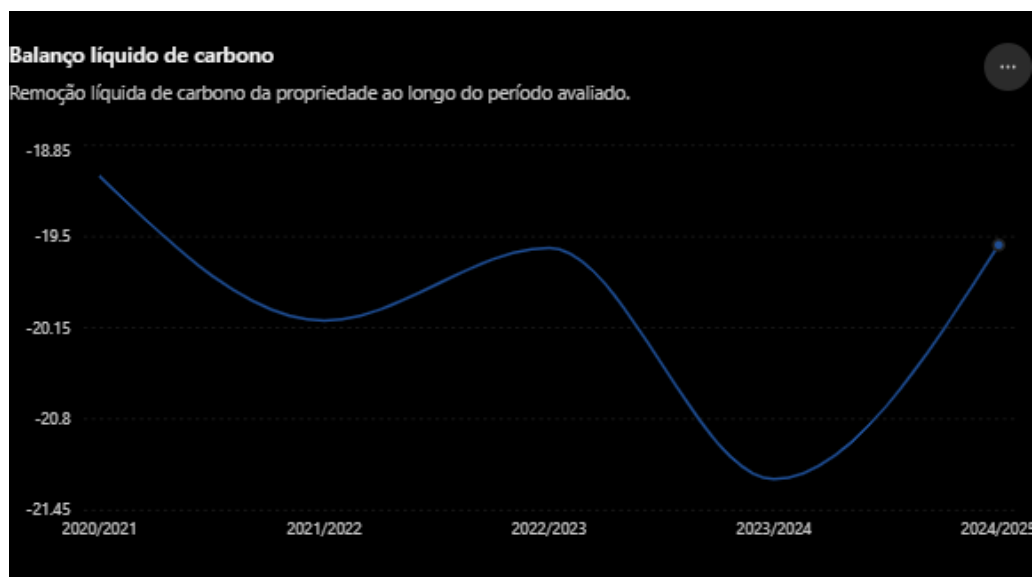
Com o objetivo de facilitar a interpretação dos resultados obtidos, os gráficos a seguir apresentam uma síntese do comportamento das emissões e remoções de carbono da propriedade durante o período de 2020 a 2025. O Gráfico 1 demonstra a evolução das emissões de gases de efeito estufa por escopo, conforme classificação adotada pelo Programa Brasileiro GHG Protocol. O Gráfico 2 apresenta o balanço líquido de carbono do sistema produtivo ao longo dos anos avaliados, considerando as emissões geradas pelas atividades agrícolas e as remoções decorrentes do crescimento da biomassa e da mudança de uso e ocupação do solo. Já o Gráfico 3 apresenta uma comparação entre a pegada de carbono bruta e a pegada de carbono líquida da produção, evidenciando a influência dos estoques de carbono no desempenho ambiental da cafeicultura orgânica estudada.

Figura 3 Evolução das emissões de gases de efeito estufa por escopo entre os anos agrícolas de 2020 a 2025



Fonte: Elaborado pelo autor com base nos resultados obtidos na ferramenta GHG Protocol Cafeicultura (2026).

Figura 4 Evolução das emissões de gases de efeito estufa por escopo entre os anos agrícolas de 2020 a 2025



Fonte: Elaborado pelo autor com base nos resultados obtidos na ferramenta GHG Protocol Cafeicultura (2026).

Figura 5 Comparação entre a pegada de carbono bruta e a pegada de carbono líquida da produção de café orgânico



Fonte: Elaborado pelo autor com base nos resultados obtidos na ferramenta GHG Protocol Cafeicultura (2026).

As Figuras 3, 4 e 5 sintetizam os principais resultados do inventário de gases de efeito estufa e da pegada de carbono da propriedade. A Figura 3 evidencia a predominância das emissões do Escopo 1 ao longo de todo o período avaliado, demonstrando que fertilizantes, corretivos agrícolas e combustíveis constituíram as principais fontes emissoras do sistema produtivo. A Figura 4 demonstra que o balanço líquido de carbono permaneceu negativo durante todos os anos avaliados, indicando que as remoções de carbono associadas ao crescimento da biomassa e à mudança de uso e ocupação do solo superaram as emissões geradas pelas atividades agrícolas. Por fim, a Figura 5 evidencia a diferença entre a pegada de carbono bruta ($1,92 \text{ kg CO}_2\text{e kg}^{-1}$ de café) e a pegada de carbono líquida ($-9,59 \text{ kg CO}_2\text{e kg}^{-1}$ de café), demonstrando o importante papel do sequestro de carbono no desempenho ambiental da cafeicultura orgânica estudada.

De maneira geral, os resultados do inventário de gases de efeito estufa e da pegada de carbono demonstram que a produção de café orgânico apresentou desempenho ambiental favorável ao longo do período avaliado. As emissões acumuladas do sistema totalizaram **19,92 t CO₂e**, resultando em uma pegada de carbono bruta de **1,92 kg CO₂e kg⁻¹** de café produzido. Entretanto, quando consideradas as remoções de carbono decorrentes do crescimento da biomassa dos cafeeiros e da conversão da área de pastagem para cultivo perene, o sistema apresentou balanço líquido acumulado de **-99,54 t CO₂e**, correspondendo a uma pegada de carbono líquida de **-9,59 kg CO₂e kg⁻¹** de café. Esses resultados indicam que as remoções de carbono superaram as emissões geradas pelas atividades produtivas, caracterizando a propriedade como um sumidouro líquido de carbono durante o período analisado.

5.2. Custeio do Ciclo de vida (CCV)

A análise econômica da produção de café orgânico foi realizada por meio da metodologia de Custeio do Ciclo de Vida (CCV), considerando um horizonte temporal de cinco anos, correspondente ao período de implantação e consolidação produtiva da lavoura. Essa abordagem permitiu avaliar os custos e receitas associados ao sistema produtivo ao longo do seu desenvolvimento, contemplando desde os investimentos iniciais até a fase de entrada em produção.

Os custos totais apresentaram comportamento variável ao longo do período analisado, refletindo as diferentes fases do ciclo produtivo do cafeeiro. Nos anos iniciais, verificou-se elevada concentração de investimentos relacionados à implantação da cultura, incluindo aquisição de mudas, operações de plantio, correção da fertilidade do solo e aplicação de

insumos necessários ao estabelecimento da lavoura. À medida que o sistema evoluiu para a fase produtiva, observou-se aumento das despesas associadas ao manejo nutricional, controle fitossanitário, colheita e pós-colheita, acompanhando o incremento da produtividade.

Tabela 9 Fluxo de caixa anual da produção de café orgânico.

Ano	Receita (R\$)	Custo (R\$)	Saldo anual (R\$)
2021 (Ano 0)	0,00	53.837,46	-53.837,46
2022 (Ano 1)	6.000,00	25.075,98	-19.075,98
2023 (Ano 2)	162.000,00	109.517,63	52.482,37
2024 (Ano 3)	180.000,00	97.683,83	82.316,17
2025 (Ano 4)	40.000,00	75.377,79	-35.377,79

