



UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA (UnB)
FACULDADE DE ECONOMIA, ADMINISTRAÇÃO, CONTABILIDADE E GESTÃO DE
POLÍTICAS PÚBLICAS (FACE)
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ECONOMIA (PPGECO)

JAMILSEN DE FREITAS SANTOS

CAFÉ CARBONO NEUTRO:
Análises Econômicas Prospectivas para a Lavoura

Brasília, DF

2026

JAMILSEN DE FREITAS SANTOS

CAFÉ CARBONO NEUTRO:
Análises Econômicas Prospectivas para a Lavoura

Tese submetida ao Programa de Pós-Graduação em Economia da Faculdade de Economia, Administração, Contabilidade e Gestão de Políticas Públicas, da Universidade de Brasília (UnB), como requisito parcial para a obtenção do título de Doutor em Economia.

Orientador: Prof. Dr. Jorge Madeira Nogueira

Co-orientador: Prof. Dr. Marcelo de Oliveira Torres

Área de Concentração: Economia Política, Desenvolvimento e Meio Ambiente.

Linha de Pesquisa: Economia e Política do Meio Ambiente e da Agricultura.

Brasília, DF

2026

FICHA CATALOGRÁFICA

--

JAMILSEN DE FREITAS SANTOS

CAFÉ CARBONO NEUTRO: Análises Econômicas Prospectivas para a Lavoura

Tese submetida ao Programa de Pós-Graduação em Economia da Faculdade de Economia, Administração, Contabilidade e Gestão de Políticas Públicas, da Universidade de Brasília (UnB), como requisito parcial para a obtenção do título de Doutor em Economia.

COMISSÃO JULGADORA:

Prof. Dr. Jorge Madeira Nogueira

Programa de Pós-graduação em Economia (PPGECO/UnB)

(Presidente da Banca)

Prof. Dr. Pedro Henrique Zuchi da Conceição

Programa de Pós-graduação em Economia (PPGECO/UnB)

(Membro Interno)

Dr. Anísio José Diniz

Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa)

(Membro Externo)

Prof. Dr. Carlos Eduardo Menezes da Silva

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Pernambuco (IFPE)

(Membro Externo)

Brasília, DF, 28 de maio de 2026.

Aos meus pais,
Clovis (*in memoriam*) e Penha.
Às minhas filhas,
Liz e Luna.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pela saúde e pelas condições que tornaram possível a realização deste trabalho.

À minha mãe, Penha, agradeço pelo apoio constante e pela presença fundamental durante o doutorado e ao longo de toda a minha vida. Ao meu pai, Clovis (*in memoriam*), agradeço pelo esforço dedicado à minha preparação e formação. Às minhas filhas, Liz e Luna, agradeço pela inspiração permanente.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Jorge Madeira Nogueira, agradeço pela acolhida desde os primeiros contatos na universidade, ainda antes do meu ingresso no doutorado, pela confiança depositada e pela orientação ao longo de todo o trabalho. Ao coorientador, Prof. Dr. Marcelo de Oliveira Torres, registro minha gratidão pelas contribuições qualificadas e pelo apoio em etapas estratégicas do estudo.

Aos colegas com quem dividi as disciplinas do curso, agradeço pelos debates, pelas trocas de ideias e por toda a solidariedade durante essa etapa acadêmica.

Sou grato ao Departamento de Economia da Universidade de Brasília e estendo meus agradecimentos a todos os docentes e técnicos, cuja atuação assegura a qualidade das atividades de ensino e pesquisa.

À Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa), agradeço pelo apoio institucional no âmbito de seu programa de pós-graduação. De modo particular, registro agradecimento ao meu conselheiro acadêmico e colega Anísio José Diniz, bem como aos colegas Lucas Tadeu Ferreira, Antonio Fernando Guerra, Omar Cruz Rocha e demais colegas da Embrapa Café, pelos incentivos ao longo dessa jornada acadêmica.

DECLARAÇÃO DE TRANSPARÊNCIA E USO DE INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL

Em observância aos princípios de integridade científica, ética na pesquisa e em estrita conformidade com as diretrizes estabelecidas pela Portaria CNPq nº 2.664/2026, eu, Jamilsen de Freitas Santos, autor da tese de doutorado intitulada "CAFÉ CARBONO NEUTRO: Análises Econômicas Prospectivas para a Lavoura", declaro que utilizei ferramentas de Inteligência Artificial (IA) generativa como suporte técnico, operacional e linguístico em etapas específicas do desenvolvimento deste trabalho.

Garantindo a transparência exigida pela comunidade acadêmica e pelas agências de fomento, as ferramentas, etapas e respectivas finalidades são detalhadas a seguir:

Quadro 1 - Detalhamento do uso de ferramentas de IA.

Ferramenta	Etapas do trabalho	Finalidade e escopo de atuação
Gemini (Google) OpenAI (ChatGPT) Deepseek	Análise de Dados e Programação	Consulta e esclarecimento de dúvidas técnicas pontuais sobre a sintaxe de códigos no software Stata 17, visando à correta execução e otimização das análises estatísticas.
Gemini (Google) OpenAI (ChatGPT) Deepseek	Metodologia e Desenho Experimental	Suporte na revisão lógica e no mapeamento de lacunas (gaps) em testes estatísticos, auxiliando na verificação de consistência dos modelos aplicados.
NotebookLM (Google), OpenAI (ChatGPT)	Revisão Textual	Revisão gramatical, ortográfica e aprimoramento da coesão e coerência dos parágrafos originalmente redigidos pelo autor.
NotebookLM (Google), OpenAI (ChatGPT)	Formatação Acadêmica	Auxílio na adequação e padronização das referências bibliográficas e estrutura textual de acordo com as normas da ABNT.

Fonte: elaboração própria, com base nos registros de utilização de ferramentas de inteligência artificial durante a elaboração da tese.

Para fins de direito e validação perante a banca examinadora e instâncias de avaliação, cumpre destacar que:

- **Autoria Intelectual:** A concepção teórica, a escolha das variáveis, a interpretação crítica dos resultados econômicos/estatísticos e a redação original de todo o texto foram realizadas integralmente por mim. Nenhuma ferramenta de IA foi utilizada para substituir o pensamento crítico ou a autoria intelectual da pesquisa.
- **Isonomia de Alucinações:** Todos os outputs gerados pelas ferramentas de IA (sejam códigos do Stata, sugestões de testes ou correções textuais) foram rigorosamente

checados, testados, validados e revisados manualmente, mitigando qualquer risco de viés ou erro técnico.

- Proteção de Dados: Não foram inseridos dados brutos confidenciais, dados pessoais de terceiros ou informações sensíveis não publicadas nas plataformas de IA utilizadas.
- Responsabilidade Final: Em concordância com a Portaria CNPq nº 2.664/2026, assumo total e exclusiva responsabilidade pelo conteúdo final desta tese, eximindo as ferramentas utilizadas de qualquer nexo de coautoria.

Brasília, DF, 28 de maio de 2026.

Jamilsen de Freitas Santos

Doutorando do Programa de Pós-Graduação em Economia da FACE

Universidade de Brasília (UnB)

RESUMO

Esta tese investiga, sob a perspectiva da economia ambiental aplicada, a viabilidade econômica, a efetividade ambiental e os efeitos distributivos de instrumentos regulados e voluntários de mitigação de gases de efeito estufa (GEE) na cafeicultura brasileira. Partindo da premissa de que a transição para uma agricultura de baixa emissão depende não apenas do potencial técnico de mitigação, mas da arquitetura institucional dos incentivos econômicos, o estudo busca responder sob quais condições instrumentos de precificação de carbono e mecanismos de rotulagem ambiental são capazes de induzir, de forma economicamente racional para o produtor e ambientalmente efetiva em nível agregado, a redução de emissões no setor cafeeiro. A estratégia metodológica combina múltiplos níveis analíticos. Inicialmente, realiza-se diagnóstico do ambiente tecnológico de mitigação na agropecuária por meio de análise de patentes, marcas e produção científica. Em seguida, desenvolve-se modelo microeconômico de decisão do produtor para avaliar a inserção da cafeicultura em mercado regulado de carbono, estimando preço de equilíbrio, escala mínima viável e nível ótimo de oferta de créditos, considerando custos fixos de certificação, custos de transação e incerteza quanto ao preço do carbono. Simulações estocásticas de preços e projeções de custos permitem avaliar diferentes cenários de viabilidade. A tese também examina os efeitos regionais da política, utilizando dados municipais para identificar possíveis impactos distributivos decorrentes da exigência de escala mínima e da presença de custos fixos elevados. Complementarmente, analisa instrumentos voluntários de rotulagem ambiental, estimando o prêmio de preço associado à diferenciação do produto por meio de técnicas econométricas como *Propensity Score Matching* (PSM) e Diferenças em Diferenças (DiD), aplicadas a dados municipais. Os resultados indicam que, sob mercado regulado, a viabilidade econômica depende fortemente do preço do crédito de carbono e da diluição dos custos fixos, o que tende a favorecer produtores de maior escala, gerando potenciais assimetrias regionais. Em contraste, instrumentos voluntários baseados em rotulagem apresentam menor dependência de escala de área mínima de lavoura, podendo ampliar a participação de produtores de menor porte, ainda que sujeitos à volatilidade do prêmio de mercado e à credibilidade institucional do selo. Conclui-se que a efetividade climática da cafeicultura brasileira está condicionada à compatibilidade entre incentivos econômicos, estrutura produtiva e desenho regulatório. Instrumentos mal calibrados podem ampliar desigualdades regionais, enquanto arranjos institucionais adequados podem transformar a mitigação em oportunidade de agregação de valor e desenvolvimento territorial. Ao integrar modelagem microeconômica, análise distributiva e avaliação prospectiva de políticas, esta tese contribui para o debate sobre transição ecológica e desenho de instrumentos econômicos no meio rural brasileiro.

Palavras-chave: Café carbono neutro. Mercado regulado de carbono. Rotulagem ambiental. Mitigação de gases de efeito estufa. Agricultura de baixa emissão.

ABSTRACT

This dissertation investigates, from an applied environmental economics perspective, the economic feasibility, environmental effectiveness, and distributive impacts of regulated and voluntary greenhouse gas (GHG) mitigation instruments in Brazilian coffee production. Grounded on the premise that the transition toward low-emission agriculture depends not only on technical mitigation potential but also on the institutional architecture of economic incentives, the study examines under which conditions carbon pricing mechanisms and environmental labeling instruments can induce economically rational behavior at the producer level while achieving aggregate environmental effectiveness in the coffee sector. The methodological strategy integrates multiple analytical levels. First, the technological environment of agricultural mitigation is assessed through patent analysis, trademark data, and bibliometric evidence, identifying patterns of innovation related to emissions reduction. Second, a microeconomic model of producer decision-making is developed to evaluate the potential insertion of coffee farming into a regulated carbon market. The model estimates the break-even price, minimum viable scale, and profit-maximizing level of carbon credit supply, incorporating fixed certification costs, transaction costs, and price uncertainty. Stochastic price simulations and cost projections are employed to assess alternative feasibility scenarios. The dissertation also examines the regional distributive effects of carbon market participation using municipal-level data. The analysis identifies potential asymmetries associated with minimum scale requirements and high fixed costs, which may favor larger producers and regions with greater structural advantages. In parallel, voluntary environmental labeling instruments are evaluated by estimating the price premium associated with product differentiation. Econometric techniques, including Propensity Score Matching (PSM) and Difference-in-Differences (DiD), are applied to municipal data to measure revenue impacts linked to sustainable certification. The results indicate that, under a regulated carbon market, economic viability is highly sensitive to carbon credit prices and the dilution of fixed certification costs, creating potential entry barriers and regional inequalities. In contrast, voluntary labeling instruments exhibit lower dependence on minimum physical scale, potentially expanding participation among smaller producers, although they remain subject to price premium volatility and institutional credibility constraints. The study concludes that the climate effectiveness of Brazilian coffee production is contingent upon the alignment between economic incentives, production structure, and regulatory design. Poorly calibrated instruments may exacerbate regional disparities, whereas well-designed institutional arrangements can transform climate mitigation into an opportunity for value addition and territorial development. By integrating microeconomic modeling, distributive analysis, and prospective policy evaluation, this dissertation contributes to the debate on ecological transition and the design of economic instruments in rural development contexts.

Keywords: Carbon-neutral coffee. Regulated carbon market. Environmental labeling. Greenhouse gas mitigation. Low-emission agriculture.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Patentes para redução de GEE na agropecuária (1983-2022).....	78
Figura 2 - Número de publicações e citações de trabalhos acadêmicos sobre redução de emissões de GEE no setor agropecuário (1990-2022).....	79
Figura 3 - Custos e receitas de créditos de carbono em uma propriedade com 200 hectares de café no cenário Custos 2 x Cotação 2.....	90
Figura 4 - Cartograma dos municípios em concentrações urbanas classificados por PIB a preços correntes (mil Reais), ano-base 2020	98
Figura 5 - Cartograma dos municípios com área de lavouras de café no Brasil com 50 pés e mais, ano-base	99
Figura 6 - Cartograma dos municípios com lavouras de café no Brasil, classificados por número de propriedade com 100 hectares ou mais, ano-base 2017	100

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Definição de variáveis e parâmetros do modelo	47
Tabela 2 - Resumo da condição de otimalidade e interpretação econômica	53
Tabela 3 - Estatísticas descritivas das variáveis de análise (amostra não pareada).....	62
Tabela 4 - Variáveis e parâmetros do modelo de rotulagem	67
Tabela 5 - Registros de marcas: carbono neutro / baixo carbono.....	80
Tabela 6 - Projeções de custos e de cotações de crédito de carbono	88
Tabela 7 - Cenários com áreas mínimas de viabilidade do comércio de créditos de carbono na cafeicultura	89
Tabela 8 - Comparação do PIB <i>per capita</i> entre municípios urbanos e cafeeiros	101
Tabela 9 - Cálculo da área mínima viável de projeto (A_{min}).....	112
Tabela 10 - Modelo logit para o escore de propensão	132
Tabela 11 - Indicadores de balanceamento antes e após o pareamento.....	133
Tabela 12 - Efeito médio do tratamento (ATT) sobre o log do faturamento	134
Tabela 13 - Análise de sensibilidade (sensatt) para log_faturmedio	135
Tabela 14 - Resultados da regressão de DiD para o log do faturamento.....	135
Tabela 15 - Resultados da regressão por Mínimos Quadrados Ordinários (MQO) para o logaritmo da receita por tonelada	139
Tabela 16 - Teste de balanceamento das covariáveis (antes e depois do pareamento – modelo PSM_AEI)	140
Tabela 17 - Efeito médio do tratamento sobre os tratados (ATT) – impacto da cafeicultura de base ecológica na receita por tonelada	141
Tabela 18 - Resultados do modelo de dados em painel (efeitos fixos de ano).....	142
Tabela 19 - Resumo da condição de otimalidade e solução para q^*	148
Tabela 20 - Estimativa da quantidade mínima viável (q_{min}) e área produtiva correspondente para adoção da rotulagem	152
Tabela 21 - Metas quantitativas do Plano ABC+ (2020-2030) por tecnologia	157
Tabela 22 - Potencial nacional de mitigação, área de conversão e receita da cafeicultura de baixo carbono sob diferentes cenários de viabilidade	159
Tabela 23 - Área potencial de adoção de boas práticas que reduzem emissão de GEE por município em faixas de área a partir de 10, 50, 100 e 200 hectares	161
Tabela 24 - Quantidade redução de GEE por municípios em faixas de área a partir de 10, 50, 100 e 200 hectares	162
Tabela 25 - Distribuição do número de estabelecimentos por faixa de área – Censo Agropecuário do IBGE de 2017	186
Tabela 26 - Detalhamento dos custos fixo e variáveis	187
Tabela 27 - Emissões de GEE na cafeicultura.....	188
Tabela 28 - Regiões Intermediárias – percentual de estabelecimentos acima de cada faixa de área, estado, bioma e área potencial nas faixas a partir de 50 e 200 hectares	189
Tabela 29 - Regiões Intermediárias – quantidade de redução de GEE e faturamento de créditos potenciais por faixas área a partir de 50 e 200 hectares.....	190
Tabela 30 - Municípios – percentual de estabelecimentos acima de cada faixa de área, estado, bioma área potencial nas faixas a partir de 50 e 200 hectares.....	190
Tabela 31 - Municípios – quantidade redução de GEE e faturamento de créditos potenciais por faixas de área a partir de 50 e 200 hectares.....	191
Tabela 32 - Comparação do PIB <i>per capita</i> entre municípios com menos e mais de 30% de grandes propriedades	193
Tabela 33 - Resultados do modelo logit para o escore de propensão.....	216

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Detalhamento do uso de ferramentas de IA.	14
Quadro 2 - Lista de artigos que deram origem aos capítulos da tese.	20

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABIC	Associação Brasileira da Indústria de Café
ATT	Efeito Médio do Tratamento sobre os Tratados (<i>Average Treatment Effect on the Treated</i>)
BACEN	Banco Central do Brasil
CDPC	Conselho Deliberativo da Política do Café
CECAFÉ	Conselho dos Exportadores de Café do Brasil
CEPEA	Centro de Estudos Avançados em Economia Aplicada
CMg	Custo Marginal
CMeT	Custo Total Médio
CONAB	Companhia Nacional de Abastecimento
COP	Conferência das Partes (<i>Conference of the Parties</i>)
CPC	Classificação Cooperativa de Patentes (<i>Cooperative Patent Classification</i>)
CSP	<i>Conservation Stewardship Program</i> (EUA)
DiD	Diferenças em Diferenças (<i>Differences-in-Differences</i>)
EBC	<i>European Biochar Certificate</i>
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
EPO	<i>European Patent Office</i>
ESALQ	Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz" (USP)
EU ETS	Sistema de Comércio de Emissões da União Europeia (<i>European Union Emissions Trading System</i>)
FAO	Organização das Nações Unidas para a Alimentação e a Agricultura (<i>Food and Agriculture Organization</i>)
GEE	Gases de Efeito Estufa
GHG	Greenhouse gas
ha	hectare
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
ICE	<i>Intercontinental Exchange</i>
IG	Indicação Geográfica
ILPF	Integração Lavoura-Pecuária-Floresta
INPI	Instituto Nacional da Propriedade Industrial
IPCC	Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (<i>Intergovernmental Panel on Climate Change</i>)
IP	Identidade Preservada (<i>Preserved Identity</i>)
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
MQO	Mínimos Quadrados Ordinários (OLS)
MRV	Mensuração, Relato e Verificação
NDC	Contribuição Nacionalmente Determinada (<i>Nationally Determined Contribution</i>)
OCB	Organização das Cooperativas Brasileiras
OCDE	Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico (OECD)
OLS	<i>Ordinary Least Squares</i> (Mínimos Quadrados Ordinários)
OMM	Organização Meteorológica Mundial
OMPI	Organização Mundial da Propriedade Intelectual (WIPO)
PAC	Política Agrícola Comum (União Europeia)
PAS	<i>Publicly Available Specification</i> (BSI)
PIB	Produto Interno Bruto
PNUMA	Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (UNEP)

PNMC	Política Nacional sobre Mudança do Clima
PNP&D/Café	Programa de Pesquisa e Desenvolvimento do Café
PROAGRO	Programa de Garantia da Atividade Agropecuária
PSM	<i>Propensity Score Matching</i> (Pareamento por Escore de Propensão)
R\$	Real (moeda brasileira)
SBCE	Sistema Brasileiro de Comércio de Emissões
SEEG	Sistema de Estimativas de Emissões de Gases de Efeito Estufa
SICOR	Sistema de Informações de Crédito Rural (BACEN)
SIDRA	Sistema IBGE de Recuperação Automática
SIN-ABC	Sistema Integrado de Informações do Plano Setorial para Consolidação de uma Economia de Baixa Emissão de Carbono na Agricultura
SPD	Sistema de Plantio Direto
tCO ₂ eq	tonelada de dióxido de carbono equivalente
UNFCCC	Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima (<i>United Nations Framework Convention on Climate Change</i>)
USDA	<i>United States Department of Agriculture</i>
USPTO	<i>United States Patent and Trademark Office</i>

LISTA DE VARIÁVEIS E PARÂMETROS

q	Quantidade produzida (créditos de carbono ou café, conforme o modelo).
P	Preço de mercado do produto (crédito de carbono ou café).
$RT(q)$	Receita Total como função da quantidade produzida.
$CT(q)$	Custo Total como função da quantidade produzida.
$\pi(q)$	Lucro econômico da firma agrícola.
$CMeT(q)$	Custo Total Médio (CT/q).
$CMg(q)$	Custo Marginal (derivada do custo total em relação à quantidade).
CF	Custos Fixos (certificação, monitoramento e adequação inicial).
$CV(q)$	Custos Variáveis associados à produção ou geração de créditos.
q^*	Quantidade ótima que maximiza o lucro (condição $P = CMg$).
q_{min}	Quantidade mínima viável (ponto de equilíbrio onde $P = CMeT$).
A	Área cultivada (hectares).
A_{min}	Área mínima economicamente viável.
E	Emissões de GEE (tCO_2eq).
ΔE	Redução certificável de emissões.
θ	Produtividade de geração de créditos de carbono por hectare.
p_c	Preço do crédito de carbono.
R_c	Receita proveniente da venda de créditos de carbono.
p_k	Preço do café convencional.
p_v	Preço do café com rotulagem (produto diferenciado).
α	Prêmio percentual associado à rotulagem ambiental.
R_a	Receita adicional esperada da rotulagem.
σ_p	Variância ou incerteza associada ao preço.
δ	Fator de desconto intertemporal.
τ	Custos de transação (MRV, negociação e governança).
Y_i	Variável de resultado observada para a unidade i .
D_i	Indicador de tratamento (1 = tratado; 0 = controle).
X_i	Vetor de covariáveis observáveis.
$p(X_i)$	Escore de propensão estimado no modelo PSM.
ATT	Efeito Médio do Tratamento sobre os Tratados.
Y_{it}	Variável dependente em painel (município i no tempo t).
T_t	Indicador temporal (pré e pós-tratamento).
β_{DiD}	Estimador de Diferenças-em-Diferenças.
μ_i	Efeito fixo individual.
λ_t	Efeito fixo temporal.
ε_{it}	Termo de erro idiossincrático.
γ	Parâmetro de elasticidade ou sensibilidade da receita ao prêmio.
ρ	Parâmetro associado à aversão ao risco do produtor.
Ω	Conjunto de condições institucionais e regulatórias do mercado.
Φ	Potencial agregado de mitigação.
N	Número de estabelecimentos produtores.
s	Escala produtiva do estabelecimento.

NOTA SOBRE A ORIGEM DOS CAPÍTULOS

Esta tese adota o formato de compilação de artigos científicos integrados, cujos capítulos foram adaptados de trabalhos publicados ou manuscritos finalizados e reorganizados para assegurar unidade metodológica e coerência analítica. A seguir, apresenta-se a situação editorial correspondente a cada capítulo:

Quadro 2 - Lista de artigos que deram origem aos capítulos da tese.

Capítulo	Referência	Veículo	Status editorial
3	Santos, Santos & Diniz (2024)	Inova 2024	Publicado em anais
4	Santos & Nogueira (2025)	Revista Economia Ensaios	Publicado
5	Santos & Nogueira (2025a)	Revista Geo	Publicado
6	Santos, Nogueira & Torres (2026)	—	Manuscrito finalizado
7	Santos, Nogueira & Torres (2025)	ENGEMA 2025	Publicado em anais
8	Santos, Nogueira & Torres (2026a)	—	Manuscrito finalizado
9	Santos, Nogueira & Torres (2026b)	—	Manuscrito finalizado
10	Santos & Nogueira (2025b)	RP3	Publicado

Fonte: elaboração própria, com base nos artigos e manuscritos que compõem esta tese.

Os capítulos reproduzem, com as devidas adaptações formais, versões desses trabalhos. Foram realizados ajustes de padronização (numeração de seções, uniformização de referências, remissões internas e adequação terminológica), bem como revisões pontuais de redação, com o objetivo de assegurar coesão argumentativa e unidade estrutural ao conjunto da tese.

As seções metodológicas específicas de cada artigo foram consolidadas no Capítulo 2, a fim de evitar redundâncias e garantir maior consistência analítica. As introduções e conclusões individuais também foram editadas para explicitar as conexões entre os estudos e reforçar o encadeamento lógico do argumento central. A organização adotada preserva a autonomia científica de cada investigação, ao mesmo tempo em que assegura integração temática e coerência analítica ao trabalho como um todo.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	20
1.1	PROBLEMATIZAÇÃO, HIPÓTESES E EIXOS ANALÍTICOS.....	24
2	MÉTODOS E PROCEDIMENTOS CONSOLIDADOS.....	29
2.1	TECNOLOGIA PARA REDUÇÃO DE GEE NA AGROPECUÁRIA	30
2.1.1	Patentes	31
2.1.2	Marcas	31
2.1.3	Bibliometria	32
2.2	AVALIAÇÃO DE VIABILIDADE ECONÔMICA	33
2.2.1	Preço de equilíbrio: produção é lucrativa a partir de que nível?.....	34
2.2.2	Maximização do lucro: qual nível de produção resulta em lucro máximo?	35
2.2.3	Projeções dos benefícios	36
2.2.4	Projeções de Custos	39
2.3	ANÁLISE DOS IMPACTOS REGIONAIS	42
2.4	MODELO ECONÔMICO – AGRICULTOR – CRÉDITO DE CARBONO	47
2.4.1	A função de receita sob incerteza de preço.....	48
2.4.2	A função de custo: componentes fixos e variáveis	49
2.4.2.1	Custos fixos totais Cf	49
2.4.2.2	Custos variáveis lineares Cv	50
2.4.2.3	As funções de Custo Total e Marginal	50
2.4.3	O problema de otimização do produtor e a solução ótima	51
2.4.3.1	A função de lucro esperado	51
2.4.3.2	Derivação e interpretação da área ótima (A^*)	52
2.5	FATURAMENTO DA CAFEICULTURA ORGÂNICA EM NÍVEL MUNICIPAL	53
2.5.1	Fonte de dados e variáveis	53
2.5.2	Propensity Score Matching (PSM) para o Efeito Médio.....	54
2.5.3	Diferenças em Diferenças (DiD) para a Análise Dinâmica	57
2.6	EXPECTATIVA DE RECEITA ADICIONAL DA ROTULAGEM	59
2.6.1	Fonte de Dados e Construção da Amostra Analítica.....	60
2.6.2	Estratégia de Identificação: O Método PSM.....	63
2.6.3	Estratégia de Identificação: Dados em Painel.....	65
2.7	MODELO ECONÔMICO DE DECISÃO DO PRODUTOR – ROTULAGEM.....	66
2.7.1	A Função de Receita Adicional.....	67
2.7.2	A Estrutura de Custos	68
2.7.3	A Função de Lucro Esperado	68
2.7.4	Derivação e Interpretação da Quantidade Ótima (q^*)	69
2.7.5	O Limiar de Viabilidade: A Barreira de Escala	69
2.8	POTENCIAL DA AGRICULTURA PARA REDUÇÕES DE GEE.....	70
2.8.1	Fundamentos da Modelagem e Fontes de Dados	71
2.8.2	Construção dos Cenários de Viabilidade Econômica	73
2.8.3	Escopo da Análise e Níveis de Agregação Geográfica	74
3	AMBIENTE TECNOLÓGICO PARA REDUÇÃO DE GEE NA AGROPECUÁRIA....	75

3.1	RESULTADOS E DISCUSSÃO	77
3.2	CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO.....	81
PARTE 1: MERCADO REGULADO DE CARBONO		82
4	AVALIAÇÃO DE VIABILIDADE ECONÔMICA.....	84
4.1	ASPECTOS TEÓRICOS DO SISTEMA DE LICENÇAS NEGOCIÁVEIS	85
4.2	ANÁLISE PROSPECTIVA DE VIABILIDADE.....	87
4.3	DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	92
4.4	CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO.....	94
5	EFEITOS SOBRE AS DISPARIDADES REGIONAIS	95
5.1	ASPECTOS TEÓRICOS DA POLÍTICA REGIONAL	96
5.2	REPRESENTAÇÃO ESPACIAL POR CARTOGRAMAS.....	98
5.3	COMPARAÇÕES QUANTITATIVAS.....	100
5.3.1	Municípios em concentrações urbanas e municípios com lavouras de café	101
5.3.2	Grupos de municípios por faixas percentuais de grandes propriedades.....	102
5.4	IMPLICAÇÕES DOS RESULTADOS OBTIDOS	104
5.5	CONCLUSÕES DO CAPÍTULO	106
6	CRÉDITOS DE CARBONO: MODELO DE DECISÃO DO AGRICULTOR	108
6.1	ANÁLISE DE VIABILIDADE ECONÔMICA NO MODELO LINEAR.....	110
6.1.1	O limiar de viabilidade.....	110
6.1.2	A "barreira de escala" – um estudo de caso	111
6.1.3	Os limites da neutralidade ao risco	113
6.2	EXTENSÃO DO MODELO: NÃO-LINEARIDADE	116
6.2.1	Rendimentos Decrescentes e Custos Marginais Crescentes.....	116
6.2.2	A Solução Ótima Interior.....	117
6.2.3	Aplicação Numérica - modelo não-linear	118
6.2.4	Implicações para a Política e a Estrutura de Mercado	120
6.3	CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO.....	121
6.3.1	Limitações do Modelo e Direções para Pesquisas Futuras	122
6.3.2	Implicações Políticas e Recomendações.....	123
PARTE 2: ROTULAGEM CARBONO NEUTRO		124
7	A DINÂMICA DO PRÊMIO VERDE	126
7.1	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	128
7.1.1	A Rotulagem como Instrumento Voluntário de Política Ambiental.....	128
7.1.2	Evidências Empíricas sobre o Prêmio de Preço para Cafés Certificados	130
7.2	RESULTADOS E DISCUSSÃO	132
7.2.1	O Efeito Médio: Um Prêmio de 14,7%	132
7.2.1.1	Qualidade do Pareamento e Suporte Comum.....	133
7.2.1.2	Efeito Médio do Tratamento sobre os Tratados (ATT).....	134
7.2.1.3	Análise de Sensibilidade a Fatores Não Observados	134

7.2.2	A Dinâmica Temporal: Teste de Erosão do Prêmio	135
7.3	CONCLUSÕES DO CAPÍTULO	136
8	IMPACTO DA ROTULAGEM NO FATURAMENTO DA CAFEICULTURA.....	138
8.1	ANÁLISE PRELIMINAR E A EVIDÊNCIA DO VIÉS DE SELEÇÃO	139
8.2	RESULTADOS DA ESTIMAÇÃO POR PSM	140
8.3	ANÁLISE DE ROBUSTEZ VIA DADOS EM PAINEL	141
8.4	DISCUSSÃO DOS RESULTADOS E LIMITAÇÕES	142
8.5	CONCLUSÕES DO CAPÍTULO	144
9	ROTULAGEM: MODELO ECONÔMICO DE DECISÃO DO CAFEICULTOR.....	146
9.1	A LÓGICA DO MODELO ECONÔMICO	147
9.2	A NATUREZA COMPOSTA DO RISCO	149
9.3	SIMULAÇÃO DA BARREIRA DE ENTRADA.....	150
9.4	EXTENSÃO DO MODELO: NÃO-LINEARIDADE	152
9.5	CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO.....	154
9.5.1	Implicações Políticas e Recomendações.....	155
10	O POTENCIAL DA CAFEICULTURA PARA A REDUÇÃO DE GEE	156
10.1	CUSTOS DE TRANSAÇÃO E A BARREIRA DA ESCALA	157
10.2	POTENCIAL DE MITIGAÇÃO DA CAFEICULTURA: RESULTADOS	159
10.2.1	Potencial Agregado Nacional.....	159
10.2.2	Impactos Assimétricos em Nível Municipal	161
10.2.3	Implicações e Recomendação de Política.....	164
10.3	CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO.....	165
11	CONCLUSÕES GERAIS, LIMITAÇÕES E AGENDA DE PESQUISA.....	167
11.1	CONTRIBUIÇÕES DA TESE.....	169
11.2	LIMITAÇÕES DO ESTUDO	170
11.3	AGENDA DE PESQUISA.....	172
11.4	CONSIDERAÇÕES FINAIS	172
12	REFERÊNCIAS	174
	APÊNDICE 1 – NÚMERO DE ESTABELECIMENTOS POR FAIXA DE ÁREA.....	186
	APÊNDICE 2 – DETALHAMENTO DE CUSTOS.....	187
	APÊNDICE 3 – EMISSÕES NA CAFEICULTURA.....	188
	APÊNDICE 4 – ANÁLISES REGIONAIS COMPLEMENTARES.....	189
	APÊNDICE 5 – REPLICAÇÃO DOS RESULTADOS DO CAPÍTULO 5.....	194
	APÊNDICE 6 – REPLICAÇÃO DOS RESULTADOS DO CAPÍTULO 7.....	203
	APÊNDICE 7 – DETALHAMENTO METODOLÓGICO DO CAPÍTULO 8	215
	APÊNDICE 8 – REPLICAÇÃO DOS RESULTADOS DO CAPÍTULO 8.....	218

1 INTRODUÇÃO

O debate contemporâneo sobre as mudanças climáticas encontra-se, não raramente, imerso em um cenário de controvérsias e interpretações divergentes. Embora o consenso científico aponte para a urgência do tema, a coexistência de visões díspares entre a academia, a esfera política e a sociedade civil muitas vezes gera uma percepção de incerteza intelectual. Enquanto cientistas alertam para as consequências críticas da elevação da temperatura global, o debate político frequentemente tensiona esses dados contra custos financeiros imediatos. Para o cidadão comum, essa dissonância é confrontada pela percepção prática de eventos climáticos extremos e padrões sazonais alterados, que desafiam a experiência histórica acumulada ao longo de gerações.