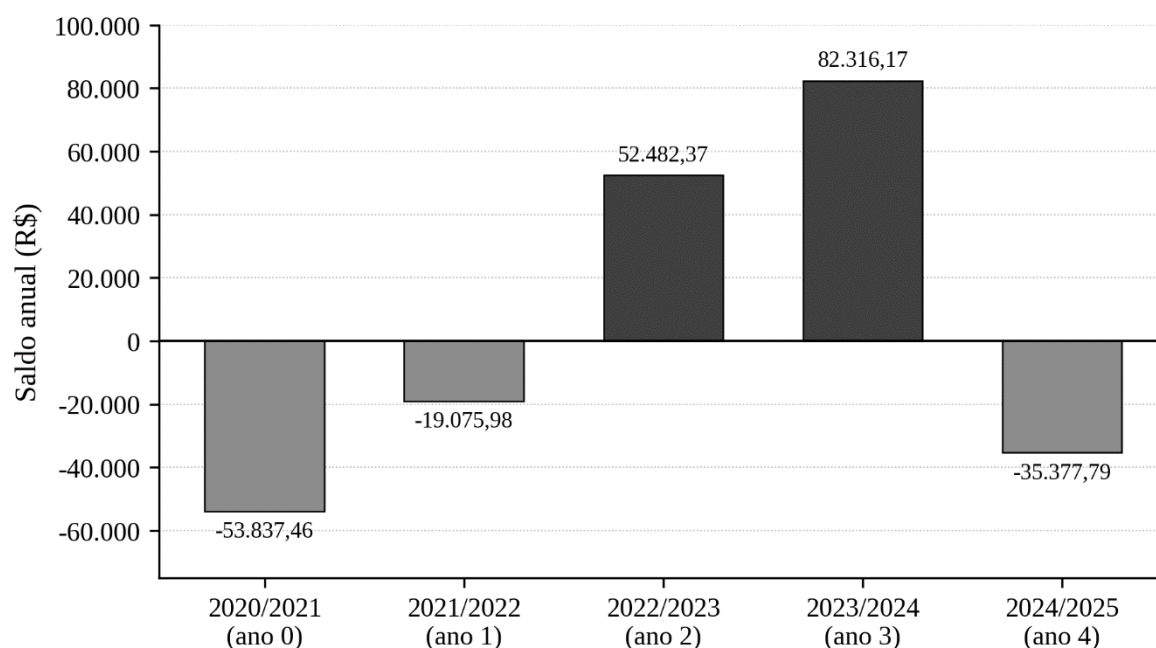
Fonte: Elaborado pelo autor com base nos registros operacionais da propriedade. (2026).

Os resultados demonstram o comportamento típico de empreendimentos agrícolas perenes, nos quais os primeiros anos são marcados por elevados investimentos e reduzida geração de receita. Durante os anos de implantação da lavoura (2021 e 2022), foram observados saldos negativos de R\$ 53.837,46 e R\$ 19.075,98, respectivamente, resultado esperado em sistemas cafeeiros que ainda não atingiram sua capacidade produtiva.

A partir do segundo ano produtivo, verificou-se crescimento expressivo das receitas, alcançando R\$ 162.000,00 em 2023 e R\$ 180.000,00 em 2024. Esse aumento refletiu diretamente no fluxo de caixa, gerando saldos positivos de R\$ 52.482,37 e R\$ 82.316,17, respectivamente. O maior retorno econômico foi observado em 2024, período em que a lavoura atingiu seu melhor desempenho produtivo dentro do horizonte analisado.

Por outro lado, no ano agrícola de 2025 observou-se redução significativa da receita, resultando em saldo negativo de R\$ 35.377,79. Esse comportamento pode ser parcialmente explicado pela bienalidade produtiva do cafeeiro, fenômeno amplamente observado na cultura, caracterizado pela alternância entre anos de maior e menor produção. Além disso, fatores climáticos, fitossanitários e operacionais podem influenciar diretamente a produtividade e, consequentemente, a rentabilidade do sistema.

Figura 6 Fluxo de caixa anual da produção de café orgânico (2020-2025)



Fonte: Elaborado pelo autor com base nos registros operacionais da propriedade. (2026).

A Figura 6 evidencia a evolução temporal do fluxo de caixa da propriedade, destacando a transição entre a fase de implantação e a fase produtiva da lavoura. Observa-se que o empreendimento passou a apresentar retorno financeiro positivo a partir do segundo ano produtivo, quando as receitas passaram a superar os custos operacionais da atividade.

Com base no fluxo de caixa descontado, foram calculados os principais indicadores de viabilidade econômica do empreendimento.

Tabela 10 Indicadores econômicos do Custeio do Ciclo de Vida.

Indicador	Valor
Valor Presente das Receitas (VPR)	R\$ 301.896,05
Valor Presente dos Custos (VPC)	R\$ 292.019,60
Valor Presente Líquido (VPL)	R\$ 9.876,45
Taxa Interna de Retorno (TIR)	17,61% a.a.

Indicador	Valor
Payback Descontado	3,45 anos

Fonte: Do autor (2026).

O Valor Presente das Receitas (VPR) foi estimado em R\$ 301.896,05, enquanto o Valor Presente dos Custos (VPC) totalizou R\$ 292.019,60. Como consequência, o Valor Presente Líquido (VPL) obtido foi positivo em R\$ 9.876,45. Esse resultado indica que, após descontar todos os custos e receitas para o momento presente, o empreendimento gerou retorno econômico superior ao investimento realizado.

Segundo os critérios clássicos de avaliação econômica, projetos que apresentam VPL superior a zero são considerados financeiramente viáveis, uma vez que remuneram integralmente o capital investido e ainda proporcionam ganho adicional ao empreendedor. Dessa forma, os resultados demonstram que a produção de café orgânico na propriedade estudada foi capaz de gerar valor econômico ao longo do horizonte de planejamento considerado.

A Taxa Interna de Retorno (TIR) calculada foi de 17,61% ao ano, valor substancialmente superior à Taxa Mínima de Atratividade (TMA) de 10% adotada neste estudo. A TIR representa a taxa de rentabilidade efetiva do investimento e indica que o sistema produtivo apresentou retorno econômico superior ao custo de oportunidade do capital. Assim, sob a ótica financeira, o empreendimento pode ser considerado atrativo para investimento.

Figura x Comparação entre a Taxa Interna de Retorno (TIR) e a Taxa Mínima de Atratividade (TMA) da produção de café orgânico

Figura 7 Comparação entre a Taxa Interna de Retorno (TIR) e a Taxa Mínima de Atratividade (TMA) da produção de café orgânico



Fonte: Do autor (2026).

A comparação entre a Taxa Interna de Retorno e a Taxa Mínima de Atratividade evidencia que o retorno gerado pelo empreendimento superou o rendimento mínimo esperado pelo investidor, reforçando a viabilidade econômica do sistema produtivo.

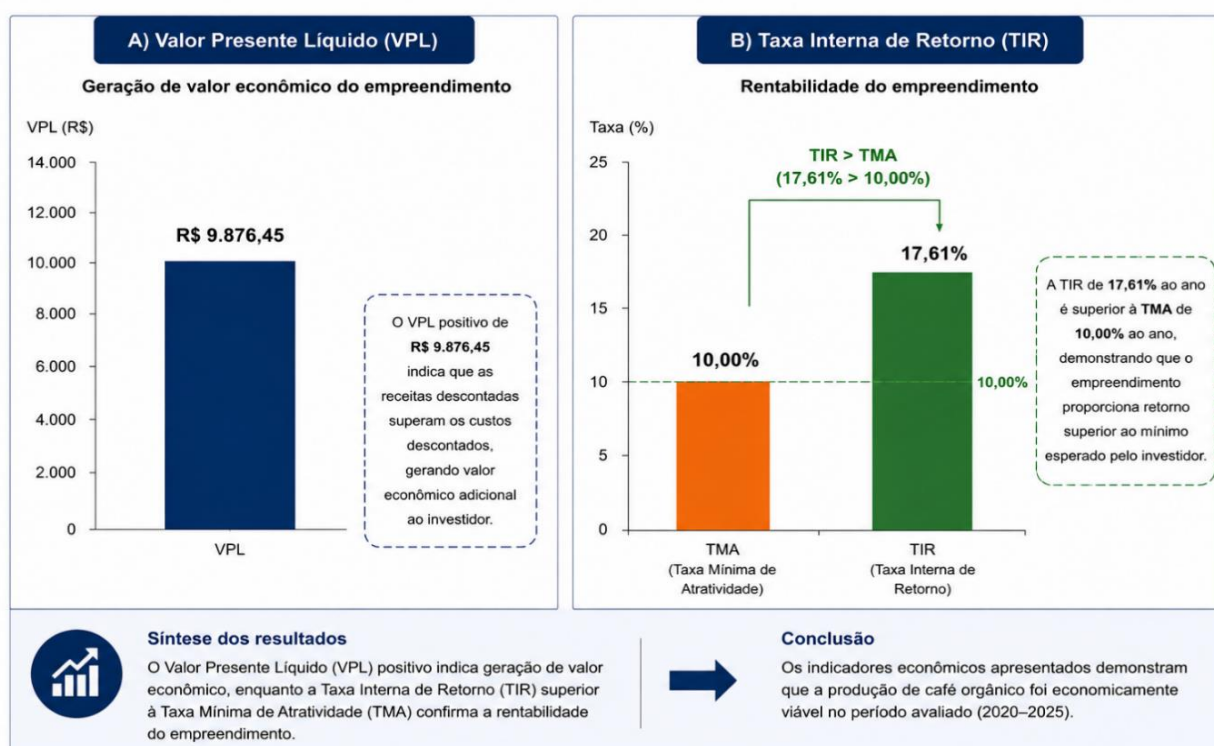
De forma geral, os resultados obtidos demonstram que a produção de café orgânico foi economicamente viável durante o período avaliado, mesmo considerando os elevados investimentos necessários para implantação da lavoura e manutenção da certificação orgânica. A geração de valor observada ao longo do horizonte de planejamento evidencia a capacidade do sistema em proporcionar retorno financeiro ao produtor.

Quando analisados em conjunto com os resultados ambientais obtidos no inventário de gases de efeito estufa, os indicadores econômicos tornam-se ainda mais relevantes. Enquanto a análise financeira demonstrou viabilidade econômica, a avaliação ambiental indicou pegada de carbono líquida negativa ($-9,59 \text{ kg CO}_2\text{e kg}^{-1}$ de café), evidenciando que a atividade foi capaz de conciliar retorno econômico e benefícios ambientais. Esse resultado sugere que sistemas orgânicos de produção podem contribuir simultaneamente para a geração de renda e para a mitigação das mudanças climáticas, reforçando seu potencial como estratégia de desenvolvimento sustentável para a cafeicultura brasileira.

De maneira geral, os indicadores econômicos obtidos demonstram a viabilidade financeira da produção de café orgânico na propriedade estudada. O Valor Presente Líquido (VPL) positivo de R\$ 9.876,45 indica que as receitas descontadas ao longo do horizonte de planejamento superaram os custos de implantação e condução da lavoura, gerando retorno econômico ao produtor. Da mesma forma, a Taxa Interna de Retorno (TIR) de 17,61% ao ano

mostrou-se superior à Taxa Mínima de Atratividade (TMA) de 10%, evidenciando que o empreendimento apresentou rentabilidade acima do retorno mínimo esperado para investimentos dessa natureza (conforme Figura 8). Em conjunto, esses resultados confirmam que a cafeicultura orgânica avaliada foi economicamente viável durante o período analisado, demonstrando potencial para conciliar geração de renda e sustentabilidade produtiva.

Figura 8 Comparação entre VPL e TIR da produção do café orgânico (2020-2025)



Fonte: Elaborado pelo autor com auxílio de ferramenta de inteligência artificial generativa (ChatGPT, modelo GPT-4o), a partir dos indicadores econômicos obtidos neste estudo.

5.3. Discussão

Os resultados obtidos neste estudo demonstram que a produção de café orgânico apresentou desempenho ambiental e econômico favorável ao longo do período avaliado, evidenciando o potencial da cafeicultura orgânica como estratégia de mitigação das mudanças climáticas associada à geração de retorno financeiro ao produtor. A análise integrada da pegada de carbono e do Custeio do Ciclo de Vida permitiu avaliar simultaneamente os impactos ambientais e a viabilidade econômica do sistema produtivo, contribuindo para uma compreensão mais abrangente da sustentabilidade da atividade.

5.3.1 Discussão da Pegada de Carbono

A pegada de carbono bruta da produção orgânica foi estimada em 1,92 kg CO₂e kg⁻¹ de café produzido, valor inferior aos observados em diversos estudos conduzidos em sistemas convencionais e mecanizados de produção de café.

Tabela 11 Comparação da pegada de carbono da produção de café com resultados reportados na literatura.

Estudo	Sistema de produção	Pegada de carbono (kg CO ₂ e kg ⁻¹ de café)
Maciel et al. (2022)	Café arábica manual	2,72
Maciel et al. (2022)	Café arábica semimecanizado	3,31
Maciel et al. (2022)	Café arábica mecanizado	4,66
Nab e Maslin (2020)	Produção sustentável	3,51
Nab e Maslin (2020)	Produção convencional	15,33
Araújo (2024)	Café tropical (pegada líquida)	-7,60
Este estudo	Café orgânico (pegada bruta)	1,92
Este estudo	Café orgânico (pegada líquida)	-9,59

Fonte: Adaptado de Maciel et al. (2022), Nab e Maslin (2020), Araújo (2024) e dados da pesquisa.

Observa-se que a pegada de carbono bruta obtida neste estudo foi aproximadamente 29% inferior à observada por Maciel et al. (2022) para sistemas convencionais conduzidos manualmente, 42% inferior aos sistemas semimecanizados e cerca de 59% inferior aos sistemas mecanizados. Quando comparada ao sistema sustentável avaliado por Nab e Maslin (2020), a pegada observada foi aproximadamente 45% menor, demonstrando o potencial do manejo orgânico na redução das emissões associadas à produção cafeeira.

A principal explicação para esse resultado está relacionada ao manejo nutricional adotado na propriedade e, especialmente, à redução da dependência de fertilizantes nitrogenados sintéticos ao longo do ciclo produtivo. Diversos estudos apontam que a fertilização nitrogenada representa uma das principais fontes de emissão de gases de efeito estufa na agricultura e na cafeicultura, devido às emissões diretas e indiretas de óxido nitroso

(N₂O), gás cujo potencial de aquecimento global é significativamente superior ao do dióxido de carbono (IPCC, 2021).

Na produção cafeeira, as emissões associadas à aplicação de nitrogênio frequentemente representam a maior parcela do inventário de gases de efeito estufa. Ronquim et al. (2025), avaliando sistemas de produção de café Robusta na Amazônia brasileira, verificaram que aproximadamente 79,7% das emissões totais estavam associadas à adubação nitrogenada. Resultados semelhantes são reportados pelo IPCC (2019) e pelo GHG Protocol Agricultural Guidance (WRI; WBCSD, 2014), que identificam a fertilização nitrogenada como uma das principais fontes emissoras em sistemas agrícolas, superando, em muitos casos, as emissões provenientes do consumo de combustíveis e da utilização de energia elétrica.

No presente estudo, embora tenham sido utilizados fertilizantes minerais durante a fase inicial de implantação da lavoura, a condução do sistema ocorreu predominantemente sob manejo orgânico, com utilização de compostos orgânicos, esterco avícola, bokashi e outros insumos permitidos pela certificação orgânica. A menor dependência de fertilizantes nitrogenados sintéticos ao longo dos anos avaliados contribuiu para a redução das emissões de N₂O associadas ao solo, refletindo diretamente nos valores mais baixos de pegada de carbono observados quando comparados aos sistemas convencionais reportados na literatura.

Além da redução das emissões associadas à fertilização, o uso contínuo de fontes orgânicas de nutrientes pode favorecer o incremento da matéria orgânica do solo e a ciclagem de nutrientes, contribuindo simultaneamente para a manutenção da fertilidade, melhoria da qualidade do solo e aumento dos estoques de carbono. Dessa forma, os resultados sugerem que estratégias de manejo voltadas à substituição parcial ou total de fertilizantes nitrogenados sintéticos por fontes orgânicas podem representar importante alternativa para a redução da intensidade de emissões na cafeicultura, sem necessariamente comprometer a produtividade e a viabilidade econômica do sistema produtivo.

Outro aspecto relevante refere-se à contribuição dos combustíveis fósseis para as emissões totais. Apesar de representarem parcela importante do Escopo 1, as emissões provenientes das operações agrícolas foram relativamente reduzidas em função da baixa mecanização observada na propriedade, característica comum em sistemas familiares de produção de café em regiões montanhosas do sul de Minas Gerais.