Motivadas pelo princípio da precaução, no qual a ação preventiva tende a gerar benefícios líquidos maiores do que a não-ação em situações de incertezas, nações negociam alternativas que permitam reduzir as (potenciais, para alguns, e reais, para outros) consequências negativas do aumento da temperatura média do planeta. Em termos históricos, o debate global sobre as mudanças climáticas ganhou uma base científica sólida em 1988, com a Conferência de Toronto e a criação do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC) pelo Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (Pnuma) e pela Organização Meteorológica Mundial (OMM).

O IPCC tem o objetivo de fornecer aos formuladores de políticas avaliações científicas regulares do estado atual de conhecimento sobre mudanças climáticas (IPCC, 2024). Isso ocorre por meio de seus relatórios de avaliação e metodológicos, além de outras publicações, com revisão abrangente e recomendações com relação ao estado de conhecimento das mudanças climáticas, seu impacto social e econômico e estratégias para minimizar (mitigar, no jargão técnico) o efeito do homem nas mudanças climáticas (IPCC, 2023).

Esse esforço científico foi fundamental para embasar acordos importantes, celebração de compromissos e protocolos internacionais, tais como o Protocolo de Quioto, em 1997, o Acordo de Paris, em 2015 e Acordo de Glasgow, em 2021. Em particular, o Protocolo de Quioto estabeleceu a limitação e redução de emissões de gases de efeito estufa (GEE) pelas partes signatárias, por meio de políticas e medidas de acordo para promover “formas sustentáveis de agricultura à luz das considerações sobre a mudança do clima” e “pesquisa, a promoção, o desenvolvimento e o aumento do uso de (...) tecnologias de sequestro de dióxido de carbono e de tecnologias ambientalmente seguras, que sejam avançadas e inovadoras”, conforme sua promulgação pelo Decreto nº 5.445/2005 (BRASIL, 2005).

Por sua vez, o Acordo de Paris foi assinado em 2015 e tem como objetivo principal não permitir que o planeta se aqueça além de 1,5°C até o final do século 21. Nele, cada país signatário estabeleceu metas de redução de emissão de GEE, chamadas de Contribuição Nacionalmente Determinada (NDC, na sigla em inglês). Cada um dos países signatários teve cinco anos para desenvolver e apresentar suas NDCs, entre 2015 e 2020.

Como continuidade desse esforço em nível mundial, a 26ª Conferência das Partes – COP26 em novembro de 2021, aprovou o Acordo de Glasgow com avanços significativos para implementação do mercado de carbono, de acordo com Amaral e Pinto (2021), o que permitiu que ações de preservação e tecnologias limpas passassem a ter um valor econômico real e rastreável. Nos anos seguintes, as conferências no Egito (COP27) e em Dubai (COP28) focaram na operacionalização do financiamento climático e no compromisso global de transição dos combustíveis fósseis para outras formas de energia, visando o balanço líquido zero até 2050.

Atualmente, esse processo histórico consolidou-se com a realização da COP30 em Belém, ocorrida em novembro de 2025, que representou um marco relevante ao reforçar o protagonismo do Brasil e da Amazônia nas negociações internacionais. Esse evento marcou a confirmação de soluções baseadas na natureza como prioridade e estabeleceu orientações para que setores estratégicos sigam métricas rigorosas de sustentabilidade. O que começou como uma preocupação técnica e científica nos anos 80 evoluiu para um sistema de governança global progressivamente institucionalizado, onde a preservação ambiental, a viabilidade econômica e o mercado de carbono estão totalmente conectados, influenciando progressivamente regras de produção e comercialização no mercado internacional.

No caso específico do Brasil, o país se comprometeu a reduzir as suas emissões de gases de efeito estufa em 59% a 67% até 2035, em relação às emissões de 2005. Além disso, em 2024, o Brasil reiterou seu compromisso de alcançar emissões líquidas neutras até 2050, ou seja, tudo que o país emitir deverá ser compensado com fontes de captura de carbono, como plantio de florestas, recuperação de biomas ou outras tecnologias (Brasil, 2024).

A agricultura tem um grande potencial para contribuir para essa compensação, especialmente por meio da captura de carbono no solo e em práticas agroflorestais (Smith *et al.*, 2014). Métodos de baixo custo como o plantio direto, uso de fertilizantes orgânicos, manejo sustentável de pastagens e sistemas agroflorestais podem reduzir as emissões de gases de efeito estufa ou sequestrar carbono.

Para atender aos compromissos assumidos pelo Brasil na Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima (UNFCCC na sigla em inglês), a Lei 12.187, de 29

de dezembro de 2009, instituiu a Política Nacional sobre Mudança do Clima – PNMC. Para auxiliar no alcance das metas de redução, a Lei estabelece o desenvolvimento de planos setoriais de mitigação e adaptação nos âmbitos local, regional e nacional. Os Planos Setoriais de Mitigação abrangem diversos setores que são listados na PNMC, inclusive o setor agropecuário.

Nesse contexto, destaca-se que, segundo dados da 13ª edição do Sistema de Estimativas de Emissões de Gases de Efeito Estufa (SEEG), de 2020 a 2024, o setor agropecuário foi responsável por aproximadamente 25% das emissões totais brasileiras de gases de efeito estufa, correspondendo a cerca de 610 milhões de toneladas de CO₂ equivalente, em média, por ano (OBSERVATÓRIO DO CLIMA, 2025). Para atuar na minimização desse impacto do setor agropecuário, deve-se ressaltar a edição do Decreto 10.606, de 22 de janeiro de 2021, que instituiu o Sistema Integrado de Informações do Plano Setorial para Consolidação de uma Economia de Baixa Emissão de Carbono na Agricultura – SIN-ABC, que é integrado pela Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária – Embrapa, entre outros órgãos e entidades (Brasil, 2021).

A agricultura ocupa uma posição central e paradoxal no debate sobre as mudanças climáticas globais. Por um lado, o setor é uma fonte expressiva de emissões de gases de efeito estufa (GEE), contribuindo por meio de processos intrínsecos à sua operação, como o manejo do solo, o uso de fertilizantes nitrogenados, a fermentação entérica em ruminantes e o cultivo de arroz em áreas inundadas. Por outro lado, o setor agrícola detém um potencial substancial para funcionar como um dreno de carbono, sequestrando dióxido de carbono CO₂ da atmosfera e armazenando-o de forma duradoura na biomassa das plantas e na matéria orgânica do solo (BIELUCZYK *et al.*, 2024).

Este potencial de mitigação abre uma nova fronteira econômica para os produtores rurais: a participação em mercados de carbono, sejam eles voluntários ou regulados. Através da adoção de práticas agrícolas sustentáveis, os agricultores podem transformar o serviço ecossistêmico de sequestro de carbono em um ativo financeiro negociável, conhecido como crédito de carbono. Práticas como o sistema de plantio direto (SPD), a integração lavoura-pecuária-floresta (ILPF) e a utilização de plantas de cobertura em entrelinhas de lavoura são amplamente reconhecidas por sua capacidade de aumentar os estoques de carbono no solo.

No entanto, a quantificação precisa desse potencial é um desafio complexo. O Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC) destaca que a eficácia do sequestro de carbono no solo varia enormemente, com uma faixa de potencial global estimada entre 0,4 e 8,6 gigatoneladas de CO₂ equivalente por ano (IPCC, 2022). Essa ampla variação reflete

incertezas científicas persistentes e uma forte dependência de fatores locais, como tipo de solo, clima, histórico de uso da terra e as práticas de manejo específicas implementadas. Essa variabilidade sublinha a necessidade de ferramentas analíticas que possam ser adaptadas a contextos específicos.

Especificamente em relação ao setor cafeeiro, o Conselho Deliberativo da Política do Café – CDPC, identificou o tema “Serviços ambientais relacionados às mudanças climáticas e sistemas de produção de café” como prioritário para o Programa de Pesquisa e Desenvolvimento do Café – PNP&D/Café (Embrapa, 2023). Fica evidenciada a importância da inserção da cafeicultura nas políticas de mitigação das mudanças climáticas.

Ademais, é relevante acrescentar que o Brasil é o maior produtor e exportador de café e segundo maior consumidor dessa bebida no mundo, com forte presença de agricultura familiar, elevada heterogeneidade regional e crescente inserção em mercados diferenciados. De acordo com Conab, Companhia Nacional de Abastecimento (2026), a safra de café do Brasil em 2026 foi estimada em 66,2 milhões de sacas de 60kg, em uma área de 1,93 milhão de hectares, com produtividade média de 34,2 sacas por hectare. Em termos monetários, o Valor Bruto da Produção do café de 2025 foi calculado em R\$ 114,83 bilhões (Brasil, 2026). Quanto aos cafeicultores, vale destacar que o País possui mais de 264 mil estabelecimentos produtores de café em 1.448 municípios, sendo que 78% dessas propriedades cafeeiras são consideradas da cafeicultura familiar (IBGE, 2019).

A estrutura produtiva do setor, caracterizada por dispersão territorial, diversidade tecnológica e predominância de pequenas propriedades, impõe desafios específicos à implementação de instrumentos de mitigação climática. Por um lado, o setor apresenta potencial de redução de emissões e geração de créditos de carbono; por outro, enfrenta restrições associadas a custos de transação, problemas de definição de direitos de propriedade e assimetrias informacionais, conforme discutido na tradição institucional inaugurada por Coase (1937) e desenvolvida por Williamson (1985).

A transição para uma agricultura de baixa emissão de gases de efeito estufa (GEE) é impulsionada pela sinergia entre o avanço tecnológico e o papel central das políticas públicas, que atuam como indutoras dessa mudança, priorizando a utilização de instrumentos regulados de mercado de carbono e mecanismos voluntários de diferenciação de mercado. Embora tais instrumentos não esgotem o espectro de possibilidades da política ambiental, são os que estão sendo efetivamente implementados na prática.

A literatura econômica demonstra que instrumentos de precificação ambiental tendem a promover eficiência alocativa ao estabelecer um preço para as emissões e induzir agentes

econômicos a internalizarem os custos ambientais em suas decisões produtivas, conforme desenvolvido na teoria moderna da política ambiental (Baumol e Oates, 1988). No contexto das mudanças climáticas, os mercados de permissões negociáveis constituem uma aplicação institucional desse arcabouço, ao permitir que a redução de emissões ocorra onde o custo marginal de abatimento é menor, promovendo eficiência estática e criando incentivos econômicos para a adoção e difusão de tecnologias de menor intensidade de carbono ao longo do tempo (Tietenberg, 2006; Stavins, 2008).

Contudo, seus efeitos distributivos dependem da interação com distorções pré-existentes na economia e da forma de implementação da política, podendo gerar impactos diferenciados entre agentes econômicos (Fullerton e Metcalf, 2002). Ademais, o desenho institucional e os mecanismos de governança condicionam a capacidade de tais instrumentos contribuírem para trajetórias de desenvolvimento mais inclusivas (Stiglitz, 2019). Paralelamente, instrumentos voluntários, como certificações e rotulagem ambiental, operam por meio de mecanismos de sinalização e diferenciação de atributos, podendo gerar prêmios de preço em mercados específicos (Caswell e Mojduszka, 1996).

Apesar do avanço da literatura internacional sobre precificação de carbono e mercados voluntários, observa-se uma lacuna relevante no contexto brasileiro, especialmente no que se refere à integração entre três dimensões analíticas: a dinâmica tecnológica associada à mitigação na agropecuária, os efeitos distributivos regionais da implementação de instrumentos regulados e a modelagem microeconômica da decisão do produtor diante de diferentes incentivos climáticos, considerando elementos típicos de decisão sob incerteza e irreversibilidade (Dixit e Pindyck, 1994).

Estudos existentes tendem a abordar essas dimensões de forma isolada ou concentrar-se em análises agregadas, sem considerar as especificidades estruturais de um setor agrícola concreto. No caso da cafeicultura brasileira, marcada por forte heterogeneidade regional e predominância de agricultura familiar, essa integração analítica torna-se particularmente necessária, uma vez que a eficácia ambiental de instrumentos climáticos pode divergir substancialmente de seus efeitos econômicos e distributivos. Assim, o desenho desses critérios pode alterar substancialmente tanto o potencial agregado de redução de emissões quanto a distribuição dos benefícios econômicos decorrentes da política.

1.1 PROBLEMATIZAÇÃO, HIPÓTESES E EIXOS ANALÍTICOS

A presente tese investiga, sob uma perspectiva econômica aplicada, a viabilidade, a efetividade e os efeitos distributivos de instrumentos regulados e voluntários de mitigação de

GEE na cafeicultura brasileira. Diante desse contexto, esta pesquisa busca responder à seguinte questão central: Sob quais condições econômicas, institucionais e distributivas instrumentos regulados de precificação de carbono e instrumentos voluntários de rotulagem ambiental são capazes de induzir, de forma economicamente racional e ambientalmente efetiva, a mitigação de emissões na cafeicultura brasileira?

De forma complementar, investigam-se quatro questões derivadas: (i) quais são as condições econômicas mínimas, em termos de preço, produtividade e estrutura de custos, que tornam viável a inserção da cafeicultura em instrumentos regulados de precificação de carbono; (ii) em que medida a existência de custos fixos e escala mínima de certificação gera efeitos distributivos regionais assimétricos; (iii) se instrumentos voluntários de rotulagem ambiental reduzem a barreira de entrada observada no mercado regulado, ampliando a possibilidade de adesão por produtores de menor porte; e (iv) como custos de transação, incerteza quanto ao fluxo de receitas e características institucionais influenciam a decisão do produtor e a efetividade agregada da política ambiental.

O argumento central desta tese é que a viabilidade econômica e a efetividade ambiental de instrumentos de mitigação na cafeicultura brasileira dependem da arquitetura institucional adotada. Instrumentos regulados de precificação de carbono operam sob lógica de escala mínima e estrutura de custos fixos que podem gerar barreiras de entrada e efeitos distributivos assimétricos. Em contraste, instrumentos voluntários baseados em rotulagem e diferenciação de produto tendem a reduzir a dependência de escala mínima de área, deslocando o mecanismo de incentivo para o prêmio de mercado. Assim, a efetividade agregada da política climática no setor cafeeiro não é função apenas do potencial técnico de mitigação, mas da interação entre preços, custos de transação, estrutura fundiária e desenho institucional.

A investigação empírica desta tese é estruturada a partir de um conjunto integrado de hipóteses que abrangem tanto instrumentos regulados de precificação de carbono quanto instrumentos voluntários de diferenciação de mercado, considerando suas implicações microeconômicas, distributivas e institucionais.

H1 – Viabilidade econômica sob instrumento regulado: Existe um preço mínimo do crédito de carbono, condicionado à produtividade física de geração de reduções certificáveis e à estrutura de custos fixos e variáveis de adoção e certificação, acima do qual a participação da cafeicultura brasileira em um mercado regulado torna-se economicamente racional para o produtor médio sob as condições observadas.

H2 – Efeitos distributivos da escala mínima: A existência de custos fixos de certificação e de uma escala mínima economicamente viável para projetos de carbono gera efeitos regionais assimétricos, favorecendo municípios com maior predominância de estabelecimentos de maior área e limitando a abrangência territorial do instrumento regulado.

H3 – Redução da barreira de entrada via instrumento voluntário: Instrumentos voluntários de rotulagem ambiental, ao operarem por meio de diferenciação de produto e prêmio de preço, apresentam menor dependência de escala mínima de área do que o mercado regulado, reduzindo a barreira de entrada para produtores de menor porte e ampliando a possibilidade de adesão.

H4 – Efetividade condicionada por custos de transação e incerteza: Tanto instrumentos regulados quanto voluntários têm sua efetividade condicionada por custos de transação, estrutura de governança, credibilidade institucional e incerteza quanto ao fluxo futuro de receitas (preço do carbono ou prêmio de mercado), o que influencia a decisão do produtor e a efetividade da política ambiental.

Em conjunto, essas hipóteses permitem avaliar comparativamente a racionalidade microeconômica da adesão aos diferentes instrumentos, seus efeitos distributivos no espaço produtivo e sua contribuição potencial para a mitigação agregada de gases de efeito estufa na cafeicultura brasileira.

Dessa forma, esta tese tem o objetivo de avaliar o potencial de mitigação de GEE no setor cafeeiro brasileiro e analisar os impactos econômicos associados à adoção de instrumentos de política climática. A partir desse objetivo, a tese estrutura-se em quatro blocos articulados. Inicialmente, apresenta-se uma análise do ambiente tecnológico associado à mitigação de emissões na agropecuária, estabelecendo as bases estruturais para a transição produtiva de baixa emissão. Em seguida, desenvolvem-se dois eixos analíticos centrais (partes 1 e 2): o exame dos instrumentos regulados de precificação de carbono e a análise dos instrumentos voluntários de certificação e rotulagem ambiental. Por fim, o trabalho integra os resultados obtidos em uma análise do potencial agregado de redução de gases de efeito estufa na agricultura, discutindo implicações para o desenho institucional e a política pública.

Previamente à análise dos instrumentos econômicos, examina-se o ambiente tecnológico da mitigação agrícola. A transição para sistemas produtivos de menor intensidade de carbono pressupõe a existência de inovações capazes de reduzir emissões ou aumentar a eficiência no uso de insumos. A análise de patentes, marcas e produção científica permite identificar a dinâmica tecnológica associada à mitigação na agropecuária, evidenciando

oportunidades e gargalos. Esse diagnóstico é essencial para avaliar a factibilidade de inserção da cafeicultura em instrumentos de mercado de carbono.

O primeiro eixo analítico central analisa os instrumentos regulados de precificação de carbono. Entre esses instrumentos destaca-se o Sistema Brasileiro de Comércio de Emissões (SBCE), estruturado sob a lógica de um sistema de licenças negociáveis (*cap and trade*). Nesse modelo, a autoridade reguladora estabelece um limite agregado de emissões (*cap*) e distribui permissões de emissão negociáveis entre os agentes regulados. É importante distinguir essas permissões dos créditos de carbono. Enquanto as permissões representam o direito de emitir determinada quantidade de gases de efeito estufa dentro do limite regulatório estabelecido, os créditos de carbono correspondem a reduções ou remoções certificadas de emissões geradas por projetos específicos. Dependendo do desenho institucional do sistema, esses créditos podem ser utilizados de forma complementar para compensação parcial das emissões dos agentes regulados.

Nesse sentido, a literatura aponta que a eficácia de tais instrumentos depende da mensuração adequada das emissões (MRV), da previsibilidade regulatória e da capacidade dos produtores de internalizar os custos iniciais de adequação. Nesta tese, são avaliadas: a viabilidade econômica prospectiva da inserção da cafeicultura em um mercado regulado; os impactos potenciais sobre disparidades regionais; e a decisão microeconômica do produtor diante da possibilidade de participar do mercado de carbono.

A análise distributiva assume papel central. A heterogeneidade regional da cafeicultura brasileira pode implicar efeitos assimétricos, favorecendo regiões com maior capitalização e infraestrutura institucional. Assim, a política climática, caso não seja adequadamente desenhada, pode ampliar desigualdades existentes. A investigação empírica busca identificar tais riscos e discutir mecanismos mitigadores.

O segundo eixo central examina instrumentos voluntários, com ênfase na certificação e na rotulagem de café carbono neutro. Diferentemente do mercado regulado, esses mecanismos operam por meio de incentivos reputacionais e prêmios de preço. A análise do faturamento da cafeicultura orgânica em nível municipal fornece evidências sobre a capacidade de mercados diferenciados gerarem receita adicional. Complementarmente, estima-se a expectativa de receita associada à rotulagem ambiental e modela-se a decisão do produtor em um ambiente de diferenciação de produto.

A comparação entre instrumentos regulados e voluntários permite avaliar complementaridades e limitações. Enquanto o mercado regulado tende a gerar reduções de emissões de forma coordenada em nível agregado, os instrumentos voluntários podem

oferecer maior flexibilidade e menor barreira institucional, embora dependam da disposição a pagar do consumidor e da credibilidade do selo.

Metodologicamente, a tese combina análise prospectiva de cenários, modelagem microeconômica da firma agrícola, exploração de dados secundários (IBGE, Banco Central do Brasil e outras bases oficiais) e técnicas de análise bibliométrica e de patentes. Essa abordagem integrada permite articular níveis macro (potencial de mitigação), meso (efeitos regionais) e micro (decisão do produtor), oferecendo uma visão sistêmica da transição para a produção de café de baixa emissão.

A escolha da cafeicultura como estudo de caso justifica-se por três razões principais. Primeiramente, trata-se de um setor de elevada relevância econômica e inserção internacional. Em segundo lugar, apresenta estrutura produtiva majoritariamente composta por agricultores familiares, o que torna a análise distributiva particularmente relevante. Por fim, o café possui mercado consumidor sensível a atributos socioambientais, o que favorece a análise de instrumentos voluntários. Ainda assim, embora centrada na cafeicultura, a análise permite extrair implicações para o desenho de instrumentos climáticos aplicáveis a outros segmentos da agropecuária brasileira.

A principal contribuição desta tese reside na integração entre economia ambiental, economia agrícola e economia da firma, aplicada a um setor específico com elevada importância socioeconômica. Ao combinar avaliação prospectiva de mercado regulado, análise distributiva regional e modelagem da decisão do produtor sob instrumentos voluntários, o trabalho oferece evidências empíricas e arcabouço teórico para o desenho de políticas climáticas mais eficientes e inclusivas.

Além disso, o estudo contribui para o debate sobre agricultura familiar e transição ecológica, destacando que a mitigação climática no meio rural não é apenas questão tecnológica, mas também institucional e distributiva. Instrumentos econômicos mal calibrados podem gerar exclusão produtiva; por outro lado, mecanismos bem estruturados podem criar condições para que a agenda climática se converta em oportunidade de agregação de valor e desenvolvimento territorial.

Conforme mencionado, a parte analítica central da tese estrutura-se em duas partes inter-relacionadas. A primeira dedica-se ao exame do mercado regulado de carbono, articulando análise de viabilidade econômica, avaliação de impactos regionais e modelagem microeconômica da decisão do produtor. A segunda volta-se aos instrumentos voluntários de certificação e rotulagem ambiental, explorando evidências empíricas acerca de faturamento e prêmios de preço como mecanismos de incentivo privado à mitigação. A seguir, o capítulo

final amplia a análise para o nível agregado e municipal, estimando o potencial agregado de redução de gases de efeito estufa na cafeicultura brasileira e integrando os resultados obtidos à discussão sobre desenho institucional e implicações de política pública. Adicionalmente, as duas partes centrais são precedidas pela exposição da estratégia metodológica e por uma investigação do ambiente tecnológico associado à redução de emissões de GEE no setor agropecuário.

Em síntese, esta tese investiga sob quais condições distintas arquiteturas institucionais de política climática, reguladas e voluntárias, são capazes de induzir a mitigação de emissões na cafeicultura brasileira de forma economicamente racional para o produtor e ambientalmente efetiva em nível agregado. Ao articular viabilidade microeconômica, efeitos distributivos regionais e condicionantes institucionais, o trabalho busca demonstrar que o protagonismo climático do setor não depende apenas de seu potencial técnico de mitigação, mas da compatibilidade entre incentivos econômicos, estrutura produtiva e desenho regulatório.

Para responder às questões formuladas e testar as hipóteses delineadas, torna-se necessário explicitar o arcabouço metodológico que orienta a investigação empírica. A seção seguinte apresenta a estratégia de pesquisa adotada, detalhando os procedimentos analíticos, as bases de dados utilizadas e os modelos empregados para examinar o ambiente tecnológico e avaliar economicamente instrumentos regulados e voluntários de mitigação na cafeicultura brasileira.

2 MÉTODOS E PROCEDIMENTOS CONSOLIDADOS

Esta tese adota uma estratégia metodológica estruturada em múltiplos níveis analíticos, combinando abordagens descritivas, econométricas, prospectivas e de modelagem microeconômica. A investigação está organizada a partir de oito artigos inter-relacionados, que examinam, sob diferentes instrumentos de política e mecanismos de mercado, o potencial de mitigação de gases de efeito estufa (GEE) na cafeicultura e na agropecuária brasileira.

A organização metodológica acompanha essa estrutura. Inicialmente, apresenta-se a estratégia de análise do ambiente tecnológico de mitigação. Em seguida, detalham-se os procedimentos empíricos e analíticos relativos aos instrumentos regulados e voluntários. Por fim, descreve-se a metodologia utilizada para estimar o potencial agregado de redução de emissões na agricultura. A seguir, apresentam-se as subseções metodológicas correspondentes a cada bloco analítico.

2.1 TECNOLOGIA PARA REDUÇÃO DE GEE NA AGROPECUÁRIA

Esta subseção descreve os procedimentos metodológicos utilizados para examinar o ambiente tecnológico relacionado à mitigação de GEE na agropecuária. A análise combina: levantamento e tratamento de dados de patentes vinculadas a tecnologias de redução de emissões; análise bibliométrica da produção científica correlata; e mapeamento de registros de marcas associadas a tecnologias ambientais no setor.

A abordagem é predominantemente quantitativa-descritiva, complementada por técnicas de análise estatística exploratória, com o objetivo de identificar padrões de atividade inventiva, concentração tecnológica e tendências temporais. Essa etapa fundamenta empiricamente a discussão sobre disponibilidade tecnológica para redução de emissões, servindo de base para as análises econômicas subsequentes.

Para obter e interpretar indicadores relacionados ao esforço tecnológico e inventivo, este trabalho tem a proposta de fazer análise quantitativa de patentes, bibliométrica e de marcas registradas. A coleta de dados de patentes e marcas (direitos de propriedade) segue diretrizes gerais do Manual de Oslo para dados secundários.

O Manual de Oslo é um guia que apresenta diretrizes para coleta e interpretação de dados sobre atividades inovadoras, e sugere o uso de diversas metodologias quantitativas e qualitativas para a mensuração da inovação, como pesquisas de opinião, análises de patentes e registros de marcas, entre outras (OCDE, 2005).

É importante distinguir invenção e inovação. Invenções correspondem à geração de novos conhecimentos, produtos ou processos passíveis de proteção intelectual, enquanto inovações referem-se à implementação efetiva dessas soluções em atividades produtivas ou comerciais. Nesse sentido, patentes, publicações científicas e registros de marcas não constituem medidas diretas de inovação, mas indicadores indiretos do esforço tecnológico, inventivo e da difusão potencial de conhecimentos associados à inovação. Consequentemente, os resultados deste capítulo devem ser interpretados como evidências da evolução do ambiente tecnológico relacionado à mitigação de GEE na agropecuária, e não como medida direta da adoção de inovações pelo setor.

De acordo com a OCDE (2005), a inovação é uma atividade complexa e diversificada em que diversos componentes interagem, não sendo possível definir um modelo particular de inovação como o modelo definitivo. Assim, apresenta a análise de invenções por meio de patentes e de registros de marcas, entre outras formas, como métodos de captar medidas de esforço desses modelos. No entanto, conforme exposto nesse Manual, ele se restringe a tecnologias de produtos e processos e, assim, não capta por exemplo tecnologias

organizacionais, comerciais, de serviço e outras que podem não contemplar apenas produtos e processos.

Os indicadores de patentes e marcas registradas, selecionados no presente estudo se restringem a direitos de propriedade. Para buscar ampliar a presente análise, a fim de coletar dados sobre tecnologias abertas e livres, optou-se por incluir a análise bibliométrica. Esse diagnóstico tecnológico estabelece a condição estrutural necessária para a viabilidade econômica dos instrumentos analisados nas hipóteses desta pesquisa.

2.1.1 Patentes

Os dados de patentes foram coletados por meio do Google Patents¹, mecanismo de pesquisa do Google que indexa patentes publicadas e pedidos de patentes e permite aos usuários pesquisar e visualizar patentes concedidas e solicitações de patentes publicadas em todo o mundo. Essa ferramenta inclui mais de 120 milhões de publicações de patentes de mais de 100 escritórios de patentes em todo o mundo, além de documentos técnicos e livros indexados no Google Scholar, Google Books e no Prior Art Archive.

Entre as fontes e os critérios de busca do Google Patents está a Cooperative Patent Classification (CPC), o qual foi escolhido nesta pesquisa por possibilitar a pesquisa do tema específico deste trabalho em sua classificação, a saber: “Y02P60/20 • Reduction of greenhouse gas [GHG] emissions in agriculture, e.g. CO₂”. A coleta de número de patentes e pedidos de patentes foi analisada de maneira temporal com dados anuais, de patentes publicadas no período de 1992 a 2022. A CPC é regulamentada por um conjunto de regras e procedimentos estabelecidos pela European Patent Office (EPO) e pelo United States Patent and Trademark Office (USPTO), cujas instituições disponibilizam o "CPC Scheme and Definitions"² com definição da estrutura hierárquica da CPC e fornece definições para cada categoria e subcategoria.

2.1.2 Marcas

A pesquisa de marcas registradas pode fornecer um indicativo relevante na análise dos sinais de comercialização associados às tecnologias ambientais, tendo em vista que nos

¹ Acesso por meio do link: <https://patents.google.com>. Informações sobre cobertura do serviço de busca: https://support.google.com/faqs/answer/7049585?hl=pt-BR&ref_topic=6390989.

² Definições do CPC: <https://www.cooperativepatentclassification.org/cpcSchemeAndDefinitions>.

instrumentos voluntários de política ambiental, está incluso o comportamento pró-ativo de rotulagem ambiental que certifica boas práticas agrícolas. A plataforma utilizada para coletar dados de marcas registradas foi a Global Brand Database³, a qual é mantida pela Organização Mundial da Propriedade Intelectual (Ompi) e abrange 21.354.440 registros de 73 fontes de dados.

As marcas foram quantificadas por meio da seguinte pesquisa booleana no nome das marcas: (carbon OR ghg OR carbono OR gee OR CO2) AND (zero OR neutro OR baixo OR neutral OR low). Esses termos foram selecionados para buscar identificar marcas de produtos que indiquem adoção de práticas ou tecnologias de redução ou neutralização da emissão de gases do efeito estufa.

Para restringir apenas as marcas de produtos advindos da atividade agropecuária, foram filtrados apenas os resultados da Classificação Internacional de Nice nas categorias 29, 30 e 31. A classe 29 inclui, essencialmente, gêneros alimentícios de origem animal, frutas, verduras e legumes e outros produtos hortícolas comestíveis, preparados ou conservados para consumo. A classe 30 inclui gêneros alimentícios de origem vegetal, exceto frutas, verduras e legumes, preparados ou conservados para consumo, assim como produtos destinados a melhorar o sabor dos alimentos. E a classe 31 inclui, essencialmente, produtos da terra e do mar que não tenham recebido qualquer preparação para consumo, animais vivos e plantas vivas, assim como alimentos para animais (INPI, 2022).

2.1.3 Bibliometria

A análise bibliométrica permite mapear conhecimentos científicos e tecnológicos de acesso aberto, complementando os indicadores de propriedade intelectual. Esses conhecimentos abrangem adequações do processo produtivo que não são passíveis de proteção intelectual/industrial. Como exemplos de práticas de inovações tecnológicas abertas e livres, bastante comuns no setor agropecuário, tem-se o uso de variedades promissoras, cobertura do solo, cultivo consorciado, plantio direto, cultivo orgânico, integração lavoura pecuária floresta (ILPF) e outras práticas geradas por instituições públicas e privadas. Esta análise foi realizada também de maneira temporal por número de publicações e citações com

³ Acesso por meio do link: <https://branddb.wipo.int/>.

base em dados da plataforma Web of Science⁴, a qual possibilita a ampliação das análises de forma simplificada, com instrumentos de análise de cluster e co-ocorrências, em pesquisas futuras.

De acordo com as informações disponíveis na Web of Science, em março de 2026, a base de dados indexa mais de 21.000 periódicos científicos, livros técnicos, anais de eventos, atas de conferências, relatórios técnicos e outros tipos de publicações. Essa plataforma também disponibiliza um acervo de citações bastante extenso, o que permite identificar as publicações mais influentes, rastrear as tendências da pesquisa e avaliar o impacto de uma determinada pesquisa ou autor.

O número de publicações e citações coletados até 2025 foram obtidos por meio de pesquisa booleana em tópico, o qual inclui os campos título, resumo, as palavras-chave do autor e o Keywords Plus. O termo da pesquisa utilizado foi: (reduction OR mitigation) AND ("greenhouse gas" OR ghg OR carbon) AND emissions AND (agriculture OR livestock).

Em síntese, a análise do ambiente tecnológico permite identificar o grau de maturidade, a difusão e a direção das inovações associadas à mitigação de GEE na agropecuária. Esses resultados fundamentam as análises econômicas subsequentes, ao evidenciar a disponibilidade tecnológica que condiciona a viabilidade e a efetividade dos instrumentos regulados e voluntários examinados nas seções seguintes.

2.2 AVALIAÇÃO DE VIABILIDADE ECONÔMICA

Esta subseção apresenta a metodologia utilizada para avaliar prospectivamente a viabilidade financeira da inserção da cafeicultura no mercado regulado de carbono. O procedimento metodológico envolve: estimativa do potencial de redução de GEE por unidade de área; projeções de preços de créditos de carbono; cálculo da escala mínima economicamente viável para participação; e simulações de retorno financeiro considerando custos de certificação e monitoramento. A partir das estimativas de área mínima viável, realiza-se uma comparação com dados censitários para inferir o potencial de efetividade da política em termos de cobertura do setor.

A viabilidade financeira é avaliada à luz da moldura conceitual da microeconomia de preço de equilíbrio e maximização do lucro da atividade de comércio de créditos de carbono

⁴ Acesso por meio do link: <https://www.webofscience.com/wos/>. Resultados da pesquisa disponível em: <https://www.webofscience.com/wos/woscc/summary/2d518a13-01a9-4a00-8c40-76a7ea272346-01a79de6ef/relevance/1>.

como complemento à produção da cafeicultura. A partir dessa avaliação estima-se a possível escala, em termos de área, da lavoura cafeeira apta a comercializar créditos de carbono. Fica evidenciado que a unidade firma na presente análise foi considerada o cafeicultor. Este tem a produção de café em grão cru como atividade principal e, como potencial atividade secundária objeto desta análise, o comércio de créditos de carbono em mercado regulado.

Deve-se enfatizar que o crédito de carbono em mercado regulado é um produto padronizado, considerado idêntico pelos agentes no mundo, mesmo que venha de produtores diferentes. Essas características correspondem aos produtos classificados como *commodity*, pela definição de Krugman e Wells (2016). Adicionalmente, usando a definição dos mesmos autores, o mercado de carbono regulado pode ser considerado um mercado em concorrência perfeita, no qual todos os produtores e consumidores são tomadores de preço.

Dessa forma, a estimativa do preço de equilíbrio e da maximização de lucro da atividade de comércio de carbono, como secundário à cafeicultura, considerou que um produtor, individualmente, não tem condições de influenciar o preço de mercado. Logo, os problemas da maximização do lucro e do preço de equilíbrio considerarão o produtor como tomador de preço, conforme Nicholson e Snyder (2016) e Krugman e Wells (2016). Após estimar os níveis de produção do preço de equilíbrio e da maximização do lucro, é possível verificar a escala mínima de viável para a comércio de carbono e o nível de produção ótimo. Com esses dois indicadores é possível verificar a quantidade a ser ofertada de créditos de carbono pelos produtores de café.

2.2.1 Preço de equilíbrio: produção é lucrativa a partir de que nível?

O preço de equilíbrio indica o nível de produção mínimo a partir do qual determinada atividade é lucrativa. Essa informação permite inferir a escala mínima de produção que é financeiramente viável. Assim, os níveis de produção são lucrativos quando o preço de mercado é superior ao custo total médio mínimo da atividade. Krugman e Wells (2016), por exemplo, desenvolvem essa análise para o caso das *commodities* agrícolas, utilizando a seguinte representação matemática.

$$Lucro = RT - CT \quad (1)$$

$$\frac{Lucro}{Q} = \frac{RT}{Q} - \frac{CT}{Q} \quad (2)$$

Onde: RT = Receita Total; CT = Custo Total; e Q = Quantidade

Uma vez que $\frac{RT}{Q}$ é a receita média, que equivale ao preço em um mercado de concorrência perfeita, e $\frac{CT}{Q}$ é o custo total médio, podemos igualar o lucro a zero para obter o ponto mínimo de lucro não negativo, no qual o Custo Total Médio se iguala ao Preço.

$$0 = P - CTM \quad (3)$$

$$P = CTM \quad (4)$$

Com base no raciocínio de Krugman e Wells (2016), temos que a regra para determinar se um produtor de um bem obtém lucro depende da comparação entre o preço de mercado do bem e o custo total médio mínimo do produtor. Dessa forma, se o preço de mercado exceder o custo total médio mínimo, o produtor terá lucro, e, caso o preço de mercado for inferior ao custo total médio mínimo, o produtor terá prejuízo. Por fim, se o preço de mercado for igual ao custo total médio mínimo, o produtor estará em equilíbrio.

2.2.2 Maximização do lucro: qual nível de produção resulta em lucro máximo?

Agentes maximizadores de lucro tomam decisões “na margem”. O produtor ajusta aquelas variáveis que podem ser por ele controladas até que seja impossível aumentar ainda mais seus lucros. Esse problema de maximização do lucro é representado por Nicholson e Snyder (2016):

$$\text{Max}[P * Q - CT(q)] \quad (5)$$

Cuja condição de primeira ordem fornece a maximização do lucro por:

$$P - CM(q) = 0 \quad (6)$$

Em (6), $CM(q)$ é o custo marginal de se produzir uma quantidade adicional de produto. Logo:

$$CM(q) = P \quad (7)$$

Dessa forma, a maximização do lucro ocorrerá no nível de produção em que o custo marginal se iguala ao preço de mercado ($P = CMg$), sob a hipótese de concorrência perfeita e comportamento tomador de preço. É importante distinguir essa condição do chamado ponto de equilíbrio contábil (*break-even point*). O ponto de equilíbrio ocorre quando o preço de mercado se iguala ao custo total médio ($P = CMeT$), situação na qual o lucro econômico é nulo. Já a condição de maximização do lucro ($P = CMg$) determina a quantidade ótima de

produção, podendo resultar em lucro positivo, nulo ou negativo, a depender da posição da curva de custo total médio em relação ao preço de mercado. A distinção entre essas duas condições é fundamental para identificar corretamente tanto a escala mínima viável quanto o nível ótimo de oferta de créditos de carbono pelo produtor.

Essa abordagem depende da separação entre custos fixos, que não variam com o volume de produção, e custos variáveis, que aumentam ou diminuem de acordo com a produção. Isso ajuda a determinar quantas unidades do produto precisam ser vendidas para que o produtor não tenha prejuízo nem lucro.

Com base nessa moldura conceitual, buscaremos evidências empíricas para o caso específico da cafeicultura. Como se sabe, nessa atividade há predominância de custos fixos, induzindo a retornos crescentes de escala⁵ até o ponto que a lavoura cafeeira atinge sua área máxima. A partir desse ponto, o custo de expansão da área eleva significativamente o custo marginal. Esse pode, portanto, atingir patamares acima dos preços de mercado estimados para o crédito de carbono. Deste modo, após obter o nível mínimo de viabilidade da produção de créditos de carbono e o nível de produção que maximiza o lucro, é possível encontrar a quantidade de créditos a ser ofertada pelo cafeicultor. Há, obviamente, a possibilidade do nível de preços de mercado ser inferior ao preço de equilíbrio. Nesse caso, como já destacado, não haverá quantidade a ser ofertada de créditos de carbono.

Com esses possíveis resultados, provenientes de diferentes cenários de preços do crédito de carbono e dos custos para o cafeicultor de optar por alternativas produtivas que gerem tais créditos, é possível verificar o potencial de inserção da cafeicultura brasileira no mercado de carbono. Nossas simulações utilizam-se de dados censitários dos estabelecimentos rurais cafeeiros, como ficará evidenciado nas seções subsequentes.

2.2.3 Projeções dos benefícios

No que concerne aos benefícios, relativamente à quantidade de créditos de carbono emitido por hectare, a presente análise utilizou como referência estudo que comparou o balanço de carbono (emissões menos sequestro) em lavouras com manejo tradicional com o balanço em lavouras que adotam boas práticas para incrementar os estoques de carbono. A esse respeito, Arellano e Hernández (2023) recomendam a utilização adequada de

⁵ Retornos crescentes de escala, também conhecidos como economias de escala, ocorrem no caso de o custo total médio de longo prazo diminuir à medida que o produto aumenta (KRUGMAN e WELLS, 2016).

fertilizantes, monitoramento periódico da fertilidade do solo, incorporação de árvores funcionais (por exemplo árvores de sombra e/ou fixadoras de nitrogênio) às lavouras, práticas de conservação do solo e utilização de biofertilizantes, entre outras ações, para reduzir a emissão de carbono. Ao comparar diferentes sistemas produtivos de café da América Central, Arellano e Hernández (2023) concluem que a quantidade de carbono armazenada na biomassa viva varia de 53,6 Mg/ha em policulturas tradicionais a 9,7 Mg/ha em monoculturas a pleno sol.

A definição dos coeficientes de mitigação para a cafeicultura brasileira encontra sustentação em evidências empíricas que demonstram a sensibilidade das emissões de GEE aos diferentes sistemas de manejo. Noponen *et al.* (2012) ressaltam que a magnitude das emissões de gases de efeito estufa na lavoura cafeeira varia significativamente de acordo com os níveis de insumos aplicados e o tipo de gestão, contrastando o impacto ambiental do manejo convencional em relação ao orgânico. Essa diferenciação é fundamental para estabelecer a linha de base sobre a qual a adicionalidade de carbono será calculada.

Complementarmente, pesquisas focadas no balanço de carbono em condições brasileiras, como as conduzidas por Oliveira Junior *et al.* (2022), oferecem um suporte técnico relevante ao demonstrar que, em estudos de caso específicos, o sequestro de carbono biológico nas lavouras cafeeiras supera suas emissões totais. Esse saldo positivo indica que a cultura possui capacidade intrínseca de atuar como um sumidouro líquido, transformando o potencial técnico de mitigação em uma oportunidade real de geração de créditos de carbono, desde que as reduções marginais sejam adequadamente certificadas e provenientes de boas práticas agrícolas adicionais.

Em lavoura brasileira, pesquisa conduzida na Universidade Federal de Lavras, que relacionou a aplicação de diferentes níveis de fertilizante NPK a níveis de produtividade e emissões de GEE, indicou que a aplicação ótima econômica na cafeicultura reduziu 18,86% das emissões, o equivalente a 1,40 tCO₂eq ha⁻¹ (Oliveira, 2015). Em estudo voltado para lavouras de monocultura em pleno sol de três regiões do estado de Minas Gerais⁶, o relatório Cecafé e Imaflora (2022) indicou que boas práticas foram eficazes para incrementar os estoques de carbono em 7,58 tCO₂eq ha⁻¹ por ano, em média, com relação ao manejo

⁶ Fizeram parte da amostra 40 fazendas de três regiões do Estado de Minas Gerais, Brasil: Cerrado, Matas de Minas e Sul de Minas. Minas Gerais é responsável pela produção de aproximadamente metade dos cafés do Brasil.

tradicional⁷. Dada a representatividade das lavouras desse estudo em relação à cafeicultura brasileira, essa quantidade anual média de incremento do estoque de carbono do relatório Cecafé e Imaflora (2022), apurada em 7,58 tCO₂eq ha⁻¹, foi utilizada como referência para cálculo da receita total auferida.

Para inferir a receita da propriedade cafeeira, no que concerne ao preço recebido por crédito de carbono, foi preciso estimar possíveis cotações dos créditos de carbono. Para isso, primeiramente foi estimado um coeficiente das cotações em relação ao tempo com base em 2.583 observações de 10 anos de cotações diárias, no período de 13 de setembro de 2012 a 12 de setembro de 2022, do fechamento do Índice Global de Futuros de Carbono da Intercontinental Exchange (ICE)⁸, conhecida por *Carbon Emissions Futures*.

Em seguida, foram realizadas 30 simulações estocásticas para cada dia, contempladas nos métodos de Monte Carlo, descritos em Kroese *et al.* (2011), em que um componente aleatório fez os preços variarem proporcional ao desvio padrão diário, conforme representado abaixo:

$$COTSim = COTEst_t + (-2 * DPDia_t + 4 * DPDia_t * Random) \quad (8)$$

Onde:

COTSim = Cotação simulada;

COTEst = Cotação estimada;

DPDia = Desvio da cotação estimada em relação à cotação observada diariamente;

Random = Componente aleatório que varia de 0 a 1;

t = Dia da cotação, varia de 1 a 2583; e

i = Indicador da simulação, varia de 1 a 30.

Para incorporar a incerteza inerente às cotações futuras do carbono, foram realizadas 30 simulações estocásticas para cada dia da série histórica, utilizando o método de Monte Carlo. A escolha de 30 iterações baseia-se em um equilíbrio entre estabilidade das estimativas

⁷ As boas práticas consideradas nesse trabalho incluem técnicas como o plantio consorciado de plantas nas entrelinhas dos cafeeiros, preferência por adubos orgânicos e organominerais, manejo integrado de pragas e doenças, a fertirrigação para áreas suscetíveis a déficits hídricos, retorno da palha (casca do fruto de café proveniente do processamento) ao solo, entre outros.

⁸ Esse índice é composto pelos preços dos quatro mercados de carbono mais negociados do mundo: o *European Union Emissions Trading Scheme* (EU ETS), o *Western Climate Initiative (California Cap and Trade Program)*, o *Regional Greenhouse Gas Initiative* (RGGI) e o *UK Emissions Trading Scheme* (UK ETS). Os dados históricos de cotações diárias podem ser obtidos em: <https://www.ice.com/products/82118761/Global-Carbon-Index-Futures>

e eficiência computacional, sendo suficiente para gerar uma distribuição amostral confiável da cotação projetada (Kroese *et al.*, 2011). Em cada simulação, o termo aleatório foi gerado a partir de uma distribuição uniforme no intervalo [0,1] e aplicado conforme a equação (8). Essa abordagem produz erros simetricamente distribuídos em torno da estimativa pontual, com amplitude controlada pelo desvio padrão diário observado ($DPDi_t$). A opção pela distribuição uniforme, em vez da normal, deve-se à ausência de evidências empíricas que justifiquem uma forma funcional específica para os desvios futuros, sendo uma escolha conservadora que não impõe caudas pesadas à distribuição dos erros.

Por fim, a média das simulações do dia mais recente assumiu uma projeção de cotação mediana (Cotação 2), acompanhada por uma cotação mais elevada (Cotação 3) e uma cotação mais baixa (Cotação 1), calculadas com base no desvio padrão das 30 simulações desse período mais recente, medidas como segue:

$$Cotação1 = Cotação2 - \frac{2*DPSim}{\sqrt{30}} \quad (9)$$

$$Cotação3 = Cotação2 + \frac{2*DPSim}{\sqrt{30}} \quad (10)$$

Onde $DPSim$ é o desvio padrão das 30 simulações do período t mais recente.

Dessa forma, a cotação mais alta e a cotação mais baixa tendem a ser mais distantes de acordo com o desvio padrão das cotações do período observado, 13 de setembro de 2012 a 12 de setembro de 2022. Esse método permite estabelecer uma margem entre as projeções de cotações e consequentemente dos benefícios.

2.2.4 Projeções de Custos

O mercado regulado de carbono ainda está em vias de ser implementado no Brasil. Há um elevado grau de incerteza sobre os custos e benefícios da comercialização de créditos de carbono, inclusive por cafeicultores, sob a hipótese de que o mercado seja de fato implementado com essa possibilidade. Não obstante, tal possibilidade deve ser considerada para que o planejamento dessa política de licenças negociáveis leve em consideração as informações pertinentes aos diferentes setores e, em especial, ao setor cafeeiro.

As principais emissões de GEE na cafeicultura são decorrentes do uso de fertilizantes, da mudança no uso da terra, das práticas de manejo que inclui o uso de máquinas agrícolas e do processamento pós-colheita. Essas emissões podem ser significativamente reduzidas por meio da adoção de boas práticas e soluções tecnológicas que substituem processos geradores de emissão (fontes de carbono para a atmosfera) ou compensam as emissões com absorção desse elemento (sumidouro de carbono).

O estudo de Nab e Maslin (2020) contribuiu para quantificação de emissões de GEE na cafeicultura comparando um sistema de produção convencional com um sistema sustentável, utilizando o método da pegada de carbono. Os resultados desse estudo especificamente para a fase de lavoura, que estão reproduzidos na Tabela 27, do Apêndice 3, apresentam as fontes de emissão desses gases e indicam uma redução de aproximadamente 95% das emissões no sistema sustentável. No entanto, vale salientar que o sistema sustentável de Nab e Maslin (2020) previa a substituição completa de fertilizantes químicos por resíduos orgânicos, o que provavelmente inviabilizaria a manutenção do volume de produção da cafeicultura brasileira.

Nesse sentido, são mais factíveis sistemas de produção que contemplem a adoção de boas práticas agrícolas que permitem manter o volume de produção competitivo da cafeicultura do Brasil. São exemplos dessas boas práticas: sistema de produção arborizado; consórcio do cafeeiro com braquiária ou leguminosas nas entrelinhas; sistema de produção orgânico; cultivares mais produtivas com resistência a pragas e doenças; manejo integrado de pragas e doenças; processos eficientes de secagem de café; sistema de irrigação eficiente; reuso de água no processamento; e nutrição equilibrada, entre outras (Consórcio Pesquisa Café, 2021). Para cada um deles, há custos e benefícios envolvidos e que precisam ser estimados.

Do lado dos custos, há dois componentes principais. Um componente envolve a adoção de boas práticas para reduzir as emissões e intensificar a retenção de carbono no solo. Nesse caso, vale esclarecer que as emissões de GEE pela cafeicultura podem ser reduzidas pela adoção de boas práticas agrícolas conservacionistas, tais como o plantio consorciado com plantas de cobertura nas entrelinhas do cafeeiro, de acordo com Guerra *et al.* (2021), incorporação de restos de poda ao solo (Cerri *et al.*, 2017), uso de fertilizantes organominerais e de composto orgânico (Matos e Pizzol, 2022), entre outras. Dessa forma, a cafeicultura conservacionista abrange diversas práticas de manejo do solo que promove o incremento em biomassa verde e residual, conforme Anis *et al.* (2022). Essas boas práticas apresentam, de acordo com os autores citados, custos relativamente baixos.

Contudo, e em complemento, há outro componente do custo, decorrente do processo de mensuração, relato e verificação do balanço de carbono necessário à obtenção da certificação dos seus créditos. Esse custo relativo à certificação é expressivo. Basicamente é considerado um custo de transação que contempla uma parte fixa expressiva para cada projeto de obtenção de créditos de carbono. Nesse sentido, sobre a certificação de créditos de carbono no setor agropecuário brasileiro para o mercado voluntário, Vargas *et al.* (2022, p. 13)

apontam que “projetos de monitoramento de carbono no solo, por exemplo, possuem elevados custos e, conseqüentemente, inviabilizam a entrada de pequenos e médios produtores rurais no mercado”.

Nesse sentido, é relevante mencionar a pesquisa de Oliveira Junior *et al.* (2022) que faz o balanço de carbono de lavouras cafeeiras e demonstra que o sequestro de carbono supera suas emissões nos seus estudos de caso. Dessa forma, o potencial de créditos de carbono a serem comercializados se referem apenas aos sequestros de carbono adicionais certificados, provenientes de boas práticas agrícolas, ou seja, sendo considerado apenas a redução marginal (adicional).

Para promover essa redução de GEE na cafeicultura, os possíveis custos de adoção de sistema produtivo sustentável, associado ao sequestro de carbono, foram apurados com base na avaliação de impacto do sistema de cultivo de café com uso de braquiária nas entrelinhas e no custo de contratação de assistência técnica especializada. O custo adicional médio de adoção do sistema de cultivo de café com uso de braquiária nas entrelinhas foi de R\$ 270 por hectare por ano, de acordo com Balanço Social da Embrapa (Embrapa, 2022) e no respectivo Relatório de Avaliação de Impactos (Embrapa, 2022a).

O custo de contratação de assistência técnica especializada foi equivalente ao valor médio de R\$ 204 por hectare, referente a duas horas técnicas de engenheiro agrônomo, conforme Tabela de Honorários Profissionais para o Engenheiro Agrônomo⁹ (SMEA, 2020). Essa assistência técnica foi considerada pertinente pela necessidade de obter orientações acerca da adoção de boas práticas agrícolas, que podem ser aplicadas sem custos significativos de insumos adicionais.

Com base nesses componentes, para representar uma situação modal de lavoura cafeeira, os custos de adoção do sistema produtivo para neutralizar 7,58 toneladas¹⁰ de carbono equivalente por hectare ($\text{tCO}_2\text{eq ha}^{-1}$), acrescido dos custos variáveis de obtenção da certificação pelo cafeicultor¹¹, foi assumido o total de R\$ 1.474 por hectare por ano. O detalhamento dos custos variáveis está apresentado na Tabela 26, do Apêndice 2 desta tese. Para simplificar a análise, dado o grau de incerteza dessas projeções e simulação de um novo

⁹ Tabela de Honorários Profissionais para o Engenheiro Agrônomo – HP SMEA, substitui a Tabela de Honorários registrada no CREA-MG, sob nº 02/89.

¹⁰ De acordo com Cecafé e Imaflora (2022), o balanço de carbono, emissões menos sequestro, indicou que as boas práticas foram eficientes para incrementar os estoques de carbono em 7,58 $\text{tCO}_2\text{eq ha}^{-1}$, de café verde em relação ao manejo tradicional.

¹¹ Foi considerado um custo de R\$ 1.000 por hectare, como custo variável de certificação. A certificadora European Biochar Certificate (EBC) apresenta lista de preços com pacote de consultoria de 20 horas por EUR 3.000.

ambiente institucional, outros custos não desembolsados efetivamente foram ignorados no presente estudo.

Para buscar reduzir o grau de incerteza sobre os custos de transação e benefícios da venda de créditos de carbono, foram consideradas três projeções de custos fixos anuais com base em três fontes: o estudo apresentado em Vargas *et al.* (2022a) e tabelas públicas de preços de duas certificadoras¹² internacionais (GOLD STANDARD, 2022) e (EBC, 2022): a projeção Custos 1 considerou a metade do custo médio proveniente das três fontes citadas; a projeção Custos 2 considerou o custo médio; e a projeção Custos 3 considerou o montante equivalente ao dobro dos custos médios, considerando os preços das três fontes citadas.

As estimativas de escala mínima viável e de retorno econômico constituem a base para avaliar não apenas a racionalidade microeconômica da adesão ao mercado regulado, mas também suas implicações distributivas. Na seção seguinte, esses parâmetros são incorporados à análise territorial, permitindo examinar como as heterogeneidades regionais influenciam a efetividade e a abrangência potencial da política.

2.3 ANÁLISE DOS IMPACTOS REGIONAIS

A análise de impactos regionais utiliza dados agregados por município e unidade federativa para avaliar a distribuição espacial dos efeitos econômicos e ambientais da eventual inserção no mercado regulado. A estratégia empírica envolve: construção de indicadores regionais de participação potencial; análise comparativa entre regiões produtoras; e avaliação de disparidades estruturais que possam afetar a adesão ao mercado de carbono. O enfoque é distributivo e territorial, permitindo identificar heterogeneidades regionais na capacidade de internalização dos incentivos econômicos.

Neste estudo, as regiões adotadas como objeto de análise são municípios brasileiros, o que atende aos requisitos teóricos mencionados anteriormente, seguindo o princípio da contiguidade e os critérios da homogeneidade e polaridade, de acordo com a abordagem de Polèse (1998). A escolha do município como região de análise foi baseada na facilidade de comparação dos resultados e decorrente da limitação de dados para outras unidades regionais que poderiam suprir resultados mais precisos, como por exemplo regiões classificadas por características homogêneas de solo e clima.

¹² Gold Standard e European Biochar Certificate (EBC).

A análise espacial dos dados deste estudo foi conduzida a partir dos fundamentos da Cartografia Temática, que se dedica a representar fenômenos específicos em um suporte territorial, em consonância com Rizzatti *et al.* (2023). Para observar a distribuição das variáveis quantitativas no espaço geográfico, elaboraram-se cartogramas, recurso que traduz informações numéricas em representações visuais e facilita a identificação de padrões espaciais. Esse tipo de representação é particularmente útil para evidenciar diferenças de intensidade entre áreas distintas, permitindo uma leitura mais intuitiva das estruturas. Assim, os mapas assumem um papel não apenas ilustrativo, mas também analítico.

No que se refere à execução, todo o processamento das informações espaciais utilizou como base a infraestrutura de dados geográficos e estatísticos do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). Os indicadores quantitativos foram obtidos no Sistema IBGE de Recuperação Automática (SIDRA), que disponibiliza tabelas de dados agregados de forma pública. A construção dos cartogramas foi realizada por meio da plataforma EstatGeo, desenvolvida pelo IBGE para integrar estatísticas oficiais às malhas digitais de referência (IBGE, 2019 e 2022). Esse recurso estabelece a correspondência direta entre os dados extraídos do SIDRA e os limites territoriais definidos no Quadro Geográfico de Referência para Produção, Análise e Disseminação de Estatísticas. Esse procedimento assegura compatibilidade entre informação estatística e espacial, além de reforçar a transparência e a reprodutibilidade da análise realizada.

Para analisar possíveis efeitos quantitativos do mercado de carbono com créditos da cafeicultura no desenvolvimento econômico regional, assumiu-se a hipótese de que o comércio de créditos de carbono é uma atividade adicional em relação à atividade cafeeira, que aumenta a renda dos cafeicultores e tem potencial efeito positivo sobre o Produto Interno Bruto (PIB) municipal. A análise dos dados foi realizada utilizando o software Stata, versão 17. Para garantir transparência, o código completo de replicação dos testes estatísticos segue disponibilizado no Apêndice 4.