Quando consideradas as remoções de carbono decorrentes do crescimento da biomassa vegetal e da mudança de uso e ocupação do solo, a pegada de carbono líquida foi estimada em -9,59 kg CO₂e kg⁻¹ de café. Esse resultado demonstra que o sistema produtivo atuou como sumidouro líquido de carbono durante o período avaliado.

A condição de sumidouro observada está diretamente relacionada à conversão de uma área anteriormente ocupada por pastagem para cultivo de café. Culturas perenes apresentam elevada capacidade de acumular carbono tanto na biomassa aérea quanto no sistema radicular, promovendo incremento gradual dos estoques de carbono ao longo do desenvolvimento da lavoura. Além disso, práticas orgânicas de manejo tendem a aumentar os teores de matéria orgânica do solo, favorecendo o armazenamento de carbono em longo prazo.

O resultado encontrado foi inclusive superior ao reportado por Araújo (2024), que obteve pegada líquida de $-7,6 \text{ kg CO}_2\text{e kg}^{-1}$ em sistema cafeeiro tropical avaliado por meio da metodologia GHG Protocol Agrícola. Essa diferença pode estar associada às características específicas da área estudada, ao histórico de uso da terra, à idade da lavoura e ao manejo adotado ao longo do período analisado.

De maneira geral, os resultados reforçam a importância da inclusão dos processos de remoção de carbono nas avaliações ambientais da cafeicultura. Caso fossem consideradas apenas as emissões associadas aos insumos e operações agrícolas, o sistema apresentaria uma pegada positiva de $1,92 \text{ kg CO}_2\text{e kg}^{-1}$. Entretanto, a incorporação dos estoques de carbono da biomassa e do solo alterou significativamente o balanço final, resultando em uma pegada líquida negativa e evidenciando a relevância dos sistemas perenes na mitigação das mudanças climáticas.

Anualmente

Ressalta-se que a pegada de carbono apresentada neste estudo foi calculada considerando todo o período de avaliação (2020–2025), abrangendo as fases de implantação, formação e produção da lavoura. Essa abordagem permite representar de forma mais adequada o desempenho ambiental do sistema produtivo, uma vez que distribui as emissões e remoções de carbono ao longo de todo o ciclo analisado, evitando distorções associadas aos anos iniciais de baixa produtividade.

Entretanto, uma análise complementar dos resultados anuais evidencia a forte influência da produtividade sobre a intensidade de emissões da produção cafeeira. Embora as emissões totais da propriedade tenham permanecido relativamente estáveis ao longo do período avaliado, variando entre $2,82$ e $4,49 \text{ t CO}_2\text{e ano}^{-1}$, a pegada de carbono por unidade de produto apresentou variações significativas em função da quantidade de café produzida em cada safra.

Durante o primeiro ano produtivo (2021/2022), a lavoura encontrava-se em fase inicial de desenvolvimento, resultando em baixa produtividade e elevada intensidade de emissões por unidade de produto. À medida que o sistema atingiu sua fase de maior produção, observou-se redução expressiva da pegada de carbono por quilograma de café produzido, evidenciando o

efeito de diluição das emissões associadas à implantação e manutenção da lavoura ao longo de maiores volumes de produção.

De forma semelhante, no último ano avaliado observou-se aumento da intensidade de emissões em decorrência da redução da produtividade da safra, demonstrando que a pegada de carbono do produto final não depende exclusivamente das emissões geradas pelas atividades agrícolas, mas também da eficiência produtiva do sistema. Esse comportamento é consistente com o descrito por van Rikxoort et al. (2014) e por Cornelius, Hardy e Harvey (2025), que identificaram a produtividade como um dos principais fatores determinantes da intensidade de emissões na cafeicultura, uma vez que sistemas mais produtivos distribuem as emissões associadas a insumos, operações e infraestrutura por uma quantidade maior de produto comercializado. Tendência análoga pode ser observada nos dados de Maciel et al. (2022), apresentados na Tabela 11, em que as diferenças de pegada entre os sistemas manual, semimecanizado e mecanizado refletem a relação entre intensidade de uso de insumos e volume produzido.

Dessa forma, embora a avaliação integrada do período completo seja a abordagem mais adequada para representar o desempenho ambiental da propriedade, a análise anual reforça a importância do manejo produtivo e da estabilidade das safras como fatores capazes de influenciar significativamente a pegada de carbono da cafeicultura.

5.3.2 Discussão do Custeio do Ciclo de Vida

Sob a perspectiva econômica, os resultados obtidos por meio da metodologia de Custeio do Ciclo de Vida indicaram que a produção de café orgânico apresentou viabilidade financeira durante o período analisado. O Valor Presente Líquido (VPL) positivo de R\$ 9.876,45 e a Taxa Interna de Retorno (TIR) de 17,61% demonstram que as receitas geradas pela atividade foram suficientes para remunerar o capital investido e superar a Taxa Mínima de Atratividade (TMA) de 10% adotada neste estudo.

Tabela 12 Comparação dos indicadores econômicos da cafeicultura reportados na literatura.

Estudo	Sistema produtivo	VPL(R\$)	TIR
Arêdes e Pereira (2008)	Café convencional (25 sc ha ⁻¹)	997,76 ha ⁻¹	6,99%
Arêdes e Pereira (2008)	Café convencional (40 sc ha ⁻¹)	10.475,65 ha ⁻¹	13,85%
Marcomini (2013)	Café especial (pequena propriedade)	81.769,00	20,29%
Marcomini (2013)	Café convencional (pequena propriedade)	16.260,00	16,68%
Marcomini (2013)	Café especial (grande propriedade)	810.178,00	40,13%
Marcomini (2013)	Café convencional (grande propriedade)	490.562,00	20,83%
Este estudo	Café orgânico (2 ha)	9.876,45	17,61%

Fonte: Adaptado de Arêdes e Pereira (2008), Marcomini (2013) e dados da pesquisa.

Embora o Valor Presente Líquido observado tenha sido inferior aos encontrados por Marcomini (2013), deve-se considerar que os sistemas analisados pelo autor apresentavam maior escala produtiva e maior volume de comercialização com certificados internacionais (maior que 100 hectares). A propriedade avaliada neste estudo possui apenas 2 hectares e foi analisada durante os primeiros anos de desenvolvimento da lavoura, período em que os custos de implantação ainda exercem forte influência sobre os indicadores financeiros.

Por outro lado, a Taxa Interna de Retorno obtida (17,61%) mostrou-se superior àquela observada por Arêdes e Pereira (2008) para sistemas convencionais com produtividade de 25 e 40 sacas por hectare. Esse resultado sugere que a produção orgânica pode apresentar desempenho econômico competitivo mesmo diante dos custos adicionais associados à certificação e ao manejo diferenciado da lavoura.

A viabilidade econômica observada também pode estar relacionada à valorização do mercado cafeeiro nos últimos anos. Dados da COOXUPÉ demonstram crescimento expressivo no preço médio da saca de café entre 2020 e 2025.

Tabela 13 Preço médio da saca de café dos últimos 5 anos.

Ano	Média (R\$)
2025	1.962,27
2024	1.303,97
2023	954,91
2022	1.185,98
2021	886,80
2020	542,09

Fonte: COOXUPÉ, 2025.

Observa-se que o preço médio da saca apresentou valorização superior a 260% entre 2020 e 2025. Segundo Arêdes e Pereira (2008), o preço de comercialização constitui uma das variáveis de maior influência sobre o Valor Presente Líquido da atividade cafeeira, sendo responsável por parcela significativa da rentabilidade dos empreendimentos. Dessa forma, a valorização observada no mercado brasileiro pode ter contribuído diretamente para os resultados financeiros positivos encontrados neste estudo.

Além da valorização do produto, o mercado de cafés especiais e orgânicos tem apresentado crescente demanda por atributos relacionados à sustentabilidade ambiental, rastreabilidade e qualidade. Nesse contexto, a diferenciação do produto pode representar importante mecanismo de agregação de valor, contribuindo para a melhoria dos indicadores econômicos da atividade.