Para definir a escala mínima de viabilidade econômica de projetos de carbono na cafeicultura, este trabalho baseia-se nas estimativas publicadas por Santos e Nogueira (2025), que realizaram uma análise custo-benefício detalhada para o setor. De acordo com esse estudo, a área mínima viável para a comercialização de créditos de carbono varia entre 50 hectares (cenário mais favorável, com custos de transação otimizados) e 320 hectares (cenário menos favorável).

Para fins de estratificação e compatibilidade com os dados censitários disponíveis, adotou-se o patamar de 100 hectares como referência central para este trabalho. Essa escolha

alinha-se com a estimativa do cenário mais favorável do estudo e coincide com uma das faixas de área pré-definidas no Censo Agropecuário de 2017 (IBGE, 2019), viabilizando a análise dos dados. Dessa forma, a estratificação proposta busca aproximar-se de um limiar de viabilidade economicamente realista e estatisticamente adequado.

Dessa forma, para compreender o potencial de redução de disparidade econômica em diferentes regiões, foram feitas duas comparações do PIB *per capita* médio: a) comparação de conjuntos de municípios estratificados primeiramente em dois grupos: municípios em concentrações urbanas e municípios com lavouras de café; e b) comparação dos 10 grupos de municípios que produzem café, que foram separados de acordo com a porcentagem de propriedades, em sua jurisdição, com 100 hectares ou mais que têm produção de café¹³.

A primeira comparação (a) foi feita entre municípios em concentrações urbanas e municípios com lavouras de café. Para verificar se estatisticamente as médias de PIB *per capita* são diferentes entre esses dois grupos, utilizou-se inicialmente o teste *t* de Welch, adequado a situações de heterocedasticidade, ou seja, quando as variâncias populacionais diferem entre os grupos (Gujarati e Porter, 2011). Como alternativa não paramétrica, aplicou-se o teste de Mann–Whitney, que avalia diferenças de posição entre duas distribuições sem pressupor normalidade dos dados (Siegel e Castellan, 2006). E, além disso, considerando que variáveis econômicas como o PIB apresentam distribuição altamente assimétrica, procedeu-se também à transformação logarítmica, estratégia recomendada para reduzir a influência de valores extremos e aproximar a distribuição da normalidade (Gujarati e Porter, 2011). Dessa forma, a análise combina procedimentos paramétricos e não paramétricos, assegurando maior robustez aos resultados.

Na segunda comparação (b), a análise se restringiu aos municípios produtores de café, eles foram agrupados em dez faixas de predominância de propriedades com 100 hectares ou mais, a saber: municípios com menos de 10%, de 10% a menos de 20%, de 20% a menos de 30%, de 30% a menos de 40%, de 40% a menos de 50%, de 50% a menos de 60%, de 60% a menos de 70%, de 70% a menos de 80%, de 80% a menos de 90%, de 90% a menos de 100% e de municípios com 100% de propriedades com pelo menos 100 hectares. A abordagem analítica para investigar a relação entre variáveis categóricas ordinais e uma variável de

¹³ Uma terceira comparação c), que segue disponível no Apêndice 4, como exemplificação, analisa as diferenças de dois grupos de municípios com lavouras cafeeiras: municípios nos quais as propriedades com 100 hectares ou mais representam pelo menos 30% dos estabelecimentos que produzem café e os demais municípios (que têm menos de 30% dessas propriedades).

resposta contínua iniciou-se com a Análise de Variância (ANOVA). Este teste avalia a hipótese de igualdade das médias entre três ou mais grupos independentes. Contudo, a validade de suas inferências depende de pressupostos cruciais, com destaque para a homocedasticidade, que postula a igualdade das variâncias entre os grupos. A verificação deste pressuposto, por meio de testes como o de Bartlett, é um passo fundamental, pois sua violação (heterocedasticidade) compromete a fidedignidade do teste F padrão, tornando necessária a adoção de métodos estatísticos alternativos que sejam robustos a essa condição (Bussab e Morettin, 2017).

Na presença de heterocedasticidade, a estratégia analítica deve ser ajustada para garantir a validade das conclusões. Neste trabalho, optou-se pelo uso de testes robustos, inicialmente pelo de Brown-Forsythe, que modifica a estatística de teste utilizando a mediana de cada grupo, tornando-o menos sensível a desvios da normalidade e à desigualdade de variâncias. A pesquisa prosseguiu com teste post-hoc para identificar quais pares de grupos específicos diferem entre si. No presente caso, com variâncias desiguais, o teste de Games-Howell foi um procedimento post-hoc apropriado, pois esse teste não assume a homocedasticidade e ajusta os graus de liberdade para cada comparação par a par.

Neste trabalho, tendo o teste omnibus robusto apontado uma significância global, enquanto os testes post-hoc não tenham identificado diferenças significativas entre pares específicos, a relação entre as variáveis pode ser mais bem descrita como uma tendência gradual do que como diferenças abruptas entre categorias discretas. Assim, a análise foi refinada com um modelo de regressão linear simples (Gujarati e Porter, 2011). Essa abordagem permite testar formalmente a existência de uma tendência linear, verificando a existência de uma relação sistemática e contínua entre as variáveis.

A abordagem estatística empregada busca investigar a relação entre a estrutura fundiária, categorizada pela predominância de grandes propriedades, e o desenvolvimento econômico municipal, mensurado pelo Produto Interno Bruto (PIB) *per capita*. Essa relação ajuda a entender como políticas agrícolas e ambientais podem ter diferentes efeitos regionais. No caso específico da possível inserção da cafeicultura no mercado de carbono, os efeitos em análise podem ser diferentes em cada município em decorrência da estrutura fundiária das respectivas propriedades cafeeiras, tendo em vista que a escala mínima de viabilidade depende da área da lavoura cafeeira.

A escala mínima de viabilidade é restritiva, pois se as áreas de lavouras cafeeiras de um município, por exemplo, não atingirem a área viável para um projeto de certificação de créditos de carbono, cafeicultores desse município não ofertarão créditos. Ou seja, a

cafeicultura desse município não será inserida no mercado de carbono. A estratificação de grupos de municípios com predominância de grandes propriedades foi realizada para identificar os impactos caso a escala mínima de viabilidade dos projetos de venda de créditos de carbono, em termos de área da lavoura, fique restrita a estabelecimento cafeeiro com no mínimo 100 hectares, pois esta estratificação fica mais próxima da escala mínima de viabilidade estimada por Santos e Nogueira (2025).

De acordo com esses autores, com base nos dados do Censo Agropecuário, no cenário mais favorável, a área mínima de uma lavoura viável para comercialização de créditos de carbono seria de 50 hectares. Nesse caso, considerando a estrutura fundiária da cafeicultura apurada pelo Censo Agropecuário de 2017 (IBGE, 2019), a política ambiental de *cap and trade* do mercado de carbono regulado teria potencial para abranger até 52% da área colhida total da cafeicultura brasileira, com a participação de até 12% dos estabelecimentos produtores de café.

Além disso, no cenário menos favorável, a área mínima de uma lavoura viável para comercialização de créditos de carbono seria de 320 hectares. Os estabelecimentos rurais que têm no mínimo essa área de 320 hectares representam apenas menos de 2% dos estabelecimentos produtores de café, os quais detêm entre 14% e 27% da área total da cafeicultura brasileira¹⁴, de acordo com o IBGE (2019).

Nesse sentido, a estratificação de grupos de municípios com predominância de grandes propriedades com no mínimo 100 hectares teve essa área mínima selecionada por fazer parte de um dos cenários intermediários (Custos 2 e Cotação 3) de Santos e Nogueira (2025) e também pela disponibilidade de dados, pois coincide com o início de uma das faixas de área utilizadas no Censo Agropecuário de 2017 apresentadas na Tabela 25 do Apêndice 1. No Brasil, por volta de 5% dos estabelecimentos cafeeiros têm a partir dessa área, sendo responsáveis por 39% da área colhida de lavouras de café (IBGE, 2019).

Assim, os métodos de comparação regional propostos neste trabalho permitem verificar o potencial do comércio de créditos de carbono pela cafeicultura brasileira na redução de disparidades econômicas de diferentes regiões, por meio de dados censitários dos estabelecimentos rurais cafeeiros e do PIB *per capita* médio de municípios estratificados,

¹⁴ O Censo Agropecuário não quantifica especificamente o número de produtores com área de 320 hectares ou mais. Suas faixas de área incluídas na pesquisa seguem a estratificação constante da Tabela 20, do capítulo 9. Produtores com no mínimo 320 hectares estão classificados entre as faixas de 200 hectares e de 500 hectares, que pertencem a 2% e 1% dos estabelecimentos, que são responsáveis por 27% e 14% da área colhida total, respectivamente.

disponibilizados no Censo Agropecuário de 2017 e no Produto Interno Bruto dos Municípios pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE.

A incorporação da dimensão territorial permite avaliar como a escala mínima viável e os incentivos econômicos estimados anteriormente se distribuem no espaço produtivo brasileiro. Essa abordagem evidencia as heterogeneidades estruturais que condicionam a adesão ao mercado regulado, contribuindo para a compreensão dos efeitos distributivos e da efetividade regional da política analisada.

2.4 MODELO ECONÔMICO – AGRICULTOR – CRÉDITO DE CARBONO

Esta subseção apresenta o arcabouço microeconômico utilizado para analisar a decisão do produtor rural quanto à adesão a um mercado regulado de carbono. Parte-se da hipótese de comportamento maximizador de lucro, sob a qual o produtor compara o resultado econômico esperado com e sem participação no sistema de créditos de carbono.

O modelo considera a função lucro como composta por: (i) receita da atividade produtiva principal; (ii) receita adicional proveniente da geração e comercialização de créditos de carbono; (iii) custos de adoção de práticas mitigadoras; (iv) custos de monitoramento, reporte e verificação (MRV); e (v) custos de transação associados à certificação e comercialização dos créditos.

A condição de adesão é estabelecida pela diferença entre o lucro sob participação no mercado de carbono e o lucro no cenário de referência. A decisão depende, portanto, de parâmetros críticos como o preço do crédito de carbono, a capacidade de geração de reduções certificáveis, a escala produtiva, o custo marginal de mitigação e a estrutura de custos fixos associados ao cumprimento regulatório.

O modelo permite identificar limiares econômicos de viabilidade e explicitar os determinantes microeconômicos da oferta potencial de créditos pelo setor agrícola, sob diferentes cenários de preço e exigência regulatória.

A formulação de um modelo econômico para a produção de créditos de carbono na agricultura requer a especificação detalhada de seus componentes de receita e custo. A unidade de análise comparativa é o hectare (ha). Neste modelo, o preço do carbono e o custo fixo de certificação são tratados como variáveis estocásticas, e os custos marginais de produção são considerados lineares. A seguir, a Tabela 1 lista as variáveis do modelo.

Tabela 1 - Definição de variáveis e parâmetros do modelo

Símbolo	Descrição	Unidade	Tipo	Fonte/Base
----------------	------------------	----------------	-------------	-------------------

A	Área dedicada à produção de créditos de carbono	ha	Decisão	Calculado
A_{max}	Área agrícola total disponível do produtor	ha	Restrição	Dado do produtor
$\tilde{P}$	Preço de mercado estocástico do crédito de carbono	R\$/tCO ₂ e	Parâmetro (Aleatório)	Mercado
Q_{cc}	Quantidade de créditos de carbono gerados por hectare	tCO ₂ e/ha/ano	Parâmetro	Técnico
$\tilde{C}_f$	Custo Fixo estocástico	R\$	Parâmetro (Aleatório)	Calculado
cv_{cert_ha}	Custo variável de certificação por hectare (linear), inclui custos de transação por crédito	R\$/ha	Parâmetro	Dado da certificadora
cv_{gap_ha}	Custo de adoção de boas práticas agrícolas por ha (linear)	R\$/ha	Parâmetro	Dado do produtor
Cv	Custo variável total por hectare ($cv_{cert_ha} + cv_{gap_ha}$)	R\$/ha	Parâmetro	Calculado
$\tilde{\Pi}$	Lucro estocástico do produtor	R\$	Resultado (Aleatório)	Estimativa

Fonte: elaboração própria, com base na estrutura teórica e nos parâmetros utilizados no modelo de otimização.

2.4.1 A função de receita sob incerteza de preço

A receita total R da produção de créditos de carbono é uma função da área dedicada A , da quantidade de créditos gerados por hectare Q_{cc} e do preço de mercado desses créditos, que é assumido como uma variável aleatória, $\tilde{P}$. A função de receita é expressa como:

$$R(A) = \tilde{P} \cdot Q_{cc} \cdot A \quad (11)$$

Os componentes desta função são:

- A : A área (em hectares) que o produtor decide alocar para a produção de créditos de carbono. Esta é a principal variável de decisão do produtor no modelo.
- $\tilde{P}$: O preço de mercado estocástico do crédito de carbono, expresso em unidades monetárias por tonelada de CO₂ equivalente (ex: R\$/tCO₂e). Este preço é determinado pelas forças de oferta e demanda nos mercados de carbono, que são notoriamente voláteis. O modelo assume que o produtor forma uma expectativa sobre este preço, representada pelo seu valor esperado, $E[\tilde{P}]$.
- Q_{cc} : A quantidade de créditos de carbono gerados por hectare por ano (tCO₂e/ha/ano). Este é um parâmetro técnico que representa a "produtividade" da terra em termos de sequestro de carbono. Seu valor depende da prática agrícola de baixo carbono adotada (ex: utilização de plantas de cobertura, adubação organomineral), das condições edafoclimáticas locais (tipo de solo, clima) e da metodologia de quantificação utilizada e aprovada pela certificadora. Embora tratado como um parâmetro

determinístico neste modelo para isolar o efeito da incerteza de preço e custo, é fundamental reconhecer que Q_{cc} é, na realidade, uma fonte de incerteza técnica e científica. O IPCC aponta para uma "incerteza científica persistente relacionada à eficácia das práticas que constroem o carbono do solo", o que se traduz em um risco de performance para o produtor.

A instabilidade e a imprevisibilidade do preço dos créditos $\tilde{P}$ são um fator de risco crucial para o produtor. A volatilidade, comum em mercados emergentes, como é o caso do mercado regulado a ser implantado no Brasil (SBCE), aumenta a incerteza sobre as receitas futuras e, consequentemente, o risco percebido do investimento. O modelo aborda essa questão ao focar na maximização do lucro esperado, o que é consistente com a tomada de decisão sob incerteza para um agente neutro ao risco.

2.4.2 A função de custo: componentes fixos e variáveis

A produção de créditos de carbono envolve uma estrutura de custos que pode ser decomposta em custos fixos, que possuem um componente estocástico, e custos variáveis, que são assumidos como lineares.

2.4.2.1 Custos fixos totais $\tilde{C}_f$

Os custos fixos totais são aqueles incorridos independentemente da escala do projeto (área ou quantidade de créditos), uma vez que a decisão de iniciar o processo de certificação é tomada. Eles representam uma barreira de entrada significativa. Estes são custos determinísticos associados ao estabelecimento inicial do projeto e taxas fixas cobradas pela entidade certificadora que atualmente são desconhecidos em decorrência da implantação do mercado regulado (SBCE) no nosso País.

Esses custos se restringem à transação e se referem apenas ao pagamento de taxas de certificação dos créditos de carbono no projeto específico de uma propriedade cafeeira. Como já assinalado, Vargas *et al.* (2022) apontam que o processo de reconhecimento dos créditos de carbono tem um custo bastante expressivo, especialmente decorrente da aplicação dos métodos de Mensuração, Relato e Verificação (MRV). A magnitude desses custos fixos implica a existência de economias de escala significativas: quanto maior a área do projeto, menor o custo fixo por hectare, um ponto crucial para a análise de viabilidade.

2.4.2.2 Custos variáveis lineares Cv

Os custos variáveis são aqueles que escalam com a área A dedicada ao projeto. A premissa de linearidade implica que o custo marginal de adicionar um hectare ao projeto é constante.

$$Cv = cv_{cert_ha} + cv_{gap_ha} \quad (12)$$

Onde:

- cv_{cert_ha} (Custo Variável de Certificação por Hectare): Refere-se aos custos de certificação que aumentam com a área, incluindo os custos de transação por crédito gerado. O principal componente aqui é a taxa de emissão de créditos, custos de aferição e monitoramento (coleta de amostras de solo, visitas de verificação).
- cv_{gap_ha} (Custo de Adoção de Boas Práticas Agrícolas por Hectare): Representa o custo adicional anual ou por ciclo de cultura necessário para implementar e manter as práticas que geram os créditos, em comparação com as práticas convencionais já adotadas. Este parâmetro deve incluir todos os custos incrementais diretos, tais como aquisição de insumos específicos (sementes de plantas de cobertura, fertilizantes orgânicos), mão de obra dedicada e operações mecânicas adicionais. Para fins deste modelo e em linha com as projeções de Santos e Nogueira (2025) utilizadas, assume-se que cv_{gap_ha} captura predominantemente custos diretos mensuráveis. Por exemplo, a utilização de braquiária nas entrelinhas do cafeeiro envolve custos com sementes, plantio e roçadas adicionais, os quais constituem o incremento de custo em relação ao manejo tradicional sem cobertura.

2.4.2.3 As funções de Custo Total e Marginal

Com os componentes definidos, a função de custo total estocástica é:

$$\tilde{C}(A) = \tilde{C}f + Cv \cdot A \quad (13)$$

Dada a linearidade dos custos variáveis, o Custo Marginal (CMg) é constante e determinístico:

$$CMg = \frac{d\tilde{C}(A)}{dA} = Cv$$

Esta estrutura de custo simplificada, com um custo marginal constante, é um dos principais fatores que determinarão a natureza da solução ótima do modelo, como será visto na próxima seção.

2.4.3 O problema de otimização do produtor e a solução ótima

O produtor agrícola, assumido como um agente econômico racional e neutro ao risco, busca maximizar seu lucro esperado ($E[\tilde{\Pi}]$) proveniente da produção e venda de créditos de carbono, sujeito à restrição fundamental de sua área de lavoura disponível.

2.4.3.1 A função de lucro esperado

A função de lucro estocástico ($\tilde{\Pi}(A)$) é a diferença entre a receita total estocástica ($R(A)$) e o custo total estocástico ($\tilde{C}(A)$):

$$\tilde{\Pi}(A) = R(A) - \tilde{C}(A)$$

Substituindo as expressões para $R(A)$ e $\tilde{C}(A)$ das equações (11) e (13):

$$\tilde{\Pi}(A) = (\tilde{P} \cdot Q_{cc} \cdot A) - (\tilde{C}f + Cv \cdot A)$$

Agrupando os termos que dependem de A :

$$\tilde{\Pi}(A) = (\tilde{P} \cdot Q_{cc} - Cv) \cdot A - \tilde{C}f$$

Para simplificar a notação, define-se $\widetilde{P_{net}}$ como a receita líquida marginal estocástica por hectare, que é a margem de contribuição de cada hectare para cobrir os custos fixos:

$$\widetilde{P_{net}} = \tilde{P} \cdot Q_{cc} - Cv$$

Assim, a função de lucro estocástico torna-se mais compacta:

$$\tilde{\Pi}(A) = \widetilde{P_{net}} \cdot A - \tilde{C}f$$

O produtor, sendo neutro ao risco, toma sua decisão com base na maximização do valor esperado desta função. Aplicando o operador de expectativa, obtemos a função de lucro esperado:

$$E[\tilde{\Pi}(A)] = E[\widetilde{P_{net}}] \cdot A - E[\tilde{C}f] \quad (14)$$

Onde $E[\widetilde{P_{net}}] = E[\tilde{P}] \cdot Q_{cc} - Cv$ é a receita líquida marginal esperada por hectare. A função objetivo do produtor é, portanto, uma função linear da variável de decisão A :

$$E[\tilde{\Pi}(A)] = (E[\tilde{P}] \cdot Q_{cc} - Cv) \cdot A - E[\tilde{C}f]$$

O problema de otimização do produtor pode ser formalmente declarado como:

$$\max_A E[\tilde{\Pi}(A)] = (E[\tilde{P}] \cdot Q_{cc} - Cv) \cdot A - E[\tilde{Cf}]$$

Sujeito a:

1. $A \leq A_{max}$ (Restrição de área máxima disponível)
2. $A \geq 0$ (Restrição de não-negatividade da área)

A primeira restrição, $A \leq A_{max}$, é a limitação física (de área) da lavoura na propriedade do agricultor. A área dedicada à geração de créditos de carbono não pode exceder a área total disponível para tal atividade. A segunda restrição, $A \geq 0$, garante que a solução seja economicamente significativa, pois não é possível alocar uma área negativa.

2.4.3.2 Derivação e interpretação da área ótima (A^*)

Dado que a função objetivo é linear em A e o espaço de escolha é um intervalo fechado $[0, A_{max}]$, a solução para este problema de otimização será, por natureza, uma "solução de canto". Isso significa que a área ótima, A^* , será ou o valor mínimo possível (zero) ou o valor máximo possível (A_{max}). A decisão depende inteiramente do sinal do coeficiente que multiplica a variável de decisão A , ou seja, o sinal da receita líquida marginal esperada, $E[\tilde{P}_{net}]$.

A análise é a seguinte:

- Caso 1: A receita líquida marginal esperada é positiva.

Se $E[\tilde{P}_{net}] = E[\tilde{P}] \cdot Q_{cc} - Cv > 0$, a função de lucro esperado $E[\tilde{\Pi}(A)]$ é uma função estritamente crescente em A . Cada hectare adicional dedicado à produção de créditos aumenta o lucro esperado total. Portanto, para maximizar seu lucro esperado, o produtor racional deve alocar a maior área possível para essa atividade. A solução ótima é:

$$A^* = A_{max}$$

- Caso 2: A receita líquida marginal esperada é negativa ou nula.

Se $E[\tilde{P}_{net}] = E[\tilde{P}] \cdot Q_{cc} - Cv \leq 0$, a função de lucro esperado $E[\tilde{\Pi}(A)]$ é uma função não crescente em A . Cada hectare adicional ou diminui o lucro esperado (se a desigualdade for estrita) ou o deixa inalterado (se for igual a zero). Em qualquer um desses cenários, a melhor decisão para o produtor é não dedicar nenhuma área à atividade de sequestro de carbono. A solução ótima é:

$$A^* = 0$$

A interpretação econômica desta solução é direta e poderosa em sua simplicidade. Se, na expectativa, a receita marginal por hectare ($E[\tilde{P}] \cdot Q_{cc}$) excede o custo marginal por hectare (Cv), a atividade é marginalmente lucrativa, e o produtor deve expandi-la ao seu limite físico (A_{max}). Se a receita marginal esperada não cobre o custo marginal, a atividade é marginalmente deficitária, e o produtor não deve empreendê-la ($A^* = 0$). A linearidade dos custos marginais elimina a possibilidade de uma solução interior ($0 < A^* < A_{max}$), que só ocorreria no caso de custos marginais crescentes, onde a expansão da área se tornaria progressivamente mais cara até que o custo marginal igualasse a receita marginal.

Tabela 2 - Resumo da condição de otimalidade e interpretação econômica

Condição Matemática	Variável Associada	Interpretação Econômica	Implicação para A^*
$E[\tilde{P}_{net}] > 0$	A, A^*	A receita líquida marginal esperada por hectare é positiva. Cada hectare adicional aumenta o lucro esperado.	$A^* = A_{max}$ O produtor dedica toda a área disponível.
$E[\tilde{P}_{net}] \leq 0$	A, A^*	A receita líquida marginal esperada por hectare é negativa ou nula. Cada hectare adicional diminui ou não altera o lucro esperado (que já seria $-Cf$ se $A > 0$).	$A^* = 0$ O produtor não dedica nenhuma área à produção de créditos.
$A \leq A_{max}$	A	A área utilizada não pode exceder a área disponível.	Define o limite superior para A^* .
$A \geq 0$	A	A área utilizada não pode ser negativa.	Garante uma solução economicamente significativa.

Fonte: elaboração própria, com base nos resultados analíticos do modelo teórico proposto.

2.5 FATURAMENTO DA CAFEICULTURA ORGÂNICA EM NÍVEL MUNICIPAL

Esta subseção descreve a estratégia empírica utilizada para avaliar os efeitos econômicos da produção orgânica. São utilizados dados municipais para estimar: faturamento agregado; indicadores de desempenho econômico; e associação entre produção certificada e receita. A abordagem pode incluir regressões econométricas, conforme especificado no artigo correspondente.

Para investigar a evolução do impacto da cafeicultura orgânica no faturamento municipal, este estudo utiliza dados públicos dos Censos Agropecuários de 2006 e 2017 e emprega uma estratégia de identificação quasi-experimental dupla.

2.5.1 Fonte de dados e variáveis

A análise baseia-se em dados agregados em nível municipal, extraídos de tabelas dos Censos Agropecuários de 2006 e 2017, disponibilizadas pelo SIDRA/IBGE. Foi construído um painel de dados balanceado, combinando as informações dos dois períodos. As principais variáveis utilizadas, conforme detalhado no relatório de pesquisa, são:

- Variável de Resultado: O logaritmo do faturamento médio por tonelada ($\log_faturmedio$), calculado a partir do valor total da produção de café e da quantidade vendida em cada município.
- Variável de Tratamento: Uma variável binária ($algum_organico$) que assume valor 1 se o município registrou qualquer estabelecimento com produção de café orgânico no respectivo ano do censo, e 0 caso contrário.

Variáveis de Controle: Para isolar o efeito da produção orgânica, foi incluído um conjunto de variáveis que capturam características estruturais e tecnológicas dos municípios que podem influenciar o faturamento, tais como: a predominância do café Arábica (*Arabica*), a área média das propriedades de café (*Areamedia_cafe*), a proporção de estabelecimentos com irrigação (*irriga_share*), com mecanização (*maquina_share*), que recebem assistência técnica (*share_orienta*) e um índice de escolaridade do produtor (*indice_escolar*).

A análise empírica combina duas abordagens econométricas para fornecer uma visão completa do fenômeno, descritas a seguir.

2.5.2 Propensity Score Matching (PSM) para o Efeito Médio

Para estimar o efeito médio da presença de produção de café orgânico sobre o faturamento municipal ao longo de todo o período (2006-2017), foi empregado o método de *Propensity Score Matching* (PSM). O PSM é uma técnica quasi-experimental que visa mitigar o viés de seleção em estudos observacionais, construindo um grupo de controle estatisticamente comparável ao grupo de tratamento com base em características observáveis (Rosenbaum e Rubin, 1983). A lógica central do método é que, em vez de parear unidades (municípios, neste caso) com base em um vetor multidimensional de características, pode-se pará-las com base em uma única variável escalar: o *propensity score*, definido como a probabilidade condicional de receber o tratamento, dado um conjunto de covariáveis.

No contexto deste estudo, o tratamento é definido pela variável binária $algum_organico$, que assume valor 1 se o município registrou, em determinado ano censitário, pelo menos um estabelecimento com produção de café orgânico, e 0 caso contrário. A variável de resultado é o logaritmo do faturamento médio por tonelada ($\log_faturmedio$), conforme detalhado na seção 2.5.1.

A validade do PSM repousa sobre duas hipóteses fundamentais:

- **Independência Condicional:** Assume-se que, condicional ao conjunto de covariáveis observáveis X , a participação no tratamento (ter produção orgânica) é independente dos resultados potenciais. Em outras palavras, supõe-se que todas as variáveis que afetam simultaneamente a probabilidade de um município ter produção orgânica e o seu faturamento foram incluídas no modelo. Esta é uma hipótese forte e não testável empiricamente, sendo a principal limitação do método. No entanto, a inclusão de um conjunto abrangente de covariáveis estruturais e tecnológicas (detalhadas adiante) busca tornar esta hipótese a mais plausível possível.
- **Suporte Comum:** A hipótese de suporte comum requer que, para cada valor do vetor de covariáveis X , exista uma probabilidade positiva de um município pertencer tanto ao grupo de tratamento quanto ao grupo de controle. Isso garante que haja municípios comparáveis em ambos os grupos para cada estrato do *propensity score*, evitando comparações baseadas em extrapolações fora da região de suporte. Neste estudo, verificação empírica indicou que os municípios tratados permaneceram na região de suporte comum. Em termos formais:

$$0 < P(D_{it} = 1 | X_{it}) < 1$$

A aplicação do método PSM, baseada em Imbens e Rubin (2015), seguiu quatro passos que estão descritos a seguir.

1. Estimação do Escore de Propensão

O primeiro passo consistiu em estimar a probabilidade de um município apresentar produção de café orgânico. Para tanto, ajustou-se um modelo de regressão logística (logit) utilizando os dados combinados dos Censos de 2006 e 2017. A variável dependente foi *algum_organico*. Com base na literatura e na disponibilidade de dados, selecionou-se um conjunto de covariáveis (X) que capturam características estruturais e tecnológicas dos municípios, as quais poderiam influenciar tanto a adoção da produção orgânica quanto o nível de faturamento. O modelo de escore de propensão foi especificado como:

$$\begin{aligned} P(\text{algum_organico}_{it} = 1 | X_{it}) \\ = \Lambda(\beta_0 + \beta_1 \text{Arabica}_{it} + \beta_2 \text{Areamedia_cafe}_{it} + \beta_3 \text{irriga_share}_{it} \\ + \beta_4 \text{maquina_share}_{it} + \beta_5 \text{share_oienta}_{it} + \beta_6 \text{indice_escolar}_{it} + \epsilon_{it}) \end{aligned}$$

Onde:

- Λ é a função de distribuição logística cumulativa.
- Os subscritos i e t representam o município e o ano (2006 ou 2017), respectivamente.
- As covariáveis são aquelas definidas na seção 2.5.1: Arabica (proporção da área de café arábica), Areamedia_cafe (área média dos estabelecimentos de café), irriga_share (proporção de estabelecimentos com irrigação), maquina_share (proporção com mecanização), share_orienta (proporção que recebe assistência técnica) e indice_escolar (índice de escolaridade dos produtores).

2. Procedimento de Pareamento e Estimação do ATT

Com os propensity scores estimados para todos os municípios na amostra combinada, procedeu-se ao pareamento. Optou-se pelo algoritmo de vizinho mais próximo com reposição como método principal. Esse algoritmo pareia cada município tratado com um ou mais municípios de controle que possuam o escore de propensão mais próximo, permitindo que um mesmo controle seja utilizado para múltiplos tratados. Como forma de verificar a robustez dos resultados, empregou-se também o algoritmo *kernel matching*, que utiliza uma média ponderada de todos os controles para construir o contrafactual, atribuindo maior peso àqueles com escores mais próximos. Esta abordagem alternativa tem a vantagem de utilizar mais informações e geralmente resultar em menor variância do estimador.

O parâmetro de interesse estimado é o Efeito Médio do Tratamento sobre os Tratados (ATT). O ATT mede o impacto médio da presença de cafeicultura orgânica sobre o log do faturamento por tonelada para o grupo de municípios que efetivamente apresentaram essa produção. O ATT é calculado como a diferença média na variável de resultado entre o grupo de tratamento e o seu respectivo grupo de controle pareado:

$$ATT = E[Y_{it}(1) - Y_{it}(0) | D_{it} = 1]$$

Dessa forma, o ATT corresponde à diferença média entre o log do faturamento observado nos municípios com produção orgânica e o log do faturamento estimado para esses mesmos municípios caso não tivessem adotado a produção orgânica, com base no grupo de controle pareado. A significância estatística do ATT foi avaliada com base nos erros padrão estimados pelo procedimento de pareamento.

3. Verificação do Balanceamento

A credibilidade das estimativas do PSM depende crucialmente da qualidade do pareamento, ou seja, da capacidade do procedimento em equilibrar a distribuição das covariáveis entre os grupos de tratamento e controle após o pareamento. Para verificar essa

condição, realizou-se um teste de balanceamento. Este teste compara as médias das covariáveis entre os dois grupos na amostra pareada, calculando o viés padronizado (em %) e testando a significância estatística das diferenças. Espera-se que, após um pareamento bem-sucedido, as diferenças sejam pequenas (idealmente com viés padronizado inferior a 5-10%) e preferencialmente não significativas. A literatura também considera aceitável um balanceamento global representado pela estatística B de Rubin inferior a 25% (Rubin, 2001), indicando que os grupos são comparáveis em termos das características observáveis.

4. Análise de Robustez

Como forma de verificar a robustez dos resultados encontrados pelo PSM, adotaram-se três estratégias complementares. Primeiro, compararam-se as estimativas obtidas com diferentes algoritmos de pareamento (vizinho mais próximo e *kernel matching*). Segundo, testou-se uma especificação alternativa do modelo de escore de propensão, incluindo termos quadráticos para a variável *Areamedia_cafe* e interações entre covariáveis, avaliando-se a sensibilidade do ATT a essa escolha.

Terceiro, realizou-se uma análise de sensibilidade para avaliar a vulnerabilidade das estimativas à presença de um fator não observado que afete simultaneamente a probabilidade de tratamento e o resultado. Utilizou-se o procedimento *sensatt* (Rosenbaum bounds adaptado), que simula a inclusão de um confundidor binário e verifica a estabilidade do ATT. A consistência dos resultados entre essas diferentes especificações e testes reforça a confiança de que o efeito estimado não é um artefato de uma escolha metodológica particular.

2.5.3 Diferenças em Diferenças (DiD) para a Análise Dinâmica

Para testar a hipótese de "erosão do prêmio" e investigar a evolução temporal do diferencial de faturamento associado à produção orgânica, foi estimado um modelo de Diferenças em Diferenças com efeitos fixos. A estrutura de painel dos dados, com observações para os anos de 2006 e 2017, permite comparar a mudança no faturamento ao longo do tempo entre o grupo de tratamento (municípios que registraram produção orgânica em pelo menos um dos períodos) e o grupo de controle (municípios que nunca registraram produção orgânica), controlando por características não observadas constantes no tempo.

A adoção de efeitos fixos é crucial neste contexto, pois elimina o viés decorrente de heterogeneidade não observada que possa estar correlacionada tanto com a probabilidade de adoção da produção orgânica quanto com o faturamento. Características como qualidade do

solo, aptidão climática, tradição agrícola regional e infraestrutura são exemplos de fatores que, se não controlados, poderiam comprometer a identificação causal.

A especificação estimada é dada por:

$$\log(\text{faturamento}_{iet}) = \beta(\text{censo2017}_t \times \text{algum_organico}_{ie}) + \alpha_{ie} + \gamma_t + X_{iet}\delta + \varepsilon_{iet}$$

onde:

- i , e e t representam município, espécie e ano (2006 ou 2017), respectivamente;
- censo2017_t é uma dummy temporal, igual a 1 para o ano de 2017;
- $\text{algum_organico}_{ie}$ indica a presença de pelo menos um estabelecimento com produção orgânica naquela combinação município–espécie;
- α_{ie} representa efeitos fixos específicos de município×espécie;
- γ_t representa efeitos fixos de período;
- X_{iet} é o vetor de variáveis de controle: proporção de estabelecimentos com irrigação (irriga_share), área média dos estabelecimentos de café (Areamedia_cafe), proporção com armazéns/silos (armazem_share), proporção com máquinas (maquina_share), proporção que recebe assistência técnica (share_orienta) e índice de escolaridade dos produtores (indice_escolar). A inclusão dessas covariáveis aumenta a precisão das estimativas e controla para fatores observáveis que possam influenciar o faturamento.;
- ε_{iet} é o termo de erro idiossincrático.

O coeficiente de interesse é β , associado ao termo de interação entre período e tratamento. Ele mede a variação diferencial no log do faturamento entre unidades com e sem produção orgânica ao longo do tempo, conforme discutido por Angrist e Pischke (2009). A inclusão de efeitos fixos α_{ie} elimina diferenças estruturais invariantes no tempo entre municípios, diferenças persistentes entre espécies dentro do mesmo município; e qualquer heterogeneidade fixa associada à propensão histórica à produção orgânica. Dessa forma, a identificação de β decorre exclusivamente da variação temporal intra-unidade, isto é, de mudanças no faturamento dentro da mesma combinação município–espécie entre 2006 e 2017. Essa especificação corresponde a um modelo two-way fixed effects (TWFE) em painel curto.

Para assegurar a validade das inferências, foram adotados procedimentos robustos de estimação. Os erros padrão foram clusterizados no nível do município (Cod_mun), conforme

recomendam Cameron e Miller (2015), permitindo correlação intra-município ao longo do tempo e entre as duas espécies.

Adicionalmente, foram realizados dois testes de robustez. O teste placebo *in-space* (didplacebo) atribui artificialmente o tratamento a unidades falsas (municípios que nunca tiveram produção orgânica) e reestima o modelo repetidamente (500 replicações), gerando uma distribuição de coeficientes placebos. A posição do coeficiente verdadeiro nessa distribuição permite avaliar se o efeito estimado poderia ter ocorrido por acaso.

E, em segundo lugar, foi realizado o teste *Wild cluster bootstrap*, método adequado para modelos com número moderado de clusters, proposto por Cameron, Gelbach e Miller (2008). Esse teste relaxa a suposição de normalidade dos erros e proporciona inferência mais confiável em amostras finitas. No presente estudo, foram realizadas 9.999 replicações.

Essa estratégia empírica possibilita estimar o diferencial de faturamento associado à produção orgânica em nível municipal, controlando rigorosamente por características observáveis e não observáveis. Os resultados constituem evidência quantitativa sobre a dinâmica do prêmio econômico associado à base ecológica, elemento central para a avaliação dos incentivos privados à adoção de práticas ambientalmente diferenciadas e para o desenho de políticas públicas de apoio à sustentabilidade na cafeicultura.

2.6 EXPECTATIVA DE RECEITA ADICIONAL DA ROTULAGEM

Aqui apresenta-se a metodologia empregada para estimar o prêmio de preço associado à rotulagem ambiental ou certificação. A estratégia envolve: construção de base de dados de exportações ou comercialização; identificação de diferenciais de preço; estimação econométrica do prêmio associado à certificação. O objetivo é mensurar incentivos privados à adoção de práticas ambientalmente sustentáveis.

Para estimar o impacto da adoção de sistema de produção de base ecológica¹⁵ no faturamento dos cafeicultores, este estudo utiliza uma abordagem quantitativa baseada em microdados e um método econométrico quasi-experimental.

¹⁵ A análise se concentra em um grupo de tratamento composto por produtores de café cuja modalidade de agricultura foi classificada, nos dados de financiamento do Banco Central, como “Orgânica” ou “Agroecológica/Sintrópica”. Esse agrupamento é necessário para garantir um tamanho de amostra estatisticamente robusto para a análise de inferência causal (*Propensity Score Matching*). É importante ressaltar que, embora analisados em conjunto, os termos não são sinônimos. A agricultura orgânica, regulamentada pela Lei nº 10.831/2003, foca na substituição de insumos sintéticos e pode incluir monoculturas (Brasil, 2003). A agroecologia, por sua vez, representa um paradigma mais amplo que envolve o redesenho holístico do agroecossistema com fortes componentes sociais, políticos e de promoção da biodiversidade, sendo fomentada,

2.6.1 Fonte de Dados e Construção da Amostra Analítica

A análise empírica baseia-se nos microdados de operações de financiamento do Crédito Rural e do Proagro, disponibilizados publicamente pelo Banco Central do Brasil. A base de dados consolidada abrange todas as operações de custeio para a cultura de café realizadas no Brasil entre 1 de janeiro de 2014 e 31 de dezembro de 2023, totalizando 665.986 registros de financiamento.

A construção da base de dados consolidada demandou um extenso trabalho de extração e tratamento dos microdados. Os dados brutos foram obtidos junto ao Banco Central do Brasil para cada ano individualmente, inicialmente no período de 2013 a 2023, totalizando 11 arquivos anuais distintos no formato CSV. Para cada ano, foram aplicados filtros específicos para selecionar apenas as operações relacionadas à cafeicultura, identificadas através dos códigos de empreendimento correspondentes às lavouras de café Arábica (códigos: 12011580048041, 12011580048043, 12011580048051, 12011580048042, 12011580048052) e Conilon (códigos: 12011580260043, 12011580260051, 12011580260042, 12011580260041, 12011580260052). Este processo de filtragem e consolidação foi realizado por meio de scripts específicos desenvolvidos em Stata, detalhados nos Apêndices 1 e 2.

Conforme procedimento documentado no registro de obtenção de dados, os registros do ano de 2013 foram excluídos da análise devido a valores atípicos e discrepantes na receita média esperada. A receita média por tonelada para 2013 apresentou valores incompatíveis com a série histórica (atingindo aproximadamente R\$ 2.000 por quilo, enquanto nos demais anos manteve-se em torno de R\$ 10 por quilo), indicando possíveis problemas de consistência nos dados desse ano específico.

Dessa forma, a análise final concentra-se no período de 2014 a 2023, compreendendo 10 anos de dados consistentes. Embora a base consolidada contenha 665.986 operações após a exclusão de 2013, a estimação econométrica utiliza 658.060 observações, em função da exclusão automática de registros com valores ausentes na variável de receita por tonelada.

A partir dos dados brutos, foram construídas as variáveis centrais para a análise:

- Variável de Resultado: A variável dependente de interesse é o logaritmo natural da receita bruta esperada por tonelada (LOGreceitaPORTonelada). Ela foi calculada

juntamente com a produção orgânica, pela Política Nacional de Agroecologia e Produção Orgânica (PNAPO) (Brasil, 2012).

dividindo-se o valor da receita bruta esperada da lavoura (*vl_receita_bruta_esperada*) pela quantidade de produção prevista (*vl_prev_prod*), ambas declaradas na operação de crédito. A transformação logarítmica é utilizada para normalizar a distribuição da variável, que possui alta assimetria, e para permitir que os coeficientes da regressão sejam interpretados como variações percentuais (semi-elasticidade).

- **Variável de Tratamento:** A variável que define o tratamento é uma *dummy* binária (*organica*). Ela assume o valor 1 se a operação de crédito foi classificada no campo *cd_tipo_agricultura* com os códigos 8 ("Orgânico") ou 9 ("Agroecológico/Sintrópico"), e 0 para os demais casos, que representam a cafeicultura convencional. Na amostra final, foram identificados 280 registros de financiamento pertencentes ao grupo de tratamento. É importante notar que esta classificação do financiamento é utilizada como uma proxy para a rotulagem do café produzido, partindo-se do pressuposto de que uma operação de crédito definida como "Orgânico" ou "Agroecológico" corresponde a um produtor que opera sob tais sistemas.
- **Covariáveis:** Para controlar por características observáveis que podem influenciar tanto a decisão de adotar sistemas de produção de base ecológica quanto a receita obtida, foi selecionado um conjunto de variáveis de controle. Essas variáveis incluem: *especie* (uma *dummy* que assume valor 1 para café Arábica e 0 para Conilon), *vl_area_informada* (a área em hectares da propriedade, utilizada como proxy para o porte do produtor), *irriga* (uma *dummy* que indica o uso de sistema de irrigação) e *ano* (variáveis indicadoras para cada ano da amostra, para capturar choques macroeconômicos ou climáticos anuais que afetam todos os produtores).

Uma ressalva importante concerne à natureza da variável de resultado. A *LOGreceitaPORtonelada* é uma medida *ex-ante* derivada de expectativas de receita e produção declaradas no momento da solicitação do financiamento, e não de valores realizados *ex-post*. Esta característica é inerente à fonte de dados, que captura o potencial econômico da lavoura como base para a concessão de crédito.

Consequentemente, a análise estima o impacto da certificação sobre a receita bruta esperada, que é a variável relevante para a decisão de investimento do produtor no momento de obter o empréstimo. Embora se espere uma correlação forte entre expectativas e realizações, a possibilidade de otimismo ou pessimismo dos produtores nas suas projeções é uma limitação inerente aos dados, que deve ser considerada na interpretação dos resultados.

É crucial ponderar como vieses sistemáticos nas próprias expectativas poderiam influenciar os resultados. Por exemplo, é plausível que os produtores que buscam a certificação de base ecológica (um processo que exige planejamento de longo prazo e acesso a mercados de nicho) sejam inerentemente mais otimistas ou possuam melhor capacidade de projeção de receitas futuras. Alternativamente, as instituições financeiras poderiam exigir, para projetos de base ecológica, projeções de receita mais robustas como forma de mitigar um risco percebido como mais elevado. Se tais vieses existirem, o prêmio de 30,1% estimado deve ser interpretado estritamente como o impacto da certificação sobre o potencial de faturamento declarado e aceito no momento da contratação do crédito, não necessariamente sobre o valor realizado. Embora se espere uma alta correlação entre o esperado e o realizado, o presente estudo não pode descartar a possibilidade de que parte do efeito capturado se deva a diferenças sistemáticas nas projeções entre os grupos.

Com relação às covariáveis, sua seleção baseou-se em seu potencial de influenciar tanto a decisão de adotar sistemas de base ecológica quanto a receita esperada, conforme estabelecido pela literatura e pela lógica econômica. Variáveis adicionais, como a localização geográfica (região ou estado), seriam de grande interesse para controlar efeitos de *terroir* e acesso a mercados. No entanto, a inclusão de efeitos fixos espaciais não foi possível devido a restrições de identificação na base de dados e à necessidade de preservar o suporte comum no pareamento. Esta limitação é apresentada com maior profundidade na seção de discussão dos resultados, onde avaliamos seu potencial impacto sobre as estimativas.

A Tabela 3 apresenta as estatísticas descritivas da amostra não pareada, evidenciando as diferenças sistemáticas entre os grupos de tratamento (base ecológica) e controle (convencional) antes da aplicação do método de pareamento. A existência dessas diferenças estatisticamente significativas confirma a presença de viés de seleção e justifica a necessidade de uma estratégia de identificação mais robusta do que uma simples comparação de médias ou uma regressão linear.

Tabela 3 - Estatísticas descritivas das variáveis de análise (amostra não pareada)

Variável	Grupo	Média	Desvio Padrão	Viés Padronizado (%)	Valor-p
Receita por tonelada (R\$)	Orgânico	11.009,98	8.405,52	-	< 0,01
	Convencional	10.091,74	162.398,10		
Espécie arábica	Orgânico	0,842	0,365	4,0%	0,024
	Convencional	0,828	0,377		
Área informada (ha)	Orgânico	9,94	24,01	4,0%	0,150
	Convencional	8,99	30,14		

Irrigação	Orgânico	0,194	0,396	12,0%	< 0,01
	Convencional	0,148	0,355		
Ano	Orgânico	2018,7	2,68	21,50%	< 0,01
	Convencional	2018,6	2,8		

Fonte: elaboração própria, com base nos microdados do Banco Central do Brasil (2025).

Notas: 1. Amostra: 279 observações para orgânico; 657.778 para convencional. 2. O viés padronizado mede diferenças normalizadas entre grupos para covariáveis (Imbens e Rubin, 2015). 3. Valores absolutos de viés >5% indicam desbalanceamento relevante. 4. A variável "Ano" foi tratada como contínua para o cálculo do viés padronizado, conforme procedimento no Apêndice 2. No modelo de pareamento, no entanto, seu efeito foi controlado por meio de variáveis indicadoras anuais.

2.6.2 Estratégia de Identificação: O Método PSM

Para superar o desafio do viés de seleção, este estudo também emprega o método *Propensity Score Matching* (PSM), de forma semelhante à seção 2.5.2. As duas hipóteses fundamentais que validam o PSM são descritas abaixo com as especificidades da sua aplicação no objeto de estudo desta seção, ou seja, a estimativa da receita adicional da agricultura orgânica/agroecológica com base em microdados de cafeicultores:

- **Independência Condicional:** Assume-se que, condicional a um conjunto de covariáveis observáveis X , a decisão de tratamento T é independente dos resultados potenciais Y . Em outras palavras, supõe-se que todas as variáveis que afetam simultaneamente a adoção de sistemas de produção de base ecológica e a receita do produtor foram incluídas no modelo. Esta é uma hipótese forte e não testável, sendo a principal limitação do método. No contexto específico deste estudo, reconhece-se que a decisão do produtor pela certificação pode, em tese, estar correlacionada com suas expectativas de receita futura. Contudo, argumentamos que a relação não é direta ou automática, pois a adoção de sistemas de base ecológica envolve um processo complexo e antecipado, condicionado por fatores como custos de transição, adequação técnica e acesso a mercados diferenciados, os quais influenciam a expectativa de receita declarada no momento do crédito. As covariáveis observáveis incluídas no modelo (espécie, área, irrigação e ano) capturam dimensões importantes da capacidade produtiva e do perfil de investimento que afetam tanto a decisão de certificar quanto a receita esperada. A robustez do balanceamento alcançado após o pareamento e a consistência dos resultados com a análise de painel reforçam a plausibilidade de que a hipótese de independência condicional seja razoável dentro dos limites dos dados disponíveis, ainda que não possa ser empiricamente verificada de forma definitiva.

- Suporte Comum: A hipótese de suporte comum requer que, para qualquer conjunto de características X , exista uma probabilidade positiva tanto de receber quanto de não receber o tratamento. Isso garante que existam indivíduos comparáveis em ambos os grupos para cada estrato do *propensity score*.

A implementação do PSM também se baseou em Imbens e Rubin (2015), conforme os passos descritos a seguir:

1. Estimação do Escore de Propensão: Utilizou-se um modelo de regressão logística (logit) para estimar a probabilidade de um produtor ser classificado como *organica* = 1. O modelo final escolhido (correspondente ao PSM_AEI no relatório de análise) foi:

$$P(\text{organica}_i = 1 | X_i) = \Lambda(\beta_0 + \beta_1.\text{especie}_i + \beta_2.\text{vlarea}_i + \beta_3.\text{irriga}_i + \beta_4.\text{ano}_i)$$

onde Λ é a função de distribuição logística cumulativa e X_i é o vetor de covariáveis para o produtor i .

2. Pareamento: Com os escores de propensão estimados para todos os produtores, aplicou-se o algoritmo de pareamento do vizinho mais próximo (*nearest neighbor matching*) na modalidade 1:1 e sem reposição. Este método seleciona, para cada produtor do grupo de tratamento, o produtor do grupo de controle com o escore de propensão mais próximo, formando um par único. Não foi imposto um *caliper* (diferença máxima permitida entre os escores de um par), uma vez que o teste de balanceamento pós-pareamento, apresentado adiante, demonstrou equilíbrio entre os grupos mesmo sem essa restrição. O modelo final, denominado PSM_AEI, que inclui as covariáveis *especie*, *vl_area_informada*, *irriga* e *ano*, foi o que apresentou o melhor desempenho em termos de balanceamento e será o base para uma inferência causal.
3. Estimação do Efeito: Após o pareamento, o efeito de interesse é estimado. O parâmetro estimado é o Efeito Médio do Tratamento sobre os Tratados (ATT), que mede o impacto médio da adoção de sistemas de base ecológica para o grupo de cafeicultores que efetivamente adotou. O ATT é calculado como a diferença média na variável de resultado (LOGreceitaPORtonelada) entre o grupo de tratamento e o grupo de controle pareado:

$$ATT = E_T - E_C$$

Ao longo da análise, foram testadas múltiplas especificações para o modelo de escore de propensão, variando o conjunto de covariáveis incluídas, conforme detalhado no relatório técnico suplementar, incluído no Apêndice 7, e no código de replicação de resultados do

Apêndice 8 desta tese. O modelo final, denominado PSM_AEI, que inclui as covariáveis *especie*, *vl_area_informada*, *irriga* e *ano*, foi selecionado por apresentar o melhor desempenho em termos de balanceamento pós-pareamento. Conforme demonstrado na Tabela 16, do capítulo 8, esta especificação foi a que reduziu mais eficazmente o viés padronizado para todas as covariáveis a níveis insignificantes (abaixo de 1,5%) e resultou em testes de diferença de médias não significativos (p -valores $> 0,80$).

Modelos alternativos, como os que incluíam efeitos fixos de ano (*i.ano*), não alcançaram um nível de balanceamento comparável, comprometendo a validade da hipótese de independência condicional. No modelo de escore de propensão selecionado, a variável *ano* foi incluída como covariável contínua, e não como conjunto de dummies, com o objetivo de preservar suporte comum e melhorar o balanceamento. Portanto, a escolha do PSM_AEI baseou-se no critério empírico de maximizar a comparabilidade estatística entre os grupos de tratamento e controle, fortalecendo a validade interna da estimativa.

2.6.3 Estratégia de Identificação: Dados em Painel

Com objetivo de robustecer a análise e explorar a natureza longitudinal dos dados, foi conduzida uma análise de dados em painel. Esta abordagem permite controlar para heterogeneidade não observada invariante no tempo entre os produtores, complementando as estimativas do PSM.

Inicialmente, identificou-se a presença de valores de tempo repetidos dentro dos painéis, o que exigiu a criação de um identificador de tempo único (*time_id*) para configurar adequadamente a estrutura do painel. O teste de Hausman ($\chi^2 = 419,43$; $p = 0,0000$) sugere a rejeição da hipótese nula de que os efeitos aleatórios são consistentes, indicando que o modelo de efeitos fixos é mais apropriado.

Contudo, a especificação de efeitos fixos duplos (produtor e ano) resultou na perda de 649.725 observações devido a *singletons*, produtores que não se repetiam no tempo, o que reduz a precisão das estimativas devido ao aumento da variância associado à menor dimensão amostral. Diante desse trade-off, optou-se por um modelo de efeitos fixos de ano, que preserva a amostra completa (658.060 observações) e controla para fatores temporais comuns que afetam todos os produtores simultaneamente.

O modelo final, estimado¹⁶ com erros padrão clusterizados no nível do produtor, é especificado como:

$$\begin{aligned} LOGreceitaPORtonelada_{it} \\ = \beta_0 + \beta_1 organica_{it} + \beta_2 especie_{it} + \beta_3 vl_area_informada_{it} \\ + \beta_4 irriga_{it} + \alpha_t + \epsilon_{it} \end{aligned}$$

onde α_t são efeitos fixos de ano e ϵ_{it} é o termo de erro.

A estimação do modelo de dados em painel com efeitos fixos de ano foi realizada utilizando o comando `reghdfe` do Stata, com erros padrão clusterizados no nível do produtor (`ref_bacen`).

As evidências obtidas por meio da estratégia de identificação empírica oferecem subsídios quantitativos para a modelagem teórica da decisão do produtor sob instrumentos voluntários. A seção subsequente formaliza essa decisão em termos microeconômicos, incorporando explicitamente a receita adicional estimada e a estrutura de custos associada à certificação e rotulagem.

2.7 MODELO ECONÔMICO DE DECISÃO DO PRODUTOR – ROTULAGEM

Esta subseção apresenta o modelo microeconômico empregado para analisar a decisão do produtor quanto à adoção de instrumentos voluntários de certificação e rotulagem ambiental. Assume-se comportamento maximizador de lucro, no qual a adesão ocorre quando o prêmio de mercado esperado compensa os custos adicionais de adequação e certificação.

A função lucro incorpora: (i) receita da atividade produtiva convencional; (ii) receita adicional associada ao prêmio de preço obtido via diferenciação de produto; (iii) custos de adequação tecnológica e de cumprimento de protocolos; (iv) custos de certificação e auditoria; e (v) eventuais custos de coordenação e transação vinculados à inserção em mercados diferenciados.

A condição de adoção é definida pela comparação entre o lucro com certificação e o lucro no sistema produtivo convencional. A decisão depende de fatores como magnitude e estabilidade do prêmio de preço, elasticidade da demanda por atributos ambientais, escala de produção, estrutura de custos e grau de exigência dos protocolos de certificação. O modelo permite explicitar os determinantes econômicos da oferta de produtos diferenciados e avaliar

¹⁶ Por meio do comando “`reghdfe`” do STATA.

sob quais condições a rotulagem ambiental constitui estratégia racional de agregação de valor para o produtor.

Para analisar formalmente a decisão do produtor, o modelo é construído com base na teoria da firma, assumindo um agente que busca maximizar o lucro em um ambiente de incerteza. A unidade de análise é a quantidade do produto agrícola, que no presente caso do café será considerada saca de 60 kg. A Tabela 4 define as variáveis e parâmetros utilizados.

Tabela 4 - Variáveis e parâmetros do modelo de rotulagem

Símbolo	Descrição	Unidade	Tipo
q	Quantidade de produto com rótulo carbono neutro	saca de 60 kg	Decisão
q_{max}	Capacidade máxima de produção do produtor	saca de 60 kg	Restrição
$Padd$	Receita adicional (prêmio) estocástica por unidade	R\$/unidade	Parâmetro (Aleatório)
Cf_{cert}	Custo Fixo estocástico de certificação	R\$	Parâmetro (Aleatório)
Cf_{trans}	Custo Fixo de transição (investimentos iniciais)	R\$	Parâmetro
Cf	Custo Fixo Total ($Cf_{cert}+Cf_{trans}$)	R\$	Parâmetro (Aleatório)
Cv_{bpa}	Custo variável incremental de boas práticas agrícolas	R\$/unidade	Parâmetro
Cv_{cert}	Custo variável de certificação por unidade	R\$/unidade	Parâmetro
cv	Custo variável total por unidade ($Cv_{bpa}+Cv_{cert}$)	R\$/unidade	Parâmetro
Π	Lucro estocástico adicional da rotulagem	R\$	Resultado (Aleatório)

Fonte: elaboração própria, com base na estrutura teórica e nos parâmetros utilizados no modelo de otimização.

2.7.1 A Função de Receita Adicional

A receita relevante para a decisão de adotar a rotulagem é a receita adicional gerada por ela. A função de receita adicional é, portanto, expressa como:

$$Radd(q) = Padd \cdot q$$

Onde $Padd$ é o prêmio de preço por unidade. Um elemento central do modelo é o tratamento de $Padd$ como uma variável aleatória com um valor esperado, $E[Padd]$.

Esta formulação estocástica não é apenas uma conveniência teórica, mas uma necessidade empírica fundamentada na literatura apresentada na Seção 2.2. Conforme observado por Valkila (2009) no mercado de cafés certificados, o prêmio de preço não é uma constante, mas exhibe alta volatilidade (flutuando historicamente entre 7,6% e 30,5% dependendo das cotações da *commodity*). Portanto, a decisão do produtor não pode basear-se em um prêmio atual observável, mas sim na esperança matemática $E[Padd]$ condicionada à variância histórica desses retornos.

2.7.2 A Estrutura de Custos

Os custos para obter e manter a rotulagem são decompostos em componentes fixos e variáveis. A função de custo total é:

$$C(q) = Cf + cv \cdot q$$

Custos Fixos (Cf): Representam a barreira de entrada e são incorridos independentemente da quantidade rotulada, uma vez que a decisão de iniciar o projeto é tomada. São compostos por:

- Custo Fixo de Transição ($Cftrans$): Investimentos iniciais em equipamentos, infraestrutura ou mudanças de processo necessárias para alcançar a neutralidade de carbono. É tratado como um parâmetro determinístico.
- Custo Fixo de Certificação ($Cfcert$): Taxas de registro, auditorias iniciais e validação do projeto. O custo final da certificação é frequentemente específico para cada projeto e incerto *a priori*, justificando seu tratamento como uma variável estocástica com um valor esperado, $E[Cfcert]$. Esta estrutura espelha a modelagem dos custos de certificação para créditos de carbono e é consistente com a estrutura de custos de certificações análogas, como a orgânica, que envolvem taxas anuais fixas.

Custos Variáveis (cv): Custos que escalam com a quantidade de produto rotulado, q . A premissa de linearidade implica um custo marginal constante, uma simplificação crucial, análoga à do modelo de créditos de carbono, que determina a natureza da solução ótima. São compostos por:

- Custo Variável de Boas Práticas Agrícolas ($cvbpa$): O custo *incremental* por unidade de produto para implementar as práticas de baixo carbono.
- Custo Variável de Certificação ($cvcert$): Taxas de licenciamento, *royalties* ou custos de monitoramento contínuo que são proporcionais ao volume produzido.

2.7.3 A Função de Lucro Esperado

Assumindo um produtor racional e neutro ao risco, o objetivo é maximizar o lucro esperado. O lucro estocástico ($\Pi(q)$) da atividade de rotulagem é a diferença entre a receita adicional e os custos totais:

$$\Pi(q) = (Padd - cv) \cdot q - Cf$$

O termo $(Padd - cv)$ representa a receita líquida marginal estocástica. Como o produtor é neutro ao risco, ele toma sua decisão com base na maximização do valor esperado desta função. Aplicando o operador de expectativa, a função objetivo se torna:

$$E[\Pi(q)] = (E[P_{add}] - cv) \cdot q - E[C_f]$$

O problema de otimização do produtor pode ser formalmente declarado como:

$$\max_q \quad E[\Pi(q)] = (E[P_{add}] - cv) \cdot q - E[C_f]$$

Sujeito a:

$$0 \leq q \leq q_{max}$$

Onde q_{max} é a capacidade máxima de produção do agricultor.

2.7.4 Derivação e Interpretação da Quantidade Ótima (q^*)

Dado que a função objetivo é linear em q e o espaço de escolha é um intervalo fechado $[0, q_{max}]$, a solução para este problema de otimização será, por natureza, uma solução de canto. A decisão depende inteiramente do sinal do coeficiente que multiplica a variável de decisão q , ou seja, o sinal da Receita Marginal Líquida Esperada, $E[P_{add}] - cv$.

- Caso 1: A Receita Marginal Líquida Esperada é positiva.