5.3.3 Integração entre desempenho ambiental e econômico

A principal contribuição deste estudo consiste na integração entre indicadores ambientais e econômicos para avaliação da sustentabilidade da produção de café orgânico. Embora existam diversos trabalhos dedicados à quantificação da pegada de carbono ou à análise de viabilidade econômica da cafeicultura de forma isolada, ainda são escassos os estudos que avaliam simultaneamente o desempenho climático e financeiro dos sistemas produtivos, sobretudo em propriedades familiares conduzidas sob manejo orgânico. Dessa forma, a abordagem adotada permite uma compreensão mais abrangente da sustentabilidade da atividade agrícola, considerando não apenas sua capacidade de gerar renda, mas também sua contribuição para a mitigação das mudanças climáticas.

Tabela 14 Comparação integrada dos resultados ambientais e econômicos.

Ano	Média (R\$)
Pegada de carbono bruta	1,92 kg CO ₂ e kg ⁻¹ de café
Pegada de carbono líquida	-9,59 kg CO ₂ e kg ⁻¹ de café
VPL	R\$ 9.876,45
TIR	17,61%
Payback Descontado	3,45 anos

Fonte: Do autor (2026).

Os resultados demonstram que o sistema produtivo avaliado apresentou simultaneamente desempenho ambiental positivo e viabilidade econômica. A pegada de carbono líquida negativa evidencia que as remoções de carbono associadas ao crescimento da biomassa e ao incremento dos estoques de carbono do solo foram superiores às emissões geradas pelas atividades agrícolas. Paralelamente, os indicadores financeiros demonstraram que a atividade foi capaz de gerar retorno econômico ao produtor, apresentando Valor Presente Líquido positivo, Taxa Interna de Retorno superior à Taxa Mínima de Atratividade e recuperação do investimento ainda durante o quarto ano de operação da lavoura.

Tradicionalmente, existe a percepção de que práticas agrícolas voltadas à sustentabilidade ambiental tendem a elevar os custos de produção e reduzir a competitividade econômica dos empreendimentos rurais. Entretanto, os resultados obtidos neste estudo indicam que tais objetivos não são necessariamente conflitantes. Pelo contrário, práticas associadas à agricultura orgânica, como a utilização de fertilizantes orgânicos, a conservação do solo, o aumento da matéria orgânica e a redução da dependência de insumos sintéticos, podem contribuir simultaneamente para a melhoria dos indicadores ambientais e para a agregação de valor ao produto final.

Sob a perspectiva da gestão rural, a integração entre pegada de carbono e viabilidade econômica representa uma importante ferramenta de apoio à tomada de decisão. Informações dessa natureza permitem que produtores rurais, cooperativas, empresas do setor cafeeiro e formuladores de políticas públicas avaliem de forma mais precisa os benefícios e limitações de diferentes estratégias de manejo. No contexto da implantação de novas lavouras, por exemplo, indicadores integrados podem auxiliar produtores na escolha entre sistemas convencionais e orgânicos, fornecendo informações não apenas sobre a rentabilidade esperada, mas também sobre os potenciais impactos ambientais associados ao empreendimento.

Essa abordagem possui especial relevância para propriedades familiares, nas quais as decisões de investimento frequentemente envolvem elevado grau de incerteza e comprometimento de recursos financeiros de longo prazo. Nesse sentido, a análise conjunta dos indicadores ambientais e econômicos fornece subsídios mais robustos para o planejamento produtivo, permitindo avaliar simultaneamente o retorno financeiro do investimento e sua contribuição para a sustentabilidade ambiental da propriedade.

Além disso, a crescente demanda por produtos sustentáveis e a consolidação de mercados relacionados à descarbonização da economia tendem a ampliar a importância estratégica desse tipo de avaliação. Empresas exportadoras, cooperativas e certificadoras têm demonstrado interesse crescente por indicadores relacionados às emissões de gases de efeito estufa, especialmente em cadeias produtivas voltadas para mercados internacionais. Dessa forma, sistemas produtivos capazes de demonstrar simultaneamente baixa intensidade de emissões e viabilidade econômica podem apresentar vantagens competitivas relevantes, seja por meio da obtenção de certificações ambientais, seja pela possibilidade de acesso a mercados diferenciados e programas relacionados à remuneração por serviços ambientais.

Portanto, os resultados obtidos reforçam o potencial da cafeicultura orgânica como instrumento de desenvolvimento sustentável, evidenciando que é possível conciliar geração de renda, viabilidade financeira e mitigação das mudanças climáticas em um mesmo sistema produtivo. Mais do que avaliar isoladamente custos ou emissões, a integração entre os indicadores ambientais e econômicos permite compreender a sustentabilidade da atividade de forma sistêmica, fornecendo informações relevantes para produtores rurais, cooperativas, empresas do agronegócio e formuladores de políticas públicas voltadas à transição para sistemas agrícolas de baixa emissão de carbono.

6. CONCLUSÃO

O presente estudo teve como objetivo avaliar o desempenho ambiental e econômico da produção de café orgânico no município de Maria da Fé, Minas Gerais, por meio da elaboração do inventário de gases de efeito estufa, da quantificação da pegada de carbono e da aplicação da metodologia de Custeio do Ciclo de Vida (CCV). A abordagem adotada permitiu analisar, de forma integrada, os impactos ambientais e a viabilidade econômica do sistema produtivo ao longo dos cinco primeiros anos de implantação e desenvolvimento da lavoura.

Os resultados do inventário de gases de efeito estufa demonstraram que as emissões da propriedade estiveram concentradas predominantemente no Escopo 1, associado ao uso de fertilizantes, corretivos agrícolas e combustíveis fósseis utilizados nas operações de manejo. As emissões acumuladas totalizaram 19,92 t CO₂e durante o período avaliado, resultando em uma pegada de carbono bruta de 1,92 kg CO₂e kg⁻¹ de café produzido. Esse valor mostrou-se inferior aos relatados em diversos estudos nacionais e internacionais para sistemas convencionais de produção, evidenciando o potencial do manejo orgânico para redução das emissões associadas à cafeicultura.

Quando consideradas as remoções de carbono decorrentes do crescimento da biomassa dos cafeeiros e da conversão da área anteriormente ocupada por pastagem para cultivo perene, observou-se um balanço líquido acumulado de -99,54 t CO₂e. Como consequência, a pegada de carbono líquida foi estimada em -9,59 kg CO₂e kg⁻¹ de café produzido, indicando que o sistema atuou como um sumidouro líquido de carbono durante todo o período analisado. Esse resultado reforça a relevância da inclusão dos estoques de carbono da biomassa e do solo em avaliações ambientais da cafeicultura, sobretudo em sistemas orgânicos conduzidos sob práticas conservacionistas.

Sob a perspectiva econômica, a aplicação do Custeio do Ciclo de Vida demonstrou que a produção de café orgânico apresentou viabilidade financeira ao longo do horizonte de planejamento considerado. O Valor Presente Líquido (VPL) positivo de R\$ 9.876,45, a Taxa Interna de Retorno (TIR) de 17,61% ao ano — superior à Taxa Mínima de Atratividade adotada — e o Payback Descontado de 3,45 anos evidenciam que o empreendimento foi capaz de recuperar o capital investido e gerar retorno econômico ao produtor. Mesmo diante dos elevados custos de implantação da lavoura e dos investimentos necessários à manutenção da certificação orgânica, o sistema apresentou desempenho econômico satisfatório.

A análise integrada dos resultados ambientais e econômicos constitui a principal contribuição deste estudo. Os resultados demonstraram que a obtenção de benefícios ambientais expressivos não ocorreu em detrimento da rentabilidade do empreendimento. Pelo contrário, verificou-se que a propriedade foi capaz de conciliar geração de renda, retorno financeiro e mitigação das mudanças climáticas em um mesmo sistema produtivo. Tal constatação é particularmente relevante diante da crescente demanda por alimentos produzidos sob critérios de sustentabilidade e da necessidade de transição para sistemas agrícolas de baixa emissão de carbono.

Do ponto de vista prático, os resultados fornecem subsídios importantes para a tomada de decisão de produtores rurais, cooperativas, empresas do setor cafeeiro e formuladores de

políticas públicas. A integração entre indicadores ambientais e econômicos permite avaliar de maneira mais abrangente os benefícios e desafios associados à implantação de sistemas produtivos sustentáveis. Para produtores familiares, como o caso da propriedade estudada, informações dessa natureza podem contribuir para o planejamento de novos investimentos, reduzindo incertezas relacionadas tanto à rentabilidade quanto ao desempenho ambiental da atividade.

Além disso, os resultados evidenciam o potencial da cafeicultura orgânica como estratégia alinhada aos princípios da agricultura de baixo carbono, podendo contribuir para programas de certificação ambiental, mercados diferenciados, mecanismos de pagamento por serviços ambientais e futuras iniciativas relacionadas aos mercados voluntários de carbono.

Como limitação do estudo, destaca-se que a avaliação foi realizada em uma única propriedade rural e em um horizonte temporal correspondente aos primeiros anos de desenvolvimento da lavoura. Adicionalmente, as emissões do Escopo 3 não foram integralmente contempladas pela ferramenta utilizada, o que sugere cautela na comparação direta com estudos que adotam fronteiras mais amplas de análise.

Por fim, recomenda-se que pesquisas futuras ampliem a abrangência da análise para diferentes regiões produtoras, sistemas de manejo, escalas de produção e períodos mais longos de avaliação. Também se destaca a necessidade de estudos que integrem inventários de gases de efeito estufa, análise econômica, serviços ecossistêmicos e mercados de carbono, contribuindo para o desenvolvimento de modelos produtivos capazes de conciliar competitividade econômica, segurança alimentar e sustentabilidade ambiental.

Conclui-se, portanto, que a cafeicultura orgânica avaliada apresentou desempenho ambiental e econômico favorável, demonstrando que sistemas agrícolas sustentáveis podem simultaneamente atuar como sumidouros de carbono, gerar retorno financeiro ao produtor e contribuir para os desafios globais relacionados à mitigação das mudanças climáticas e à promoção do desenvolvimento sustentável.

7. RESULTADOS ESPERADOS e IMPACTOS CIENTÍFICOS, TECNOLÓGICOS E SOCIAIS

7.1. Resultados esperados

Espera-se que este estudo forneça uma avaliação integrada do desempenho ambiental e econômico da produção de café orgânico, por meio da quantificação das emissões e remoções

de gases de efeito estufa, da estimativa da pegada de carbono e da aplicação da metodologia de Custeio do Ciclo de Vida (CCV). A partir da análise dos dados obtidos, espera-se identificar os principais fatores responsáveis pelas emissões de carbono e pelos custos de produção ao longo do ciclo produtivo, permitindo a caracterização dos pontos críticos ambientais e econômicos da atividade.

Adicionalmente, espera-se demonstrar a viabilidade da utilização conjunta de indicadores ambientais e financeiros como ferramenta de apoio à tomada de decisão no setor cafeeiro. Os resultados poderão subsidiar a adoção de práticas produtivas mais sustentáveis, contribuindo para a redução das emissões de gases de efeito estufa sem comprometer a rentabilidade da atividade agrícola.

A pesquisa também pretende fornecer informações que possam auxiliar produtores rurais, cooperativas, certificadoras e agentes públicos na formulação de estratégias voltadas à produção de café de baixo carbono, fortalecendo a competitividade da cafeicultura brasileira diante das crescentes exigências ambientais dos mercados nacionais e internacionais.

7.2. Impacto científico

Do ponto de vista científico, espera-se que o estudo contribua para o avanço do conhecimento sobre a relação entre desempenho ambiental e viabilidade econômica na cafeicultura. Embora existam diversos trabalhos voltados à quantificação da pegada de carbono ou à análise econômica da produção de café, ainda são limitadas as pesquisas que integram essas duas abordagens em um mesmo modelo analítico, especialmente em sistemas orgânicos conduzidos em propriedades familiares.

A pesquisa amplia a literatura nacional sobre inventários de gases de efeito estufa na agricultura, fornecendo dados primários obtidos em condições reais de produção no sul de Minas Gerais. Além disso, contribui para a consolidação de metodologias aplicadas à avaliação da sustentabilidade de sistemas agrícolas, integrando ferramentas reconhecidas internacionalmente, como o Programa Brasileiro GHG Protocol, a ISO 14067 e o Custeio do Ciclo de Vida.

Os resultados poderão servir como referência para futuras pesquisas relacionadas à agricultura de baixo carbono, avaliação ambiental da cafeicultura, mercados de carbono, análise econômica de sistemas agroecológicos e desenvolvimento sustentável no meio rural.

7.3. Impacto tecnológico

Sob a perspectiva tecnológica, este estudo contribui para a difusão e aplicação de ferramentas integradas de gestão ambiental e econômica voltadas ao setor agropecuário. A utilização da ferramenta GHG Protocol Cafeicultura associada à metodologia de Custeio do Ciclo de Vida demonstrou a viabilidade de empregar instrumentos capazes de quantificar simultaneamente indicadores ambientais e financeiros da atividade agrícola, fornecendo uma visão mais abrangente da sustentabilidade dos sistemas produtivos.

Os resultados obtidos poderão estimular a adoção de tecnologias voltadas ao monitoramento de emissões de gases de efeito estufa, à rastreabilidade ambiental da produção e à gestão econômica das propriedades rurais. Além disso, a metodologia desenvolvida poderá ser replicada e adaptada para diferentes propriedades, regiões e sistemas de cultivo, contribuindo para a construção de indicadores que auxiliem produtores, cooperativas e empresas na tomada de decisão e no planejamento estratégico da produção.

A pesquisa também apresenta potencial para apoiar iniciativas relacionadas à agricultura de baixo carbono, à certificação ambiental e à valorização de produtos agrícolas sustentáveis. A crescente demanda dos mercados consumidores por produtos com atributos ambientais verificáveis tem impulsionado a utilização de indicadores relacionados às emissões de gases de efeito estufa e à pegada de carbono como ferramentas de diferenciação competitiva e agregação de valor.

Nesse contexto, os resultados poderão subsidiar processos de certificação voltados à produção sustentável de café, incluindo certificações orgânicas, programas de comércio justo (Fair Trade), certificações socioambientais e demais mecanismos de reconhecimento de boas práticas agrícolas. A disponibilidade de informações confiáveis sobre emissões e balanço de carbono tende a fortalecer a rastreabilidade da cadeia produtiva e ampliar a competitividade dos produtores em mercados nacionais e internacionais cada vez mais orientados por critérios ambientais, sociais e de governança (ESG).

Adicionalmente, a utilização desses indicadores poderá favorecer futuras iniciativas relacionadas à rotulagem ambiental, certificação de produtos de baixo carbono, programas corporativos de sustentabilidade, mecanismos de pagamento por serviços ambientais e potenciais oportunidades vinculadas aos mercados voluntários de carbono. Dessa forma, a metodologia proposta não apenas contribui para o aprimoramento da gestão da propriedade rural, mas também constitui uma ferramenta estratégica para ampliar a inserção da cafeicultura sustentável em cadeias produtivas de maior valor agregado.

Por fim, ao demonstrar que sistemas orgânicos podem apresentar simultaneamente desempenho ambiental positivo e viabilidade econômica, o estudo contribui para reduzir as incertezas associadas à adoção dessas práticas produtivas, incentivando sua disseminação entre produtores rurais e fortalecendo a transição para modelos agrícolas mais sustentáveis, resilientes e alinhados às demandas contemporâneas da sociedade e do mercado.