Se $E[P_{add}] - cv > 0$, a função de lucro esperado é estritamente crescente em q . Cada unidade adicional rotulada aumenta o lucro esperado. Portanto, para maximizar seu lucro, o produtor racional deve alocar a maior quantidade possível para essa atividade. A solução ótima é:

$$q^* = q_{max}$$

- Caso 2: A Receita Marginal Líquida Esperada é negativa ou nula.

Se $E[P_{add}] - cv \leq 0$, a função de lucro esperado é não crescente em q . Cada unidade adicional ou diminui o lucro esperado ou o deixa inalterado. A melhor decisão para o produtor é não dedicar nenhuma produção à rotulagem. A solução ótima é:

$$q^* = 0$$

A interpretação econômica desta solução "tudo ou nada" é direta e espelha o resultado do modelo de decisão para o mercado de créditos de carbono. Se, na expectativa, a receita marginal por unidade excede o custo marginal, a atividade é marginalmente lucrativa e o produtor deve expandi-la ao seu limite físico. Caso contrário, a atividade é marginalmente deficitária e não deve ser empreendida.

2.7.5 O Limiar de Viabilidade: A Barreira de Escala

A derivação da quantidade ótima (q^*) revela a decisão de alocação de recursos na margem. Contudo, uma decisão marginalmente ótima não garante que o projeto como um

todo seja economicamente viável. Para que o produtor decida incorrer nos custos fixos e iniciar o projeto, o lucro esperado ótimo, $E[\Pi(q^*)]$, deve ser não negativo.

No caso não trivial onde $q^* = q_{max}$ (porque $E[Padd] > cv$), a condição de viabilidade é:

$$E[\Pi(q_{max})] = (E[Padd] - cv) \cdot q_{max} - E[Cf] \geq 0$$

Rearranjando esta desigualdade, obtemos a condição fundamental de viabilidade:

$$(E[Padd] - cv) \cdot q_{max} \geq E[Cf]$$

Esta expressão revela que o lucro operacional total esperado, acumulado sobre toda a produção, deve ser suficiente para cobrir os custos fixos esperados. Um projeto pode ser marginalmente lucrativo, mas se a escala da operação (q_{max}) for muito pequena, o lucro gerado pode não ser suficiente para pagar os altos custos de certificação.

Esta condição pode ser reformulada para definir uma Quantidade Mínima Viável (q_{min}):

$$q_{max} \geq \frac{E[Cf]}{E[Padd] - cv} = q_{min}$$

Esta desigualdade formaliza o conceito de uma barreira de escala. A metodologia deste capítulo estrutura-se na formulação de um modelo de maximização do lucro esperado sob restrição de capacidade produtiva, do qual se deriva uma solução de canto e a condição de viabilidade econômica do projeto de rotulagem. A partir da incorporação dos custos fixos de certificação e da margem unitária esperada, formaliza-se a Quantidade Mínima Viável (q_{min}) como critério operacional para superação da barreira de escala.

Embora a formulação apresentada parta da hipótese de neutralidade ao risco e de uma estrutura linear da função objetivo, o modelo será formalmente estendido na tese para incorporar a aversão ao risco do produtor, múltiplas fontes de incerteza (de mercado, institucionais e técnicas) e especificações não lineares do problema de decisão. Essa ampliação analítica será desenvolvida em capítulo próprio, no qual também se procederá à parametrização empírica do modelo e à avaliação de suas implicações quantitativas.

2.8 POTENCIAL DA AGRICULTURA PARA REDUÇÕES DE GEE

Esta subseção apresenta a metodologia utilizada para estimar o potencial agregado de redução de GEE na agricultura brasileira. A abordagem envolve: estimativas setoriais de emissões; cenários de adoção tecnológica; e projeções de redução potencial sob diferentes níveis de adesão. A análise integra evidências microeconômicas e setoriais, permitindo avaliar a contribuição agregada da agricultura para as metas climáticas nacionais.

A metodologia adotada neste estudo configura-se como uma prospecção quantitativa baseada em cenários, desenhada para avaliar o impacto de diferentes configurações do mercado de carbono sobre o potencial agregado de mitigação de Gases de Efeito Estufa (GEE) e de geração de receita na cafeicultura brasileira. A abordagem transcende uma simples estimativa de potencial, estruturando-se como um framework analítico para investigar como a variável crítica dos custos de transação, materializada em diferentes patamares de escala mínima de viabilidade econômica, determina a eficácia ambiental e a equidade social do Sistema Brasileiro de Comércio de Emissões (SBCE). O desenho metodológico foi concebido para testar a hipótese central do trabalho: a de que a eficácia de um instrumento de mercado não é intrínseca, mas sim uma função direta do desenho institucional que o suporta, especialmente no que tange à sua capacidade de incluir ou excluir os pequenos produtores que formam a base do setor agrícola nacional.

2.8.1 Fundamentos da Modelagem e Fontes de Dados

A análise empírica fundamenta-se na integração de duas fontes de dados primárias, cuja combinação permite isolar e quantificar o efeito da barreira de escala. A escolha deliberada por separar a caracterização da estrutura agrária do setor dos parâmetros de impacto ambiental e econômico constitui o alicerce da estratégia metodológica, permitindo uma avaliação precisa do hiato entre o potencial teórico total e o potencial efetivamente mobilizável sob diferentes condições de mercado.

A base estrutural da análise provém do Censo Agropecuário de 2017, conduzido pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). Esta fonte de dados oferece um retrato detalhado e granular da cafeicultura nacional, fornecendo o universo de estabelecimentos rurais e sua distribuição precisa por estratos de área. A utilização desses dados é crucial, pois permite quantificar, para cada cenário, a parcela da área total e o número de produtores que seriam elegíveis ou excluídos do mercado de carbono, revelando a magnitude do impacto da barreira de entrada.

Os coeficientes técnicos e econômicos que parametrizam o modelo foram extraídos do estudo prospectivo de Santos e Nogueira (2025). Esta pesquisa fornece as estimativas essenciais para a modelagem, a saber:

Potencial de Mitigação de GEE: O coeficiente médio de redução de emissões por hectare, expresso em toneladas de dióxido de carbono equivalente (tCO_2eq), alcançável com a adoção de um portfólio de práticas agrícolas de baixo carbono na cafeicultura. De acordo com Cecafé e Imaflora (2022), o balanço de carbono, emissões menos sequestro, indicou que as

boas práticas foram eficientes para incrementar os estoques de carbono em 7,58 tCO₂eq ha⁻¹, de café verde em relação ao manejo tradicional. Dessa forma, para calcular o potencial de redução de GEE, a área viável de cada cenário foi multiplicada por 7,58.

Potencial de Geração de Receita: A receita estimada por hectare (em R\$/ha) proveniente da comercialização dos créditos de carbono gerados. Este valor embute premissas sobre o preço do carbono no mercado e a taxa de conversão do potencial de mitigação em créditos comercializáveis. O presente estudo considerou o montante de R\$ 277 por crédito de carbono, que corresponde a projeção mais otimista (Cotação 3) de Santos e Nogueira (2025). Assim, para calcular o potencial de geração de receita, a área viável de cada cenário foi multiplicada pelo coeficiente médio de redução de emissões por hectare (7,58) e também por 277.

Uma suposição central do modelo é a homogeneidade desses coeficientes entre as diferentes escalas de produção e mesmo em diferentes regiões. Assume-se que o potencial de mitigação e de receita por hectare é constante, independentemente do tamanho da propriedade e das condições edafoclimáticas. Embora se reconheça que, na realidade, possam existir variações de produtividade e eficiência, esta simplificação é uma decisão metodológica necessária para viabilizar a análise. Ela permite isolar analiticamente o efeito da barreira de escala imposta pelos custos de transação, que é o objeto central desta investigação, evitando que os resultados sejam confundidos por outras variáveis.

É importante ressaltar que a análise se baseia nos coeficientes técnicos e econômicos de Santos e Nogueira (2025), cuja metodologia já embute uma robusta análise de sensibilidade para lidar com as incertezas do mercado de carbono. Os autores não se limitam a um único valor, mas constroem nove cenários a partir da combinação de três projeções de custos fixos de certificação (baixo, médio e alto) e três projeções de preços para o crédito de carbono. Essa abordagem revela um espectro de resultados em que a área mínima para viabilizar a participação no mercado varia consideravelmente, indo de 50 hectares no cenário mais otimista (custos baixos e preços altos) a 320 hectares no mais pessimista (custos altos e preços baixos).

Apesar dessa variação, a conclusão fundamental se mantém consistente em todos os cenários: a comercialização de créditos de carbono é economicamente inviável para a grande maioria dos cafeicultores, visto que mesmo o cenário mais favorável (50 ha) ainda exclui 88% dos produtores do país (Santos e Nogueira, 2025). Essa constatação confere maior solidez à hipótese central deste trabalho. Desta forma, a metodologia permite mensurar de forma clara o quanto do potencial de mitigação é perdido unicamente em função do desenho do mercado.

2.8.2 Construção dos Cenários de Viabilidade Econômica

Os cenários analisados não devem ser interpretados como previsões, mas como simulações de distintos ambientes de política pública e de mercado. Cada patamar de área mínima de viabilidade (10, 50, 100 e 200 hectares) funciona como um proxy para o nível de sucesso das instituições em mitigar os custos de transação, conforme a discussão teórica apresentada na Seção 2. A transição entre os cenários, do mais otimista ao mais restritivo, reflete diretamente as consequências de diferentes escolhas regulatórias, ilustrando o trade-off entre a eficiência microeconômica de projetos individuais e a eficácia macroambiental e a inclusão social da política como um todo.

Cenário 1: Otimista (limite de 10 hectares) – Inclusão Ampla via Inovação Institucional Este novo cenário representa o potencial teórico máximo de mitigação que poderia ser alcançado sob um arcabouço de política climática altamente eficaz e inclusivo. Ele modela uma realidade na qual os custos de transação foram drasticamente reduzidos, tornando a participação no mercado de carbono economicamente viável até mesmo para a agricultura familiar de pequena escala. A plausibilidade deste cenário está ancorada em duas inovações institucionais discutidas no referencial teórico do capítulo:

- **Agregação via Ação Coletiva:** Com base nas estratégias propostas por Cacho *et al.* (2013), este cenário pressupõe a ampla adoção de "projetos programáticos" ou "agregados", nos quais cooperativas e associações de produtores atuam como intermediários. Ao consolidar milhares de pequenas propriedades em um único projeto, os elevados custos fixos de elaboração de metodologia, certificação e MRV (Monitoramento, Relato e Verificação) são diluídos entre todos os participantes, reduzindo drasticamente o custo por produtor e por hectare.
- **Incentivos de Mercado via Instrumentos Voluntários:** Alinhado à discussão sobre rotulagem ambiental, este cenário assume também a consolidação de mercados voluntários para produtos com pegada de carbono neutra. A obtenção de um prêmio de preço por meio de selos como "café carbono neutro" gera uma fonte de receita adicional para os pequenos produtores. Esse incentivo de mercado, conforme teorizado por Segerson (2013), não apenas ajuda a cobrir os custos residuais de conformidade, mas também fortalece a atratividade da adesão, transformando a mitigação de GEE de um ônus em uma oportunidade de agregação de valor.

Cenário 2: Moderado (limite de 50 hectares) – Inclusão Parcial Este cenário reflete um ambiente de mercado onde ocorreram avanços parciais na redução dos custos de transação,

mas as barreiras ainda são significativas para a maioria dos pequenos agricultores. Corresponde ao limite inferior de viabilidade estimado por Santos e Nogueira (2025) e simula uma realidade em que algumas estruturas cooperativas estão aptas a participar ou onde tecnologias de MRV se tornaram mais acessíveis, mas ainda não o suficiente para engajar a base da pirâmide produtiva.

Cenário 3: Restritivo (limite de 100 hectares) – Exclusão Estrutural Este cenário modela a implementação de um mercado de carbono convencional, ou "business-as-usual", no qual os custos de transação permanecem elevados e não há mecanismos institucionais para apoiar a agregação de pequenos projetos. O mercado opera sob uma lógica de pura eficiência microeconômica, favorecendo propriedades de média a grande escala que possuem capital e capacidade técnica para absorver esses custos. Representa uma falha da política em se adaptar à realidade estrutural da agricultura brasileira, caracterizada pela predominância da agricultura familiar.

Cenário 4: Altamente Restritivo (limite de 200 hectares) – Mercado de Elite Este cenário simula um mercado com barreiras de entrada proibitivas, onde apenas as maiores e mais capitalizadas empresas agrícolas conseguem participar. Ele ilustra o resultado mais extremo de uma política mal desenhada, na qual o instrumento de mercado serve a uma fração mínima do setor, resultando em uma eficácia ambiental marginal e maximizando a exclusão social e a concentração de renda.

Ao enquadrar os cenários desta forma, a análise demonstra que o nível de mitigação alcançado pelo SBCE não é um resultado predeterminado, mas uma consequência direta das escolhas políticas feitas em sua fase de desenho. A diferença substancial nos resultados entre o cenário de 10 ha e o de 200 ha quantifica o custo de oportunidade (ambiental e social) de se optar por um caminho excludente em detrimento de um inclusivo. O cenário "Otimista" estabelece, portanto, um *benchmark* analítico crucial, definindo o potencial máximo. O hiato entre este *benchmark* e os demais cenários pode ser conceituado como o "Hiato de Mitigação e Equidade": a soma do benefício climático não realizado e da oportunidade de desenvolvimento rural perdida devido à persistência de custos de transação elevados.

2.8.3 Escopo da Análise e Níveis de Agregação Geográfica

Para capturar tanto as consequências agregadas quanto as distributivas dos diferentes cenários de viabilidade, o estudo emprega uma análise multinível. Esta abordagem permite uma compreensão mais profunda e nuançada dos impactos da política, revelando dinâmicas que permaneceriam ocultas em uma análise de nível único.

Nível Nacional: A análise em escala nacional tem como objetivo primário quantificar o macro-impacto do desenho da política. Ela mede a eficácia ambiental geral do mercado de carbono em cada cenário, calculando o potencial agregado de mitigação de GEE e de receita. Mais importante, é neste nível que se mensura a magnitude total do "Hiato de Mitigação e Equidade", respondendo à pergunta central: "Quanto do potencial nacional total é efetivamente realizado ou perdido em função da barreira de escala?".

Nível Municipal: A análise é, então, aprofundada para a escala municipal, uma escolha metodológica deliberada para investigar a heterogeneidade espacial dos impactos. Uma média nacional, por si só, mascararia as dinâmicas locais críticas, uma vez que a estrutura agrária — a proporção entre agricultura familiar e de grande escala — varia drasticamente entre as diferentes regiões cafeeiras do Brasil. Esta análise subnacional foi projetada para expor como os efeitos excludentes dos custos de transação podem exacerbar as desigualdades regionais existentes. Ela demonstra como uma política nacional aparentemente neutra (ao estabelecer um critério único de elegibilidade por área) pode, na prática, gerar uma geografia de "oásis de carbono" (municípios com predominância de grandes fazendas que se beneficiam do mercado) e "desertos de carbono" (municípios dominados pela agricultura familiar que são completamente marginalizados). Esta abordagem conecta diretamente o instrumento econômico às questões de justiça distributiva e desenvolvimento regional, reforçando a necessidade de se considerar o critério da equidade no desenho de políticas ambientais. Para garantir a relevância da análise, a seleção de municípios para o estudo de caso focou nos 28 municípios que compõem o quantil 99,5 da área total cultivada com café no Brasil, assegurando que a investigação se concentre nos polos produtivos mais significativos do país.

Em conjunto, os procedimentos metodológicos apresentados estruturam a investigação em três níveis analíticos complementares: o ambiente tecnológico de mitigação, a racionalidade microeconômica da adoção de instrumentos regulados e voluntários e a projeção agregada de seus efeitos ambientais e econômicos. Essa arquitetura metodológica assegura coerência entre os diferentes artigos que compõem a tese, permitindo que as análises específicas sejam interpretadas como partes integradas de um mesmo problema de pesquisa. Com base nesse arcabouço, os capítulos seguintes apresentam os resultados empíricos e as discussões correspondentes a cada eixo analítico.

3 AMBIENTE TECNOLÓGICO PARA REDUÇÃO DE GEE NA AGROPECUÁRIA

Diversos países implementaram políticas ambientais para promover a redução da emissão de gases do efeito estufa no setor agropecuário. Países da União Europeia, em 2021,

fizeram acordo sobre a reforma da Política Agrícola Comum (PAC) com objetivo de intensificar o apoio a produção agropecuária sustentável, incluindo medidas para promover a agricultura de baixo carbono (European Commission, 2026). A PAC incentiva os agricultores a adotarem práticas agrícolas que reduzam as emissões de gases de efeito estufa, como a agricultura de precisão, o uso de fertilizantes orgânicos e a gestão adequada de resíduos.

Os Estados Unidos também adotaram políticas ambientais para promover a redução da emissão de gases de efeito estufa no setor agrícola, com destaque para o *Conservation Stewardship Program* (CSP). O CSP é um programa do Departamento de Agricultura dos EUA (USDA) que incentiva, inclusive financeiramente, os produtores rurais a adotarem práticas agrícolas mais sustentáveis, como a redução do uso de pesticidas e fertilizantes químicos, o plantio de culturas de cobertura e a conservação dos solos e recursos hídricos (USDA, 2026).

No Brasil, vale mencionar que em junho de 2023 foi editado o Decreto 11.550/2023, que estabelece diretrizes para a elaboração dos planos setoriais de mitigação das mudanças climáticas (Brasil, 2023). Para minimização desse impacto, ressalta-se a edição do Decreto 10.606, de 22 de janeiro de 2021, que instituiu o Sistema Integrado de Informações do Plano Setorial para Consolidação de uma Economia de Baixa Emissão de Carbono na Agricultura – SIN-ABC, integrado pela Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária – Embrapa, entre outros órgãos e entidades (BRASIL, 2021).

Conforme mencionado na introdução desta tese, é relevante destacar que, nos anos recentes as emissões da agropecuária representaram de 24% a 29% das emissões no Brasil. De 2020 a 2024, o setor agropecuário foi responsável em média por aproximadamente 25% das emissões totais brasileiras de gases de efeito estufa, correspondendo a cerca de 610 milhões de toneladas de CO₂ equivalente por ano, em média (OBSERVATÓRIO DO CLIMA, 2025).

Justifica-se, portanto, a relevância de inferir sobre a evolução do esforço tecnológico e inventivo associado à mitigação de gases de efeito estufa na agropecuária por meio da análise quantitativa de patentes, marcas e produção científica. O propósito é avaliar o potencial do ambiente tecnológico na redução das emissões de gases de efeito estufa (GEE) sobre o sistema produtivo. A análise dessas iniciativas evolutivas evidencia seu potencial para embasar políticas públicas de mitigação climática.

Diante desse contexto, este capítulo tem caráter descritivo-exploratório e busca mapear a evolução recente dos indicadores do ambiente tecnológico voltados à mitigação de gases de efeito estufa na agropecuária. A partir da análise de dados de patentes, publicações acadêmicas e registros de marcas, pretende-se identificar padrões de crescimento, intensidade

e difusão dessas iniciativas, sem, contudo, estabelecer relações causais entre política ambiental e esforço inovativo.

3.1 RESULTADOS E DISCUSSÃO

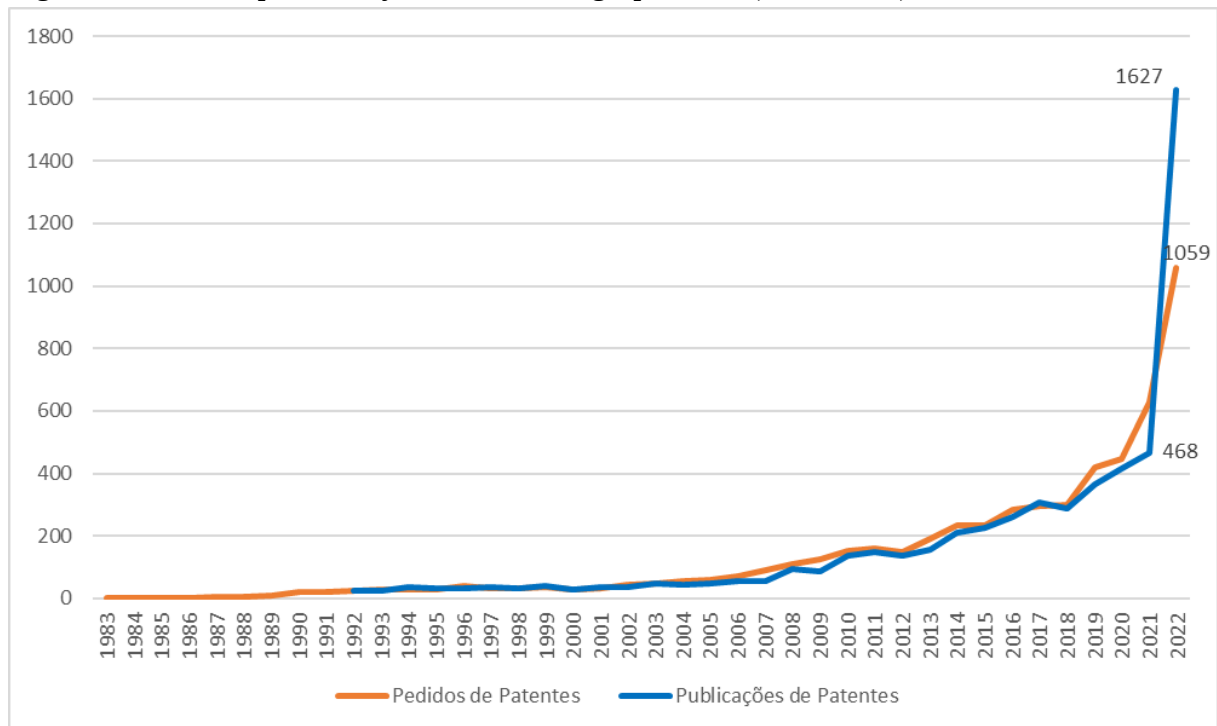
Como resultado da pesquisa, foi possível constatar um aumento expressivo nos últimos anos do número de pedidos e publicações de patentes destinadas a redução das emissões de gases de efeito estufa na agropecuária no mundo e, de forma semelhante, aumento do número de publicações e citações que mencionam em seus campos principais a redução de emissões de gases do efeito estufa no setor agropecuário.

Visualiza-se na Figura 1, as quantidades anuais de pedidos e publicações de patentes, em nível mundial, no período de 1983 a 2022. Vale destacar que as patentes em análise passaram a ser publicadas a partir de 1992, ano que coincidiu com a Eco-92, quando a Conferência das Nações Unidas sobre o Meio Ambiente e o Desenvolvimento produziu a Agenda 21.

Em 1992 foram publicadas 23 patentes do CPC “Y02P60/20 • Reduction of greenhouse gas [GHG] emissions in agriculture, e.g. CO₂” e esse número foi sendo incrementado, atingindo 137 patentes publicadas no ano de 2012, 468 no ano de 2021 e 1627 patentes em 2022, o que conota um aumento de 347% nesse ano mais recente em relação ao ano anterior. Essa trajetória de crescimento significativo pode ser visualizada na Figura 1, a seguir.

O crescimento observado especialmente a partir da década de 2010 sugere uma intensificação do direcionamento tecnológico para soluções associadas à mitigação de emissões no setor agrícola. Esse comportamento é consistente com a literatura sobre inovação induzida por mudanças nos incentivos econômicos e institucionais, segundo a qual alterações no ambiente regulatório, nas preferências de mercado e nas expectativas dos agentes podem redirecionar o esforço inventivo para tecnologias ambientalmente orientadas.

Figura 1 - Patentes para redução de GEE na agropecuária (1983-2022)

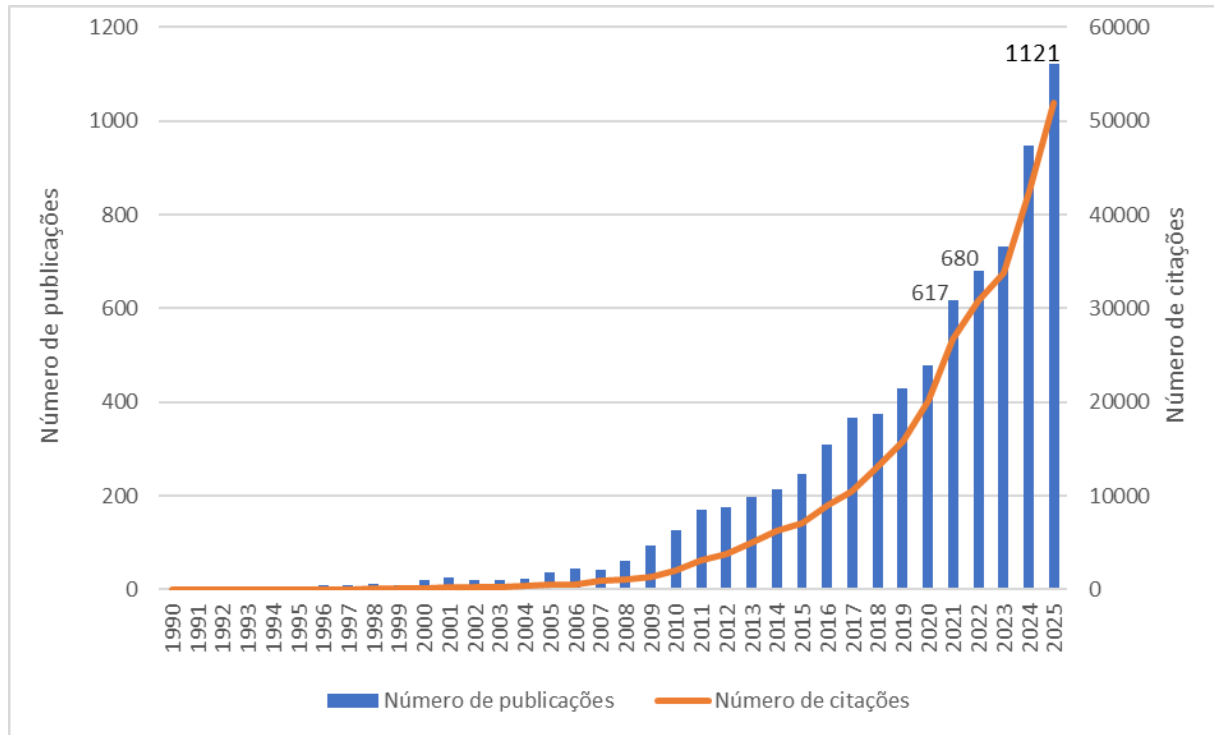


Fonte: elaboração própria, com base em dados do Google Patents, classificação CPC Y02P60/20.

Adicionalmente, ainda em relação à Figura 1, nota-se que a tendência crescente se assemelha ao número de pedidos de patentes desse mesmo CPC. Essa série foi iniciada com dois pedidos no ano de 1983, 24 pedidos em 1992, 149 em 2012, 627 em 2021 e no ano de 2022, foram registrados 1059 pedidos de patentes destinadas à redução de gases de efeito estufa na agropecuária.

Sobre o número de publicações e citações que mencionam em seus campos principais a redução de emissões de gases do efeito estufa no setor agropecuário (Figura 2), verificou-se que nos dois primeiros anos da série em análise (1990 e 1991) houve apenas uma publicação anual. O número de publicações teve incremento paulatino, chegando a 20 em 2002, 176 em 2012, 680 em 2022 e 1.121 publicações no ano de 2025. Números que seguem ilustrados na Figura 2.

Figura 2 - Número de publicações e citações de trabalhos acadêmicos sobre redução de emissões de GEE no setor agropecuário (1990-2022)



Fonte: elaboração própria, com base em dados da Web of Science.

Ainda nesse gráfico, é possível verificar tendência crescente também do número de citações de publicações que mencionam a redução de emissões de gases do efeito estufa no setor agropecuário. Sendo que no ano de 2002 foram 208 citações, 3.780 citações em 2012 e, nos últimos três anos (2023 a 2025) foram registradas respectivamente, 33.830, 42.505 e 51.992 citações de trabalhos sobre a redução de emissões de GEE na agropecuária.

Com os dados disponibilizados sobre o registro de marcas não foi possível fazer uma análise de tendência temporal. A pesquisa de marcas de produtos baixo carbono ou carbono neutro provenientes do setor agrícola¹⁷, realizada em fevereiro de 2023, identificaram 38 registros vigentes, 11 pendentes e 26 expirados/terminados. Os registros identificados sugerem que parte do esforço inovativo tem se refletido também na estratégia de diferenciação comercial de produtos associados a atributos ambientais, ainda que em estágio relativamente inicial. Esse movimento pode indicar a incorporação gradual de atributos climáticos como elemento de valorização mercadológica.

¹⁷ Conforme descrito no Capítulo 2 desta tese, referente aos métodos, a busca no Global Brand Database foi realizada com o termo (carbon OR ghg OR carbono OR gee OR CO2) AND (zero OR neutro OR baixo OR neutral OR low), filtrados pelos Nice 29, 30 e 31.

Tabela 5 - Registros de marcas: carbono neutro / baixo carbono

Registros de marcas	
Registrado	38
Pendente	11
Expirado / Terminado	26
Total	75

Fonte: elaboração própria, com base na Global Brand Database da Organização Mundial da Propriedade Intelectual (OMPI).

Ainda assim, conforme apresentado na Tabela 5, no total foram feitos 75 registros de marcas em nível global nos últimos anos, que dão indícios sobre adequações dos sistemas produtivos agrícolas para o atendimento de uma nova tendência comercial sensível às questões climáticas. Dessa forma, pode-se verificar que essa tendência comercial decorre principalmente de comportamentos proativos associados a instrumentos voluntários de política ambiental.

Além disso, especialmente pelas tendências dos números de patentes e publicações destinadas a essa questão, os quais tiveram aumento bastante expressivo nos últimos três anos, pode-se inferir que está havendo uma potencialização dos esforços de desenvolvimento de novas tecnologias e dos resultados práticos de pesquisas que objetivam a mitigação das mudanças climáticas pela atividade agropecuária.

De forma geral, os resultados apresentados com indícios preliminares, evidenciam que o ambiente tecnológico destinado à redução de gases de efeito estufa do setor agrícola está efetivamente em consolidação. Esses resultados são compatíveis com a hipótese de que o ambiente regulatório e institucional favorável à mitigação climática pode estar associado ao aumento do esforço inovativo no setor. Contudo, a análise aqui realizada é de natureza descritiva, não permitindo inferências causais acerca do impacto específico de instrumentos de política ambiental sobre a dinâmica tecnológica observada.

A política ambiental destinada à mitigação das mudanças climáticas estimula a demanda por inovações, conforme mencionado por Pardey *et al.* (2010), no Handbook of the Economics of Innovation. Nesse sentido, a tecnologia viabiliza a adequação da atividade produtiva e de consumo com a finalidade de reduzir suas emissões de gases do efeito estufa.

3.2 CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO

O presente capítulo teve como objetivo mapear a evolução recente dos ambientes tecnológico e científico voltados à mitigação de gases de efeito estufa (GEE) na agropecuária, a partir da análise de dados de patentes, publicações acadêmicas, citações e registros de marcas. Os resultados evidenciam uma trajetória consistente de crescimento desses indicadores, especialmente a partir da década de 2010, com intensificação expressiva nos anos mais recentes.

O aumento significativo no número de pedidos e publicações de patentes classificadas no CPC Y02P60/20, bem como a expansão das publicações acadêmicas e de suas citações, sinaliza que o tema da mitigação de emissões na agropecuária deixou de ocupar posição marginal na agenda científica e tecnológica e passou a constituir campo dinâmico de geração de conhecimento e desenvolvimento tecnológico. Ainda que os registros de marcas apresentem menor volume relativo, sua existência indica que parte dessas tecnologias e conhecimentos começa a se refletir em estratégias de diferenciação comercial associadas a atributos ambientais.

Em conjunto, esses resultados sugerem que já existe um estoque crescente de tecnologias e conhecimentos potencialmente aptos a viabilizar a transição para sistemas produtivos agropecuários de menor intensidade de carbono. A teoria da inovação induzida, formulada por John Hicks (1963) e aplicada à economia agrícola por Hayami e Ruttan (1985), postula que alterações nos preços relativos, nas restrições regulatórias e nos incentivos institucionais direcionam a inovação tecnológica para poupar o fator que se torna relativamente mais escasso ou caro.

No caso em análise, esse fator é a capacidade de emitir carbono, sendo essa aplicação uma extensão contemporânea da teoria original. Nessa perspectiva, a intensificação recente do esforço inventivo climático na agropecuária é compatível com um processo de redirecionamento tecnológico associado à crescente internalização econômica das externalidades ambientais.

Importa destacar que a análise desenvolvida possui natureza descritiva e não permite estabelecer relações causais entre a expansão dos instrumentos de política climática e o aumento observado nos indicadores do ambiente tecnológico. Todavia, a evidência empírica apresentada é consistente com o mecanismo teórico de inovação induzida, segundo o qual alterações no ambiente regulatório e nas expectativas de mercado podem redefinir a orientação do progresso técnico.

No âmbito desta tese, os achados deste capítulo desempenham papel fundamental ao demonstrar que há base tecnológica disponível para sustentar processos de conversão produtiva no setor agropecuário. Essa constatação fornece suporte analítico para a investigação, nos capítulos subsequentes, de instrumentos de política pública capazes de estimular a adoção e difusão dessas tecnologias, reduzindo falhas de coordenação, barreiras de transição e custos de ajuste, e promovendo a consolidação de sistemas produtivos de baixa emissão de carbono.

Por fim, a ampliação futura da análise bibliométrica, com a incorporação de estudos de co-ocorrência, redes de colaboração e clusters tecnológicos, bem como o aprofundamento da base de dados de registros de marcas, poderá contribuir para identificar com maior precisão as trajetórias tecnológicas dominantes e o grau de maturidade das soluções disponíveis. Tais avanços permitirão qualificar ainda mais a compreensão sobre o potencial de transformação estrutural da agropecuária diante dos desafios climáticos.

PARTE 1: MERCADO REGULADO DE CARBONO

A primeira parte desta tese dedica-se à análise da inserção da cafeicultura brasileira no mercado regulado de carbono. Atualmente, pode-se considerar que o Sistema Brasileiro de Comércio de Emissões (SBCE), instituído pela Lei 15.042/2024, representa o principal instrumento de política climática do país para operacionalizar os compromissos assumidos no Acordo de Paris, que incluem a redução das emissões de gases de efeito estufa (GEE) em 53% até 2030 e o alcance da neutralidade líquida até 2050.

O SBCE foi instituído como um ambiente regulado submetido ao regime de limitação das emissões de GEE e de comercialização de ativos representativos de emissão, redução de emissão ou remoção de GEE no País. Dessa forma, o SBCE constitui uma política ambiental de licenças negociáveis (*cap and trade*), ou seja, um mercado regulado de carbono no Brasil, cuja lei ainda depende de regulamentação. Mesmo assim, deve-se ressaltar que suas definições legais, de redução de emissões de GEE e remoção de GEE já instituídas, incluem sistemas agrícolas e pecuários mais eficientes; e incremento de estoques de carbono em solos agrícolas e pastagens ou tecnologias de captura direta e armazenamento de GEE.

Diferentemente dos instrumentos tradicionais de comando e controle, o mercado regulado de carbono fundamenta-se no mecanismo de licenças negociáveis (*cap and trade*). Do ponto de vista da teoria microeconômica, esse sistema busca a eficiência econômica ao permitir que o esforço de redução de emissões seja alocado onde o custo marginal de

abatimento é menor, favorecendo o princípio da equimarginalidade. Ao estabelecer direitos negociáveis de emissão e, quando aplicável, reconhecer créditos oriundos de remoções certificadas, o regulador cria um mecanismo de preços que internaliza as externalidades positivas geradas pelas boas práticas agrícolas, transformando o serviço ecossistêmico de sequestro de carbono em um ativo financeiro negociável.

Contudo, a literatura de economia institucional e ambiental adverte que a eficácia de um mercado de licenças negociáveis não é garantida apenas pelo seu desenho teórico, mas depende criticamente da magnitude dos custos de transação. Conforme explorado pela teoria coaseana, custos de transação elevados podem inviabilizar a alocação eficiente de um mercado, criando uma "barreira de escala" que tende a excluir empreendimentos de menor área produtiva. No contexto da agropecuária, esses custos manifestam-se de forma expressiva nos processos de Mensuração, Relato e Verificação (MRV) e na certificação dos créditos.

Essa problemática assume relevância central na cafeicultura brasileira. Embora o setor possua um vasto potencial para atuar como sumidouro de carbono por meio de práticas sustentáveis, sua estrutura produtiva é caracterizada pela predominância de propriedades familiares (78%) e por uma forte heterogeneidade regional. Nesse cenário, a inserção individual do cafeicultor no mercado regulado enfrenta o desafio de diluir custos fixos de certificação em uma área produtiva que torne a participação economicamente viável.

Diante desse contexto, a questão central desta Parte consiste em investigar se o desenho institucional do mercado regulado de carbono é capaz de promover a inserção economicamente viável da cafeicultura brasileira, majoritariamente composta por pequenos produtores, ou se os custos de transação inerentes ao sistema tendem a restringir sua participação a unidades produtivas de maior escala, com potenciais efeitos distributivos e territoriais.

Para examinar essas dinâmicas, os capítulos que compõem esta parte estão organizados em três dimensões complementares: O Capítulo 4 realiza uma análise prospectiva de viabilidade e efetividade, utilizando a microeconomia para estimar a área mínima viável da lavoura cafeeira apta a comercializar créditos lucrativamente no Brasil, confrontando esses limites com os dados do Censo Agropecuário.

O Capítulo 5 expande a análise para a dimensão territorial, investigando se a barreira de escala imposta pelos custos de transação tende a reduzir ou acentuar as disparidades econômicas entre municípios rurais e urbanos, e dentro do próprio universo cafeeiro, utilizando o PIB *per capita* como indicador de desenvolvimento.

O Capítulo 6 provê a formalização microeconômica da decisão do produtor rural, tratando o preço e os custos fixos como variáveis estocásticas e demonstrando matematicamente porque a decisão de alocação de área configura-se frequentemente como uma "solução de canto". Adicionalmente, o Capítulo 6 faz uma extensão do modelo linear que incorpora rendimentos decrescentes e custos marginais crescentes demonstrando também a possibilidade de soluções interiores.

Ao integrar estas perspectivas, esta Parte 1 oferece uma visão sistêmica sobre as potencialidades e os limites institucionais do mercado regulado de carbono como instrumento de transição produtiva de uma cafeicultura sustentável e inclusiva.

4 AVALIAÇÃO DE VIABILIDADE ECONÔMICA

Este capítulo analisa de forma prospectiva, a possibilidade da inserção da cafeicultura no mercado de carbono, com base no seu potencial de redução de GEE e na possível rentabilidade do comércio de créditos de carbono em mercado regulado no Brasil. Para tanto, primeiramente é avaliada a viabilidade financeira, exclusivamente do comércio de créditos de carbono como atividade secundária da cafeicultura, para estimar a possível escala, em termos de área, da lavoura cafeeira apta a comercializar créditos de carbono.

A partir da estimativa da escala de viabilidade da cafeicultura para o comércio de créditos de carbono, ela é comparada, em termos de área de lavoura cafeeira, com dados censitários dos estabelecimentos rurais cafeeiros. Os resultados indicam a possível efetividade do mercado de carbono regulado, como política pública, para a cafeicultura e contribui, com subsídios, para o planejamento da implantação desse mercado, bem como para os Planos Setoriais de Mitigação das Mudanças Climáticas.

Para o desenvolvimento de sua argumentação e evidenciação dos resultados, o capítulo apresenta três seções centrais, complementadas por esta Introdução e pelas Considerações finais do capítulo. Na próxima seção, explicitam-se os aspectos conceituais básicos daquilo que se convencionou denominar de mercado de carbono. Na seção seguinte são feitas estimativas de custos e de benefícios para a cafeicultura participar do mercado regulado de carbono brasileiro e a seção subsequente discute os resultados obtidos para a análise prospectiva da viabilidade da cafeicultura brasileira participar desse mercado. Os materiais e métodos referente a este capítulo foram apresentados seção específica 2.2 desta tese.

4.1 ASPECTOS TEÓRICOS DO SISTEMA DE LICENÇAS NEGOCIÁVEIS

A precificação de carbono pode ocorrer, de uma perspectiva teórica, de duas maneiras: pela fixação, por parte da autoridade reguladora, de um preço que reflita o valor econômico (social) do carbono ou pelo estabelecimento de um mercado de carbono que fará surgir um preço de carbono pela negociação entre ofertantes e demandantes de créditos (títulos) de carbono. Essa segunda opção é conhecida na literatura de economia ambiental como sistema de licenças negociáveis ou “*cap and trade*” no linguajar dos formuladores de política ambiental norte-americanos).

O sistema de licenças negociáveis é um instrumento de política ambiental no qual um órgão regulador emite licenças referentes a uma determinada quantidade limite máxima de degradação/poluição para um determinado espaço geográfico. A partir da distribuição e/ou venda entre os agentes poluidores da região, é possível e recomendável a negociação dessas licenças. Com essa forma de controlar níveis agregados de degradação ambiental, é possível estabelecer um número total de licenças ou cotas equivalentes à capacidade assimilativa, de suporte e/ou sustentável do meio ambiente.

É importante distinguir as licenças de emissão dos créditos de carbono. As licenças representam autorizações emitidas pela autoridade reguladora para que os agentes sujeitos ao sistema possam emitir determinada quantidade de gases de efeito estufa. Já os créditos de carbono correspondem a reduções ou remoções certificadas de emissões obtidas por projetos específicos, podendo ser utilizados para compensação de emissões quando permitido pelas regras do sistema regulatório. Dessa forma, as licenças constituem o ativo central dos sistemas *cap and trade*, enquanto os créditos de carbono podem desempenhar papel complementar como instrumentos de compensação.

O sistema de licenças negociáveis foi originalmente concebido para ser um mecanismo de controle de poluição no início da década de 1970 (Godoy e Saes, 2015). Esse instrumento busca reconhecer o custo da degradação por meio da criação de mercado para o uso de serviço ecossistêmico (absorção, diluição). Nesse sentido, completa o mercado de cada indústria degradadora atribuindo custo a insumos naturais que não eram reconhecidos anteriormente. Nesse contexto, o mercado de licenças de emissão completa a estrutura de incentivos econômicos ao atribuir custo explícito ao uso de recursos ambientais anteriormente tratados como bens livres.

Cada agente regulado deve possuir licenças suficientes para cobrir suas emissões efetivas. Caso suas emissões sejam inferiores ao volume de licenças detidas, poderá comercializar o excedente com outros participantes do sistema. Por outro lado, agentes com

custos elevados de redução podem optar pela aquisição de permissões adicionais em vez de realizar reduções mais onerosas. Essa possibilidade de negociação permite que a meta ambiental seja alcançada ao menor custo agregado para a sociedade.

De acordo com Sterner e Coria (2012), esse instrumento de política ambiental estabelece direitos de propriedade relacionados ao direito de poluir ou degradar o ambiente e ajuda a remover ou a reduzir as externalidades negativas implícitas na ausência de direitos de propriedade ou no caráter de “bem público” do meio ambiente. Assim, a criação de mercado, com mecanismo de preços, para comercializar direito de gerar externalidades negativas, motiva a redução de efeitos adversos das decisões de uso do ativo ambiental.

Outro aspecto conceitual relevante, observado por Baranzini *et al.* (2017), é que os emissores têm custos marginais desiguais de redução. Isto posto, e sob perfeita informação, escolhem o nível de redução de emissões que iguale o custo marginal da redução ao custo da licença. Dessa forma, as licenças negociáveis flexibilizam a alocação eficiente do esforço de redução de emissões permitindo a compensação por atividades com custos mais altos de redução. Assim, elas são muito favoráveis ao funcionamento do princípio da equimarginalidade e na busca da eficiência.

O sistema de licenças negociáveis possibilita que agentes de mercado, como produtores e proprietários, internalizem benefícios econômicos ao reduzirem seus impactos ambientais. Esse potencial de ganho constitui um incentivo central para a inovação. Segundo Schmalensee e Stavins (2017), a eficácia desse instrumento reside na clareza dos direitos de propriedade e na competitividade do mercado, elementos que permitem aos negociantes a efetiva captura desse valor. Logo, restrições excessivas às compensações podem resultar em mercados pouco líquidos, comprometendo a contenção de custos. Ademais, para influenciar investimentos de capital intensivo, os direitos de propriedade devem transmitir perenidade para encorajar investimentos dispendiosos, sem abdicar de penalidades rigorosas por não conformidade (Schmalensee e Stavins, 2017). Tal estrutura deve ser capaz de mitigar incentivos perversos e o comportamento de *rent-seeking*, conforme alertado por Sterner e Coria (2012).

Apesar da atratividade do instrumento, as licenças negociáveis devem ser submetidas aos usuais critérios de avaliação de políticas públicas de proteção ambiental. Nesse sentido, o trabalho de Perman *et al.* (2003) ressalta a avaliação de custo-efetividade, pela qual um instrumento é considerado efetivo em custo se ele atingir sua meta a um custo total menor do que o de qualquer alternativa. A relação custo-efetividade é claramente um atributo desejável de um instrumento. O uso de um instrumento custo-efetivo envolve alocar a menor

quantidade de recursos para alcançar um determinado objetivo/nível/alvo de degradação/poluição ao menor custo econômico total. Portanto, o uso de instrumentos custo-efetivos é uma condição necessária para alcançar uma alocação ótima de recursos (Perman *et al.*, 2003).

Perman *et al.* (2003) alertam, em complemento, que quando os custos de transação são adicionados às comparações de custos relativos, as classificações de custo-efetividade dos instrumentos podem mudar. Além disso, conforme explorado pioneiramente por Coase (1937), a magnitude dos custos de transação pode viabilizar ou inviabilizar o funcionamento de um mercado. Tal assertiva poderia inclusive comprometer a eficácia de uma política ambiental de licenças negociáveis.

Isto posto, este capítulo analisa prospectivamente a viabilidade econômica da participação da cafeicultura como potencial geradora de créditos de carbono em um contexto de precificação regulada das emissões no âmbito do Sistema Brasileiro de Comércio de Emissões (SBCE). Embora o SBCE seja estruturado como um sistema de licenças negociáveis, a análise desenvolvida nesta tese concentra-se na geração de créditos de carbono oriundos da atividade cafeeira e em sua possível utilização como mecanismo de compensação, conforme as regras do sistema regulatório. A presente avaliação tem o foco nos custos de transação. Estes custos, especialmente relacionados à certificação e monitoramento, mostram-se relativamente expressivos (Santos e Nogueira, 2025).

O estudo de Cacho *et al.* (2013) já indicava que a magnitude desses custos pode inviabilizar empreendimentos de menor escala em termos de área produtiva. Dessa forma, esses autores indicam a necessidade da redução de custos de transação para viabilizar projetos de menor escala e, para tanto, indicam três estratégias: realizar projetos coletivos para rateio dos custos; utilizar a infraestrutura/capacidade de gerenciamento existente; e reduzir custos de informação, especialmente por meio de metodologias de implementação e monitoramento (Cacho *et al.*, 2013).

4.2 ANÁLISE PROSPECTIVA DE VIABILIDADE

Após a fundamentação teórica sobre os sistemas de licenças negociáveis, a distinção entre permissões de emissão e créditos de carbono e a relevância dos custos de transação, esta seção dedica-se à aplicação empírica desses conceitos ao contexto da cafeicultura brasileira. Enquanto os agentes regulados pelo Sistema Brasileiro de Comércio de Emissões (SBCE) devem adquirir permissões suficientes para cobrir suas emissões, produtores rurais podem

participar indiretamente desse sistema por meio da geração de créditos de carbono decorrentes de atividades de mitigação ou remoção de gases de efeito estufa.

Nesse contexto, a agropecuária é analisada como potencial ofertante de créditos de compensação (*offsets*), os quais podem complementar os mecanismos de cumprimento das metas de redução de emissões estabelecidas pelo mercado regulado. Assim, o foco da presente análise não recai sobre a aquisição ou negociação de permissões de emissão, mas sobre a viabilidade econômica da geração e comercialização de créditos de carbono por produtores de café.

Por meio de uma análise prospectiva, são quantificados os parâmetros de custos fixos de certificação e as projeções de preços de mercado, visando determinar os pontos de equilíbrio financeiro para o produtor. A análise busca identificar as escalas mínimas de lavoura que tornam a comercialização de créditos de carbono atrativa, confrontando esses resultados com a realidade da estrutura fundiária nacional para mensurar a potencial abrangência do SBCE no setor.

As três projeções de custos fixos e as três projeções de cotações de crédito de carbono em mercado regulado são apresentadas na Tabela 6. A menor projeção de custo anual foi de R\$ 31.229, a de custo mediano de R\$ 62.457 e a de maior custo foi de R\$ 124.914 por ano. O detalhamento do custo fixo mediano segue apresentado na Tabela 26, do Apêndice 2 desta tese. Esses custos se restringem à transação e se referem apenas ao pagamento de taxas de certificação dos créditos de carbono no projeto específico de uma propriedade cafeeira. Como já assinalado, Vargas *et al.* (2022) apontam que o processo de reconhecimento dos créditos de carbono tem um custo bastante expressivo, especialmente decorrente da aplicação dos métodos de Mensuração, Relato e Verificação (MRV).

As três projeções do valor médio do crédito de carbono estimadas com base em cotações históricas do *Carbon Emissions Futures*, da Intercontinental Exchange (ICE), por meio de simulações de Monte Carlo, foram de R\$ 246, R\$ 262 e R\$ 277. Essas projeções refletem a situação em que um mercado regulado brasileiro de créditos de carbono seja integrado a outros mercados internacionais, a exemplo do mercado regulado europeu (EU ETS).

Tabela 6 - Projeções de custos e de cotações de crédito de carbono

Projeções	Custos 1	Custos 2	Custos 3
Custos Fixos de Certificação (em reais / ano)	31.229	62.457	124.914

Projeções	Cotação 1	Cotação 2	Cotação 3
Cotação do Crédito de Carbono (em reais)	246	262	277

Fonte: elaboração própria, com base em Vargas *et al.* (2022a), (GOLD STANDARD, 2022) e (EBC, 2022) e em simulações da *Carbon Emissions Futures*.

Consolidando essas estimativas, com base nas combinações das três projeções de custos com as três projeções de valor médio do crédito de carbono, foi possível indicar as áreas mínimas de viabilidade do comércio de créditos de carbono por cafeicultores, conforme apresentado na Tabela 7. Os resultados demonstram que em um cenário menos favorável ao comércio de créditos de carbono, o tamanho mínimo da lavoura cafeeira - em uma propriedade que adote práticas agrícolas, promova o sequestro de carbono e venda seus créditos - é de 320 hectares. Dito de outra forma, o comércio de créditos de carbono, exclusivamente da lavoura cafeeira, apenas seria atrativo para o cafeicultor se essa lavoura tivesse mais de 320 hectares de área, indicado pelo cenário de custos anuais mais elevados (Custos 3) e cotação mais baixa (Cotação 1). No cenário mais favorável ao comércio de créditos de carbono, que contempla custos anuais mais baixos (Custos 1) e cotação mais elevada (Cotação 3), a área mínima de uma lavoura viável para comercialização de créditos de carbono seria de 50 hectares.

Tabela 7 - Cenários com áreas mínimas de viabilidade do comércio de créditos de carbono na cafeicultura

	Área mínima de viabilidade (em hectares)		
	Custos 1	Custos 2	Custos 3
Cotação 1	80	160	320
Cotação 2	61	122	244
Cotação 3	50	100	200

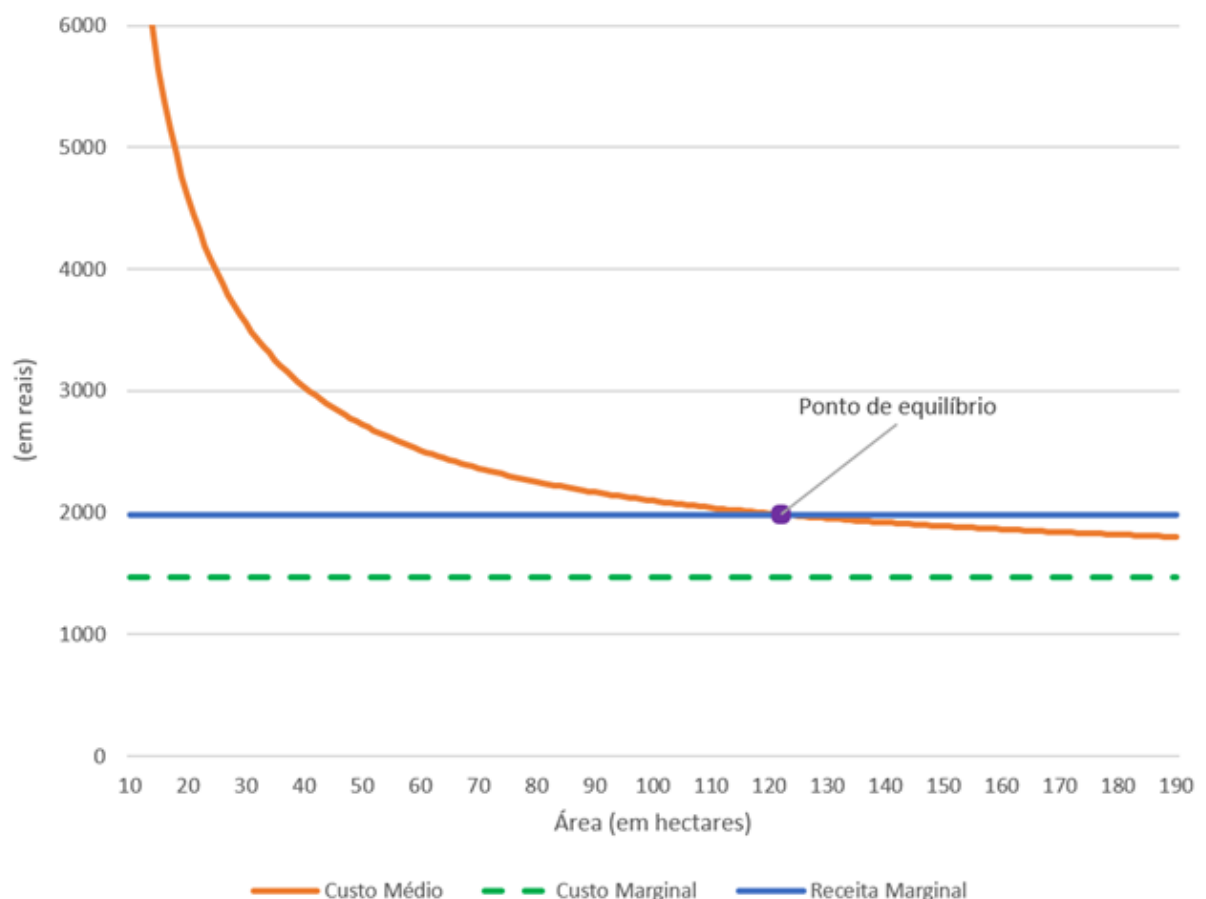
Fonte: elaboração própria, com base nos cenários simulados de custos e cotações de créditos de carbono.

Os custos e as receitas do cenário mediano (Custos 2 e Cotação 2) estão apresentados graficamente para uma propriedade hipotética com lavoura cafeeira apta ao sequestro de carbono por boas práticas agrícolas na Figura 3. Nessa figura estão representadas as curvas de Custo Médio, Custo Marginal e Receita Marginal, considerando um ano de atividade. Nessa situação hipotética, é possível visualizar que a partir de 122 hectares a Receita Marginal (que neste caso se iguala à Receita Média) cruza e passa a ser superior ao Custo Médio, indicando a viabilidade financeira pelo método do preço de equilíbrio. O comportamento de cada curva da Figura 3 é derivado dos seguintes dados:

- O Custo Marginal é constante, representado por uma reta horizontal, no nível de R\$ 1.474 por hectare até que toda área de lavoura apta para o sequestro de carbono seja atingida; após esse ponto, o Custo Marginal se eleva na mesma medida do custo de formação de novas áreas de lavoura por hectare. Vale ressaltar que o nível de produto foi padronizado por um hectare, considerando o crédito de 7,58 tCO₂eq ha⁻¹, ou seja, foi considerado custo marginal de produção de R\$ 1.474 para produzir 7,58 tCO₂eq em cada hectare da lavoura;

- A curva de Custo Médio, que resulta da divisão do Custo Total pela área em número de hectares, é decrescente a taxas decrescentes até que toda área de lavoura apta para o sequestro de carbono seja atingida; nessa fase, são observados ganhos de escala, pois o Custo Fixo vai sendo rateado por nível de produto, que no presente estudo é medido por hectare;

Figura 3 - Custos e receitas de créditos de carbono em uma propriedade de café no cenário Custos 2 x Cotação 2



Fonte: elaboração própria, com base em projeções de custo de certificação e preço de crédito de carbono do cenário Custos 2 x Cotação 2.

- Dessa forma, a Receita Marginal, que representa o acréscimo na receita gerado por cada hectare adicional apto ao sequestro é constante em R\$ 1.986. Sua representação gráfica se dá por uma reta horizontal, que nesse caso de preço constante, também se iguala à Receita Média.

Adicionalmente, o Custo Total, que soma o Custo Fixo de certificação de R\$ 62.457 e um Custo Variável de R\$ 1.474, conforme já mencionado e detalhado no Apêndice 2, poderia ser representado graficamente por uma reta que tem seu intercepto em R\$ 62.457 e cresce R\$ 1.474 por hectare. E, além disso, a Receita Total poderia ser representada por uma reta crescente com intercepto na origem que aumenta aproximadamente R\$ 1.986 por hectare, pois essa é a receita gerada por 7,58 tCO₂eq por hectare, considerando a Cotação 2, que foi estimada em R\$ 262 por tCO₂eq.

Em essência, deve-se ressaltar que, na simulação realizada, se observou rendimento crescente de escala decorrente do Custo Médio decrescente até o tamanho da lavoura cafeeira apto para o sequestro de carbono. Quando o potencial de produção de crédito de carbono é atingido em toda área apta formada de cafeicultura, o Custo Marginal apresenta um salto equivalente ao custo de expansão de um novo hectare em lavoura cafeeira.

Considerando o exemplo de uma propriedade com 200 hectares de lavoura cafeeira, no cenário (Custos 2 x Cotação 2), toda área de lavoura seria utilizada para sequestrar carbono e geraria um lucro de R\$ 39.935 por ano. Assim, fica clara que a atividade em análise segue uma economia de escala, sendo o Custo Médio decrescente, até que a área de lavoura apta para redução de GEE seja atingida.

Diante desse exemplo, que demonstra a viabilidade de venda de créditos de carbono provenientes de uma lavoura cafeeira de 200 hectares, vale ressaltar que apenas 2% dos estabelecimentos produtores de café têm áreas iguais ou superiores a essa no Brasil, de acordo com o Censo Agropecuário de 2017 (IBGE, 2019).

Em outra análise, no cenário mais favorável ao comércio de créditos de carbono, com os menores custos e maiores cotações projetados (Custos 1 x Cotação 3), a área mínima de uma lavoura viável para comercialização de créditos de carbono seria de 50 hectares. Nesse caso, considerando a estrutura fundiária da cafeicultura apurada pelo Censo Agropecuário de 2017 (IBGE, 2019), a política ambiental do mercado de carbono regulado teria potencial para abranger até 52% da área colhida total da cafeicultura brasileira, com a participação de até 12% dos estabelecimentos produtores de café.

Por fim, no cenário menos favorável ao comércio de créditos de carbono (Custos 3 x Cotação 1), cuja área mínima de uma lavoura viável para comercialização de créditos de

carbono seria de 320 hectares, as compensações da política ambiental de *cap and trade* do mercado de carbono regulado abrangeria potencialmente menos de 2% dos estabelecimentos produtores de café, os quais detêm 14% da área total da cafeicultura brasileira¹⁸, com base nos dados do IBGE (2019), que constam do Apêndice 1 desta tese.

4.3 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

É relevante reforçar que os resultados deste estudo exploratório foram obtidos a partir de projeções de cotações de créditos de carbono que têm um comportamento bastante volátil. Os preços do carbono oscilam nos mercados voluntários e regulados devido à interação de fatores econômicos (oferta e demanda), mudanças regulatórias, políticas e tecnológicas, e também em decorrência da confiança nos mecanismos de compensação e redução de emissões.

O crescimento econômico, a demanda por energia e a quantidades de permissões disponíveis afetam principalmente as cotações de créditos de carbono nos mercados regulados. Como exemplo, ao analisar o mercado regulado da União Europeia, EU ETS, resultados da pesquisa de Dong *et al.* (2022) mostraram que o surto da pandemia da COVID-19 causou uma queda significativa no preço do carbono. No entanto, com a introdução do plano de recuperação verde de EUR 750 bilhões, o mercado de carbono se estabilizou gradualmente e o preço do carbono começou a subir.