7.4. Impacto social

Os impactos sociais decorrentes deste estudo estão diretamente relacionados ao fortalecimento da agricultura familiar, à geração de renda no meio rural e à promoção de sistemas produtivos mais sustentáveis e resilientes. Ao demonstrar que a produção de café orgânico pode apresentar simultaneamente viabilidade econômica e desempenho ambiental positivo, a pesquisa fornece informações técnicas capazes de subsidiar a tomada de decisão de produtores rurais, cooperativas, associações e agentes de assistência técnica envolvidos na cadeia produtiva do café.

A disponibilização de indicadores integrados de sustentabilidade, contemplando aspectos ambientais e econômicos, contribui para reduzir as incertezas associadas à implantação e condução de lavouras cafeeiras, especialmente em pequenas propriedades rurais, onde os recursos financeiros são mais limitados e os riscos de investimento assumem maior relevância. Nesse sentido, a metodologia proposta pode auxiliar produtores na avaliação prévia da viabilidade de diferentes estratégias de manejo, favorecendo decisões mais seguras e fundamentadas.

Além disso, a valorização de sistemas produtivos sustentáveis pode ampliar as oportunidades de inserção dos produtores em mercados diferenciados, capazes de remunerar atributos relacionados à qualidade, rastreabilidade, sustentabilidade e responsabilidade socioambiental. Esse processo tende a fortalecer a permanência das famílias no campo, estimular a sucessão rural, ampliar a geração de empregos e contribuir para o desenvolvimento socioeconômico das regiões produtoras.

A pesquisa também apresenta potencial para apoiar programas de assistência técnica, extensão rural e capacitação de produtores, promovendo a disseminação de conhecimentos relacionados à gestão ambiental, gestão econômica e adoção de práticas agrícolas sustentáveis. Dessa forma, os resultados contribuem não apenas para a melhoria da competitividade da atividade cafeeira, mas também para a construção de sistemas produtivos mais inclusivos, resilientes e alinhados aos princípios do desenvolvimento sustentável.

Outro aspecto relevante refere-se ao potencial de replicação da metodologia em outras propriedades rurais. Ao demonstrar que práticas conservacionistas e sistemas orgânicos podem ser economicamente viáveis, o estudo pode incentivar a adoção de modelos produtivos mais sustentáveis por outros agricultores, ampliando os benefícios sociais associados à geração de renda, segurança econômica e fortalecimento das comunidades rurais.

7.5. Impacto ambiental

Os impactos ambientais deste estudo estão associados à geração de conhecimento sobre o potencial da cafeicultura orgânica como estratégia de mitigação das mudanças climáticas e promoção da agricultura de baixo carbono. A quantificação das emissões de gases de efeito estufa, associada à avaliação das remoções de carbono na biomassa e no solo, permitiu demonstrar a capacidade do sistema produtivo em atuar como sumidouro líquido de carbono durante o período analisado.

Os resultados obtidos contribuem para evidenciar a importância de práticas conservacionistas, como o uso de adubação orgânica, a manutenção da cobertura do solo, o aumento dos aportes de matéria orgânica e a redução da dependência de fertilizantes sintéticos. Essas práticas favorecem o incremento dos estoques de carbono na biomassa vegetal e no solo, promovendo simultaneamente a redução das emissões e o aumento da capacidade de sequestro de carbono dos sistemas agrícolas.

A pesquisa também reforça a relevância da conversão de áreas degradadas ou ocupadas por pastagens em sistemas agrícolas perenes conduzidos sob princípios sustentáveis. A incorporação do cafeeiro ao sistema produtivo possibilitou o aumento dos estoques de carbono ao longo do tempo, contribuindo para a melhoria do balanço de carbono da propriedade e para a mitigação dos impactos associados às mudanças climáticas.

Em uma perspectiva mais ampla, os resultados podem contribuir para a formulação de políticas públicas e programas de incentivo voltados à agricultura de baixo carbono, à recuperação da qualidade dos solos e à ampliação de práticas agrícolas sustentáveis. Além disso, fornecem evidências científicas que podem apoiar iniciativas relacionadas a certificações ambientais, pagamentos por serviços ecossistêmicos e mercados voluntários de carbono.

A adoção de sistemas produtivos capazes de combinar rentabilidade econômica e balanço positivo de carbono representa uma importante estratégia para o cumprimento de compromissos climáticos nacionais e internacionais, especialmente aqueles relacionados à redução das emissões de gases de efeito estufa no setor agropecuário. Dessa forma, o estudo

contribui para o fortalecimento de modelos de produção mais resilientes às mudanças climáticas, ambientalmente responsáveis e alinhados aos objetivos globais de desenvolvimento sustentável.

8. REFERÊNCIAS

ABNT. NBR ISO 14040:2009 – **Gestão ambiental: avaliação do ciclo de vida: princípios e estrutura**. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2009.

ARÊDES, A. F.; PEREIRA, M. W. G. **Análise econômica da produção de café arábica: um estudo de caso com simulações de Monte Carlo para sistemas de baixa e alta produtividade**. *Informações Econômicas*, São Paulo, v. 38, n. 4, p. 19-31, 2008.

ARAÚJO, J. S. **Balanco de gases de efeito estufa em área de produção de café em ambiente tropical**. 2024. 108 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Universidade Federal de Catalão, Catalão, 2024.

ARELLANO, E.; HERNÁNDEZ, M. **Carbon footprint in coffee production systems: a review of greenhouse gas emissions and mitigation opportunities in Latin America**. *Sustainability, Basel*, v. 15, n. 18, 2023.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DE CAFÉ. **Indicadores da indústria de café**. Rio de Janeiro, 2022. Disponível em: <https://estatisticas.abic.com.br/estatisticas/indicadores-da-industria/indicadores-da-industria-de-cafe-2022/>. Acesso em: 10 nov. 2024.

AZEVEDO JUNIOR, Romildo Rocha. **Teores foliares de macro e micronutrientes, atributos químicos e microbiológicos do solo em manejos orgânico e convencional de Coffea arabica L.** 2015. Tese (Doutorado) – [Instituição não informada], Brasil, 2015.

BRUNI, Adriano Leal; FAMÁ, Rubens; SIQUEIRA, J. de O. **Análise do risco na avaliação de projetos de investimento: uma aplicação do método de Monte Carlo**. *Caderno de Pesquisas em Administração*, São Paulo, v. 1, n. 6, p. 62-75, 1998.

CLARK, Michael; TILMAN, David. **Comparative analysis of environmental impacts of agricultural production systems, agricultural input efficiency, and food choice**. *Environmental Research Letters*, v. 12, n. 6, p. 064016, 2017.

COELLO, Carlos A. Coello. **An updated survey of evolutionary multiobjective optimization techniques: state of the art and future trends.** *Computers & Operations Research*, v. 34, n. 10, p. 1-27, 2006.

COLTRO, L.; OLIVEIRA, D. R.; CARVALHO, G. C.; LUIZ, J. H. B. **Avaliação do ciclo de vida do café arábica: estudo de caso com foco na produção de mudas.** *Revista Brasileira de Meio Ambiente*, v. 10, n. 1, p. 56-72, 2022.

CONAB. **Acompanhamento da safra brasileira: café. Safra 2023.** 3. levantamento. Brasília, DF: CONAB, 2023. Disponível em: <https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/cafe/boletim-da-safra-de-cafe>. Acesso em: 23 maio 2025.

COOXUPÉ. **Preço médio das sacas de café comercializado na Cooxupé em R\$.** Guaxupé, 2024. Disponível em: https://portalweb.cooxupe.com.br:9080/portal/precohistoricocafe_2.jsp. Acesso em: 4 out. 2025.

COOXUPÉ. **Histórico de preços do café.** Guaxupé: Cooperativa Regional de Cafeicultores em Guaxupé, 2025.

CORNELIUS, J. P.; HARDY, F. W.; HARVEY, C. A. **Carbon footprints and CO₂ removal in primary production of coffee: a meta-analytical review.** *Environmental Reviews*, v. 33, p. 1-15, 2025.

COSTA, G. S. et al. **Otimizando ganhos no sistema de integração lavoura-pecuária-floresta: aplicação da otimização multiobjetivo.** *Contribuciones a las Ciencias Sociales*, v. 17, n. 6, p. 1-15, 2024.

DA SILVA, Alessandra Fagioli et al. **Variabilidade espacial de atributos químicos do solo cultivado com café arábica (*Coffea arabica* L.) sob diferentes manejos.** *Coffee Science*, v. 5, n. 2, p. 173-182, 2010.

DE AMORIM, Gilvania Domiciano; DE OLIVEIRA, Romildo Lopes. **Registros de manejos na cafeicultura orgânica: um estudo de caso do grupo de produção de café orgânico de Divino-MG. Organizações Rurais & Agroindustriais**, v. 24, p. e1900, 2022.

DE MARCO, I.; RIEMMA, S.; IANNONE, R. **Life cycle assessment of supercritical CO₂ extraction of caffeine from coffee beans. Journal of Supercritical Fluids**, v. 133, p. 393-400, 2018.

DE REZENDE, José Luiz Pereira; DE OLIVEIRA, Antônio Donizette. **Análise econômica e social de projetos florestais**. Viçosa, MG: UFV, 2008.

DEB, Kalyanmoy. **Multi-objective optimization using evolutionary algorithms. Chichester: John Wiley & Sons**, 2001.

DHILLON, B. S. **Life cycle costing: techniques, models and applications**. New York: Routledge, 1989.

FREITAS, LÍlian Carla Ferreira; RENÓ, Maria Luiza Grillo; LORA, Electo Eduardo Silva. **Avaliação do ciclo de vida do café: análise comparativa e gestão de melhorias. Brazilian Journal of Development**, v. 7, n. 5, p. 49010-49023, 2021.

GHG PROTOCOL. **Programa Brasileiro GHG Protocol: especificações do programa e ferramenta de cálculo de emissões de gases de efeito estufa**. São Paulo: Fundação Getúlio Vargas, 2025. Disponível em: <https://ghgprotocolbrasil.com.br>. Acesso em: 19 jun. 2026.

HUNKELER, D.; LICHTENVORT, K.; REBITZER, G. **Environmental life cycle costing**. Boca Raton: CRC Press, 2008.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 14067:2018: greenhouse gases: carbon footprint of products – requirements and guidelines for quantification**. Geneva: ISO, 2018.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. **2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories**. Hayama: Institute for Global Environmental Strategies, 2006.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. 2019 **refinement to the 2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories**. Geneva: IPCC, 2019.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. **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**. Geneva: IPCC, 2023.

LANES JUNIOR, João Neres. **Da agricultura convencional à agroecológica: práticas e vivências de uma família camponesa** no município de Cerejeiras/RO. 2013.

LEAL, Ulcilea A. S.; SILVA, Geraldo N.; KARAM, Décio. **Otimização dinâmica multiobjetivo da aplicação de herbicida considerando a resistência de plantas daninhas**. 2012.

LEWANDOWSKI, Iris. Bioeconomia: **moldando a transição para uma economia sustentável de base biológica**. Cham: Springer Nature, 2018.

LOPES, Paulo Rogério et al. **Uma análise das consequências da cafeicultura convencional e as opções de modelos sustentáveis de produção: agricultura orgânica e agroflorestal**. REDD – Revista Espaço de Diálogo e Desconexão, 2014.

MÄDER, Paul et al. **Soil fertility and biodiversity in organic farming**. Science, v. 296, n. 5573, p. 1694-1697, 2002.

MARCOMINI, Gilson Rogério et al. **Aspectos econômico-financeiros da produção de café convencional e café especial**. 2008.

MARCOMINI, G. R. **Aspectos econômico-financeiros da produção de café convencional e de café especial**. Revista Científica da FHO|UNIARARAS, v. 1, n. 1, p. 5-

13, 2013. Disponível em: <https://e-revista.unioeste.br/index.php/csaemrevista/article/view/20515/20773>. Acesso em: 23 maio 2025.

MEEMKEN, Eva-Marie; QAIM, Matin. **Organic agriculture, food security, and the environment. Annual Review of Resource Economics**, v. 10, n. 1, p. 39-63, 2018.

MOREIRA, M. F. et al. **Sistemas agroflorestais e consórcios na cultura do café**. 2023.

NOPONEN, M. R. A. et al. **Greenhouse gas emissions in coffee grown with differing input levels under conventional and organic management. Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 151, p. 6-15, 2012.

OPENAI. **ChatGPT**: modelo GPT-4o. Figura gerada por inteligência artificial a partir do comando "Comparação entre VPL e TIR da produção do café orgânico (2020-2025)". San Francisco: OpenAI, 2026. Disponível em: <https://chat.openai.com>. Acesso em: 15 Jun. 2026.

PRASARA-A, Jittima; GHEEWALA, Shabbir H. **Sustainable utilization of rice husk ash from power plants: a review. Journal of Cleaner Production**, v. 167, p. 1020-1028, 2017.

RONQUIM, C. C. et al. **Pegada e estoque de carbono dos cafés Robusta da Amazônia brasileira**. Campinas: Embrapa Territorial, 2025.

RODRIGUES, Luiz Carlos Estraviz. **Tópicos de economia florestal**. Documentos Florestais, Piracicaba, n. 12, p. 1-49, 1991.

ROSA NETO, C.; ARAÚJO, L. V.; SILVA, F. A. C. **Análise de viabilidade econômica da produção de café canéfora na região de Machadinho d'Oeste – RO**. Anais do 63º Congresso da Sociedade Brasileira de Economia, Administração e Sociologia Rural (SOBER), 2025.

SAKAMOTO, Hugo et al. **Using the life cycle approach for multiobjective optimization in the context of the green supply chain: a case study of Brazilian coffee.** Sustainability, v. 15, n. 18, p. 13987, 2023.

SANTOS, et al. **Carbon balance in coffee farming: a life cycle case study of conservationist versus conventional systems.** Cleaner Production Letters, v. 9, 2025.

SAVIĆ, Bojan; MILOJEVIĆ, Ivan; PETROVIĆ, Vesna. **Cost optimization in agribusiness based on life cycle costing.** Ekonomika Poljoprivrede, v. 66, n. 3, p. 823-834, 2019.

SCOLFORO, José Roberto; CARVALHO, Luis Marcelo Tavares de; OLIVEIRA, Antônio Donizette de (ed.). **Inventário florestal de Minas Gerais: monitoramento dos reflorestamentos e tendências da produção em volume, peso de matéria seca e carbono, 2005-2007.** Lavras: UFLA, 2008.

SOUZA, A. L. **Avaliação ambiental da cafeicultura convencional e orgânica: estudo de caso em propriedades do sul de Minas Gerais.** 2023. Dissertação (Mestrado em Ciências Ambientais) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2023.

SOUZA, Daiane Pereira de et al. **A vulnerabilidade da cafeicultura: uma análise da rentabilidade econômica.** 2018.

STOLZ, Marcos Vinícius Reisdorfer. **Comportamento do consumidor em relação ao consumo de café orgânico.** Porto Alegre, 2020.

VAN RIKXOORT, H. et al. **Carbon footprints and carbon stocks reveal climate-friendly coffee production.** Agronomy for Sustainable Development, v. 34, n. 4, p. 887-897, 2014.

VLAD, Ionela Mițuko et al. **LCCA relevant method supporting the decision to establish an apple orchard in organic system.** 2023.

VLADISAVLJEVIĆ, V.; VUKASOVIĆ, B. **Savremeni sistemi obračuna troškova [Contemporary Costing Systems]**. Odtor, Belgrado, v. 3, n. 3, p. 133-151, 2017.

WORLD RESOURCES INSTITUTE; WORLD BUSINESS COUNCIL FOR SUSTAINABLE DEVELOPMENT. **GHG protocol agricultural guidance: interpreting the corporate accounting and reporting standard for the agricultural sector**. Washington, DC: WRI; WBCSD, 2014.

ZARO, G. C. et al. **Carbon sequestration and sustainability in perennial cropping systems**. *Agricultural Systems*, v. 184, 2020.