Para reduzir a incertezas dessas cotações, este trabalho considerou diferentes cenários com cotações maiores e menores calculadas com base no desvio padrão observado de 2012 a 2022. Não obstante, as cotações futuras de carbono podem não seguir o comportamento do período observado.

De forma semelhante, os custos de certificação dos créditos de carbono e de abatimento das emissões de GEE na cafeicultura podem assumir montantes diferentes das projeções realizadas neste capítulo. Assim, os custos de certificação podem ser diferentes a depender das certificadoras habilitadas a atuarem neste mercado e os custos de redução dos GEE devem variar de acordo com os fatores de emissão de cada lavoura com sua particularidade de condições de solo, clima e tecnologia. Ainda assim, os resultados obtidos

¹⁸ O Censo Agropecuário não quantifica especificamente o número de produtores com área de 320 hectares ou mais. Suas faixas de área incluídas na pesquisa seguem a estratificação constante do Apêndice 1. Produtores com no mínimo 320 hectares estão classificados entre as faixas de 200 hectares e de 500 hectares, que pertencem a 2% e 1% dos estabelecimentos, que são responsáveis por 27% e 14% da área colhida total, respectivamente.

com as informações que estão disponíveis atualmente fornecem subsídios extremamente relevantes para a tomada de decisão de implementação do mercado de carbono e também pelo setor cafeeiro.

Portanto, com os dados utilizados, fica evidenciado que uma análise prospectiva de custo-efetividade do mercado de carbono, especificamente para a cafeicultura, indica uma inserção relativamente baixa das lavouras cafeeiras, em termos percentuais, como observado. A relação benefício / custo conota viabilidade da inserção no mercado de carbono para escalas de produção expressivamente altas, em termos de área colhida de café, quando comparada com a característica fundiária da cafeicultura brasileira.

Para essa análise, com base em Perman *et al.* (2003), os custos de transação foram adicionados às comparações de custos, o que de fato teve impacto na avaliação de custo-efetividade do mercado de carbono na cafeicultura. Em síntese, os custos de transação da certificação dos créditos de carbono pelo cafeicultor são os principais entraves para que a relação benefício / custo seja positiva em propriedades menores que 50 hectares, área estimada no cenário mais favorável. Vale enfatizar que, em um cenário intermediário, tais custos inviabilizariam a inserção de lavouras cafeeira com menos de 122 hectares nas compensações da política de *cap and trade*.

Em complemento, pela análise de equidade do mercado de carbono, no caso em tela, os resultados deste estudo indicam implicações negativas do uso desse instrumento para a distribuição de renda na cafeicultura, considerando projeções na situação “*business as usual*”. Ou seja, caso os elevados custos de certificação sejam mantidos e as projeções de preços do carbono acompanhem o comportamento observado dos preços do carbono nos principais mercados regulados, a venda de créditos de carbono na cafeicultura será atrativa apenas para grandes propriedades cafeeiras, o que teria possivelmente um efeito concentrador de renda.

Assim, é necessário que o planejamento desse Mercado Brasileiro de Redução de Emissões contemple meios institucionais de redução dos custos de certificação. Com base nas opções apresentadas por Cacho *et al.* (2013), citado anteriormente, é recomendável permitir, por exemplo, que esses processos de certificação sejam conduzidos por cooperativas de cafeicultores que, por meio da agregação, incrementam a escala de produção ao somar as áreas produtivas de seus cooperados, permitindo o rateio desses custos.

Além disso, de metodologias de implementação e monitoramento podem ser desenvolvidas por meio da pesquisa tecnológica agrícola, como por exemplo metodologias de balanço de carbono de menor custo. Esse avanço tecnológico pode reduzir os dispêndios de Mensuração, Relato e Verificação (MRV), inerentes a esses processos de certificação.

4.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO

Os cenários prospectados neste estudo indicam que, no âmbito do mercado regulado de carbono no sistema *cap and trade*, onde a cafeicultura atua como ofertante de créditos de compensação, a escala mínima de viabilidade financeira da comercialização de créditos de carbono provenientes da cafeicultura é elevada em comparação com a escala de quase a totalidade das propriedades rurais cafeeiras no País. Vale mencionar que os resultados obtidos referem-se à viabilidade econômica da geração de créditos de carbono por produtores rurais em um contexto de precificação regulada das emissões, não à participação desses produtores como agentes diretamente sujeitos ao teto de emissões do sistema *cap and trade*.

Como destaque, foi possível observar que a significativa disparidade das áreas mínimas de viabilidade pode ser atribuída à mudança nos custos projetados. Tais custos, em especial os custos fixos de certificação, considerados como custos de transação, inviabilizariam a comercialização de créditos de carbono para pelo menos 88% dos estabelecimentos produtores de café. Não obstante, caso se contemplem mecanismos que reduzam seus custos de transação, essa regulação do mercado de carbono tende a ser implementada de forma socialmente mais inclusiva com desenvolvimento regional aliado a incremento e distribuição de renda.

Faz-se necessário, portanto, realizar mais estudos sobre a forma de implementar o mercado regulado de carbono no Brasil. Ainda assim, vale ressaltar a importância de buscar meios institucionais de mitigação de tais custos de certificação, estabelecendo por exemplo, a possibilidade de esses processos de certificação serem conduzidos por cooperativas de cafeicultores. Adicionalmente, pesquisa tecnológica agrícola deve receber apoio para desenvolver metodologias de balanço de carbono de menor custo para aumentar a viabilidade do processo de certificação. Essas recomendações podem contribuir para a sustentabilidade dos Cafés do Brasil por meio do seu acesso ao mercado de carbono.

Embora este estudo prospectivo forneça subsídios para o planejamento da política pública de *cap and trade*, seus resultados não oferecem um estudo de viabilidade abrangente para o comércio de carbono provenientes de lavouras cafeeiras específicas, haja vista a diversidade da cafeicultura brasileira. Vale destacar que os fatores de emissão e os custos de adoção das práticas sustentáveis variam de acordo com as condições de solo e clima de cada lavoura cafeeira. Estudos que apliquem esse método a sistemas produtivos específicos de uma determinada região cafeeira tendem a obter resultados mais precisos da viabilidade do comércio de créditos de carbono advindos da cafeicultura. Logo, cada lavoura pode ter seu

potencial de geração de créditos com base em suas condições edafoclimáticas e tecnológicas, de acordo com os métodos de Mensuração, Relato e Verificação (MRV) de créditos de carbono que ainda carecem de regulação.

Considerando a incerteza sobre as cotações dos créditos de carbono, que podem oscilar expressivamente e ter comportamento distinto do considerado neste capítulo, esta pesquisa exploratória pode ser complementada com a mudança de parâmetros e atualização de dados ao passo que o arcabouço institucional do sistema de *cap and trade* quando o mercado regulado de carbono se consolidar no país. Os cenários também podem ter sua precisão incrementada por meio de análises dos custos variáveis de adoção de boas práticas e seu potencial para potencializar o sequestro de carbono na lavoura cafeeira. Por fim, de forma complementar, é possível estimar também possíveis ganhos da cafeicultura com créditos de carbono provenientes de áreas florestais que fazem parte da propriedade rural. Nesse contexto, constata-se uma ampla área de estudo que pode contribuir para o desenvolvimento agrícola sustentável do Brasil.

5 EFEITOS SOBRE AS DISPARIDADES REGIONAIS

A implementação do mercado de carbono regulado no Brasil constitui uma política de escopo ambiental que pode ter impactos distintos em diferentes regiões do País. A possível inserção da cafeicultura no mercado de carbono regulado, emoldurada pelo arcabouço teórico da economia regional, motiva esta análise de como a venda de créditos de carbono proveniente da cafeicultura pode ter impactos positivos no sentido de reduzir disparidades de renda regionais, tendo como unidade de referência o Produto Interno Bruto (PIB) municipal.

Para a consecução de seu objetivo, este estudo busca, primeiramente, mensurar as disparidades em termos do PIB per capita médio entre o grupo de municípios em concentrações urbanas e o grupo de municípios com lavouras cafeeiras. Considerando apenas municípios que produzem café, uma pesquisa mais aprofundada foi feita estratificando os municípios em dez faixas de predominância de grandes propriedades (a partir de 100 hectares).

Uma política ambiental de licenças negociáveis (*cap and trade*) potencializa aumento de renda proveniente de créditos de carbono e, assim, terá efeitos regionais distintos em diferentes municípios, dependendo da sua abrangência. Logo, como a escala mínima de viabilidade, decorrente de elevados gastos com certificação, considerados como custos de transação, tem expressiva influência na adesão de vendedores de carbono, na abrangência dessa política ambiental e na sua efetividade. Nesse contexto, compreender como diferentes

escalas de viabilidade afetam a abrangência do mercado de carbono, especificamente para a cafeicultura, em municípios de diferentes níveis de desenvolvimento econômico, contribui para potencializar os efeitos positivos da política de mercado de carbono, inclusive com a redução de disparidades econômicas de municípios brasileiros, favorecendo também políticas regionais e de desenvolvimento local.

Os resultados desta pesquisa poderão, portanto, indicar a possível efetividade do mercado de carbono regulado para a cafeicultura, como política pública ambiental e regional, e subsidiar o planejamento da implantação desse mercado no Brasil. Tendo em vista que a abordagem metodológica deste capítulo foi apresentada na Seção 2.3 desta tese e os aspectos conceituais do sistema de licenças negociáveis foi apresentado no capítulo 4, o presente capítulo 5 está estruturado em quatro seções centrais, além desta Introdução e das Considerações finais do capítulo.

A próxima seção (5.1) apresenta aspectos teóricos da política regional de desenvolvimento local, enfatizando a dimensão do espaço geográfico e suas repercussões para um funcionamento eficaz de um mercado de créditos de carbono. Nela destacamos como esse tipo de mercado pode dialogar com uma política regional e de desenvolvimento local. Logo após, a seção 5.2 apresenta cartogramas representativos de grupos de municípios estratificados. Na seção 5.3, grupos de municípios serão comparados quantitativamente com base no PIB *per capita* municipal e na seção seguinte (5.4) são discutidas implicações dos resultados com simulações de municípios selecionados a título de exemplificação.

5.1 ASPECTOS TEÓRICOS DA POLÍTICA REGIONAL

O estudo do desenvolvimento econômico regional tem a região como objeto de análise. Dessa forma, requer a conceituação ou definição do que se entende por região. Conceitos já consolidados utilizados por exemplo por Polèse (1998) e Lopes (2005) utiliza o princípio da contiguidade para definir região. Por ele, os elementos que compõem a região têm que localizar-se necessariamente de forma contígua. Além disso, Polèse (1998) sugere os critérios da homogeneidade, polaridade e planejamento para definir regiões.

Ainda de acordo com Polèse (1998), as disparidades regionais se dão de duas formas: desigualdades no nível de bem-estar ou rendimento dos indivíduos; e desigualdades na distribuição espacial das atividades econômicas e das populações. É possível constatar que existem disparidades significativas entre regiões rurais e urbanas no Brasil, as quais abrangem diversos aspectos, incluindo acesso a serviços básicos, infraestrutura, qualidade de vida, oportunidades de emprego, educação e saúde (Kohlhepp, 2010; Arruda *et al.*, 2018).

As diferenças salariais são consideradas elemento-chave para Polèse (1998), pois nos países industrializados, os salários representam 70% a 80% do rendimento das famílias, o que justifica destaque para esse indicador. Assim, vale citar estudo de Neder (2014) sobre a pobreza rural no Brasil que, utilizando os dados dos Censos Demográficos de 2000 e 2010, apontou que a concentração de trabalhadores mais bem remunerados volta-se para municípios de maior porte populacional, de forma que a precarização da ocupação agrícola aumenta na medida em que se interioriza a atividade.

Estratégias para atenuar essas desigualdades salariais buscam, entre outros mecanismos, incrementar a demanda de bens e serviços e consequentemente de trabalho nas regiões menos desenvolvidas. Esse mecanismo tem a capacidade de atrair capital e migrantes trabalhadores empreendedores mais escolarizados, com seus fatores intangíveis, tais como tecnologias e o saber-fazer. O que tende a promover o desenvolvimento dessas regiões (Polèse, 1998).

Ao analisar os efeitos de uma política regional, Polèse (1998) ressalta que o deslocamento positivo da curva de demanda pode ser motivado pelo aumento da produtividade ou pelo recebimento de investimentos. Além disso, o autor indica possíveis políticas de desenvolvimento local como sinérgicas para redução das disparidades regionais.

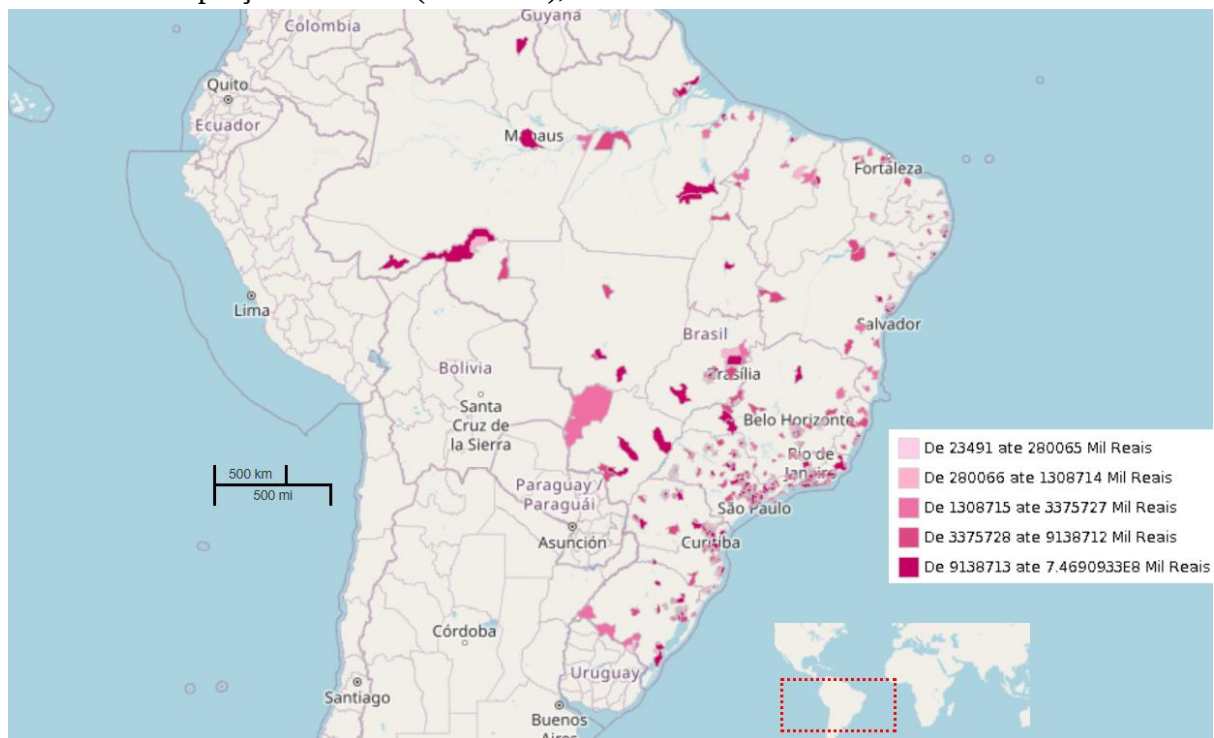
Sob a ótica da economia regional, as disparidades se manifestam por desigualdades de bem-estar e pela distribuição heterogênea das atividades econômicas no espaço. A injeção de novas fontes de renda em regiões menos desenvolvidas, como a venda de créditos de carbono pela cafeicultura, pode atenuar essas desigualdades. Tal mecanismo tende a aumentar a demanda local por bens e serviços, atraindo capital e trabalho qualificado, o que promove o desenvolvimento endógeno e reduz a dependência externa.

Nesse contexto, uma questão relevante é verificar se a inserção da cafeicultura no mercado de créditos de carbono tem um potencial real que possa ser explorado também por políticas de desenvolvimento local e regionais. Assim, a redução de emissões e venda de créditos de carbono pela cafeicultura teria potencial de contribuir para a preservação ambiental, e, adicionalmente, incrementar e diversificar renda em regiões rurais cafeeiras do Brasil. Logo, a promoção dessa atividade pode também reduzir a desigualdade entre o meio rural e o urbano. Adicionalmente, esse efeito positivo na renda tende a aumentar a demanda de bens e serviços em regiões rurais e deslocar a curva de demanda de trabalho, requisitos para atrair capital físico e humano, com seus fatores intangíveis.

5.2 REPRESENTAÇÃO ESPACIAL POR CARTOGRAMAS

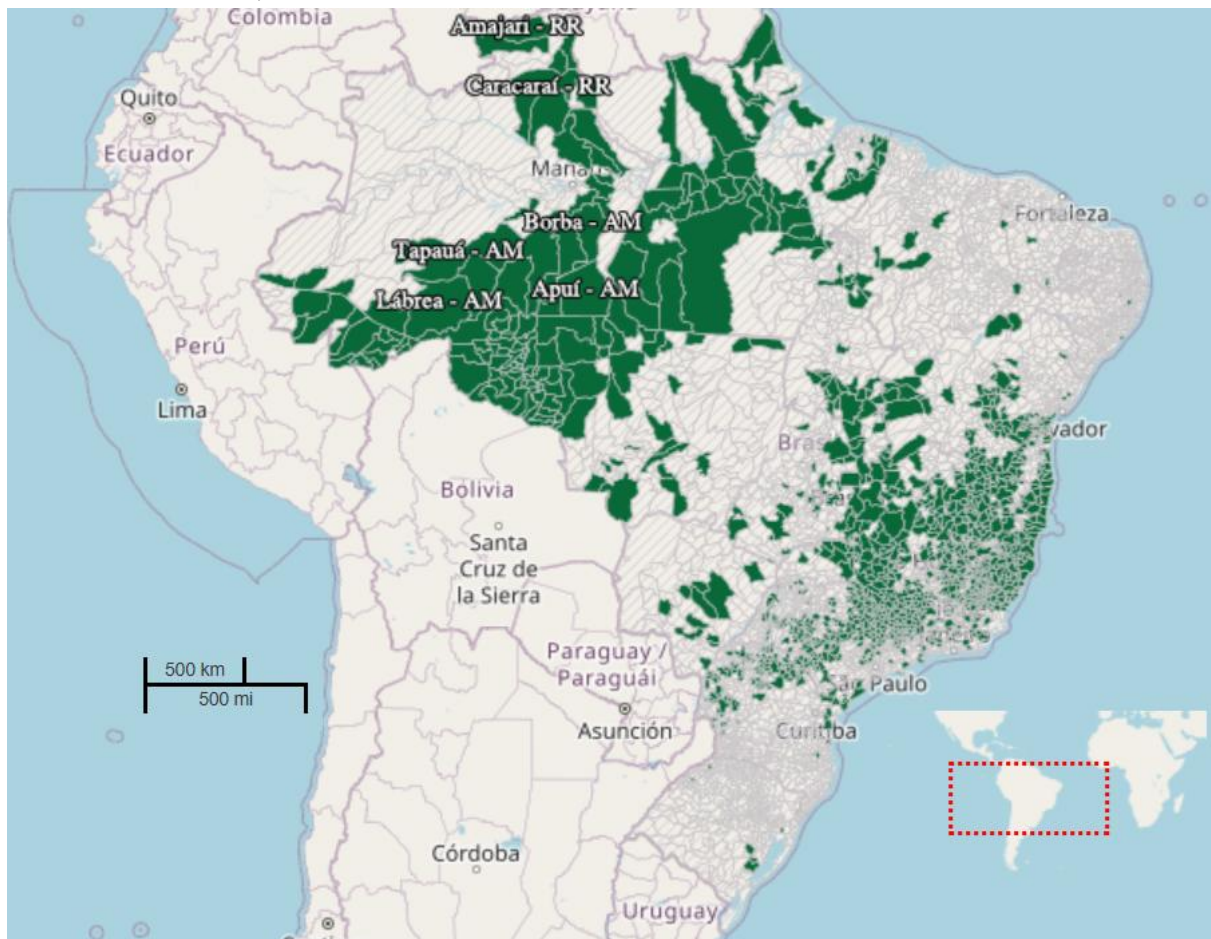
A disposição espacial dos municípios estratificados nos três grupos de análise pode ser visualizada em três figuras de acordo com cada grupo previamente definido. A Figura 4 apresenta o cartograma dos municípios em concentrações urbanas, classificados por faixas de PIB, de acordo com o IBGE (2022). Dessa forma, ela apresenta a distribuição espacial dos 660 municípios em concentrações urbanas classificadas pelo IBGE, que coincidem majoritariamente com adensamentos de capitais e seus arredores, mostrando-se geograficamente menos abrangente que a cafeicultura. Esses municípios, por sua vez, são apresentados na Figura 5.

Figura 4 - Cartograma dos municípios em concentrações urbanas classificados por PIB a preços correntes (mil Reais), ano-base 2020



Fonte: IBGE (2022).

Figura 5 - Cartograma dos municípios com área de lavouras de café no Brasil com 50 pés e mais, ano-base 2017

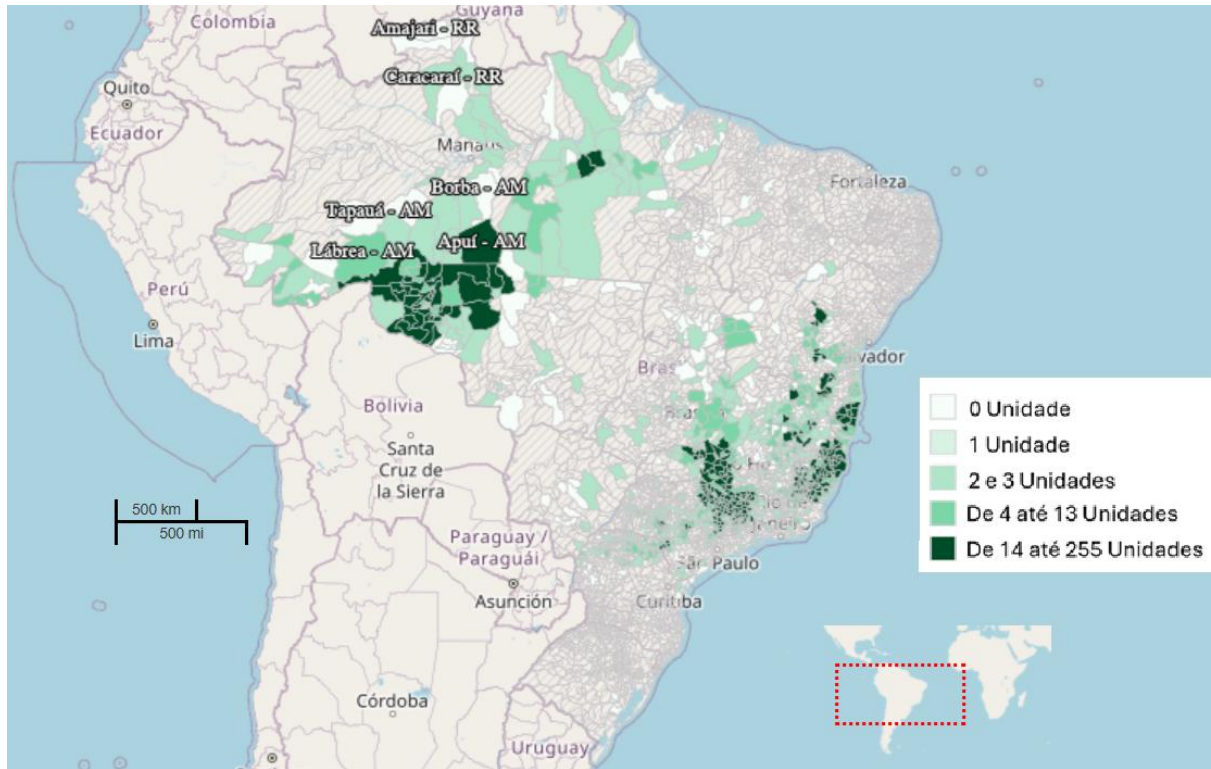


Fonte: IBGE (2019).

Com a Figura 5, fica explícita a significativa abrangência da cafeicultura em nosso País que, de acordo com IBGE (2019), está presente em 1.288 municípios¹⁹ de acordo com o Censo Agropecuário de 2017, o que representa mais de 23% dos 5.570 municípios brasileiros. Um número um pouco mais restrito de 1.116 municípios possui pelo menos uma lavoura com 100 hectares ou mais de área. A distribuição espacial desses municípios nos principais estados produtores é representada na Figura 6.

¹⁹ Número de municípios com pelo menos um estabelecimento com 50 pés ou mais de café.

Figura 6 - Cartograma dos municípios com lavouras de café no Brasil, classificados por número de propriedade com 100 hectares ou mais, ano-base 2017



Fonte: IBGE (2019).

A Figura 6 apresenta também a classificação de cinco percentis por tons de cor verde que indica a quantidade de lavouras com pelo menos 100 hectares em cada município. O mapa mostra uma quantidade reduzida de apenas 279 municípios que possuem pelo menos 14 propriedades com lavouras de 100 hectares ou mais, que estão no 80º percentil, ou seja, a quinta parte dos municípios com mais propriedades desse porte. O cartograma com essa classificação foi gerado pelo sistema StatGeo do IBGE, com dados do Censo Agropecuário de 2017 (IBGE, 2019).

Dessa forma, essas três representações cartográficas permitem visualizar de forma geral a possível abrangência regional da política de *cap and trade* por meio do comércio de créditos de carbono provenientes da cafeicultura, o que poderá ser melhor compreendido por meio das comparações quantitativas que serão apresentadas na próxima subseção.

5.3 COMPARAÇÕES QUANTITATIVAS

Comparações quantitativas com base no PIB *per capita* municipal foram utilizadas para mensurar disparidades econômicas entre grupos de municípios. Esta seção tem a proposta de compreender a possível redução de disparidade econômica em diferentes regiões,

por meio de três comparações do PIB *per capita* médio: a) comparação de conjuntos de municípios estratificados primeiramente em dois grupos: municípios em concentrações urbanas e municípios com lavouras de café; e b) comparação dos 10 grupos de municípios que produzem café, que foram estratificados de acordo com a porcentagem de propriedades com 100 hectares ou mais que têm produção de café, em sua jurisdição²⁰.

5.3.1 Municípios em concentrações urbanas e municípios com lavouras de café

O Censo Agropecuário de 2017 apurou que dos 5.571 municípios brasileiros, 1.288 municípios²¹ têm pelo menos um hectare de lavoura cafeeira (IBGE, 2019). Com base nos dados do Produto Interno Bruto Municipal de 2020, apurados pelo IBGE (2022), o PIB *per capita* médio dos municípios com pelo menos um hectare de lavoura cafeeira foi de R\$ 25.728, enquanto o PIB *per capita* médio dos 523 municípios em concentrações urbanas²² foi de R\$ 40.856, ou seja, o PIB *per capita* médio dos municípios com lavouras de café correspondeu a 63% do PIB *per capita* médio dos municípios em concentrações urbanas.

Para verificar se essa diferença é estatisticamente significativa, foi realizado o teste t de Welch, conforme Tabela 8, cujo resultado significativo aponta que uma diferença média de R\$ 15.127, que com o intervalo de confiança de 95%, pode variar de 11.293 a 18.961.

Tabela 8 - Comparação do PIB *per capita* entre municípios urbanos e cafeeiros

Teste	Variável	Municípios cafeeiros (n=1151)	Municípios urbanos (n=523)	Diferença média	Estatística	p-valor
Teste t de Welch	PIB <i>per capita</i>	Média = 25.728	Média = 40.856	-15.127	t = -7,75	0,000
Teste t de Welch	Log (PIB <i>per capita</i>)	Média = 9,96	Média = 10,35	-0,39	t = -11,58	0,000
Mann-Whitney (Rank Sum)	PIB <i>per capita</i>	Rank sum = 860.384	Rank sum = 541.591	—	z = -11,30	0,000

Fonte: Resultados da pesquisa com base em dados do IBGE (2019) e IBGE (2022).

Nota: O código de replicação dos testes está disponível no Apêndice 5.

Com o intuito de mitigar a influência de valores extremos e normalizar a distribuição dos dados, procedeu-se à transformação logarítmica do PIB *per capita* municipal e aplicou-se

²⁰ O código para replicação dos testes estatísticos realizados nesta seção 5.3 está disponível no Apêndice 5 desta tese.

²¹ Número de municípios com pelo menos um estabelecimento com 50 pés ou mais de café.

²² Para comparar esses dois grupos, foram excluídos 137 municípios com produção de café que estão em concentrações urbanas, ou seja, que estavam classificados nos dois grupos. Dessa forma, foram comparados 1.151 municípios com pelo menos um hectare de lavoura cafeeira e 523 municípios em concentrações urbanas.

então o teste t de Welch para comparar os valores transformados entre os grupos analisados. Os resultados obtidos também evidenciaram uma disparidade economicamente significativa no logaritmo do PIB *per capita* entre municípios classificados como cafeeiros e urbanos.

O grupo de municípios urbanos registrou uma média superior ($M = 10,351$; $DP = 0,671$), enquanto os municípios cafeeiros apresentaram uma média menor ($M = 9,957$; $DP = 0,586$). A análise inferencial confirmou que essa diferença é estatisticamente significativa ($t(896,85) = 11,58$; $p < 0,001$). A magnitude dessa diferença, calculada em $-0,395$, com um intervalo de confiança de 95% na faixa de $0,461$ a $0,328$, não apenas corrobora a relevância estatística do resultado, mas também sugere uma substantiva diferença econômica real entre os dois grupos.

Em complemento, o teste não paramétrico de Mann–Whitney confirmou a robustez dos resultados: $z = -11,30$; $p < 0,001$, evidenciando que a mediana do PIB *per capita* é significativamente maior nos municípios urbanos e, assim, os municípios urbanos tendem a apresentar valores de PIB *per capita* mais altos do que os não urbanos.

Em conjunto, esses testes indicam de forma consistente e robusta que municípios urbanos possuem PIB *per capita* significativamente superior aos municípios cafeeiros. Dessa forma, mantendo-se tudo mais constante, espera-se que efeito positivo do comércio de créditos de carbono em municípios com lavouras de café, se confirmado, tenderia a reduzir uma expressiva disparidade econômica de regiões rurais e urbanas, em termos de PIB.

5.3.2 Grupos de municípios por faixas percentuais de grandes propriedades

Para mensurar e analisar as disparidades econômicas dos municípios com diferentes percentuais de grandes propriedades cafeeiras, procedeu-se a uma análise quantitativa com base no PIB *per capita* municipal de 2020 com a comparação de 10 agrupamentos de municípios que foram estratificados de acordo com a porcentagem de propriedades com 100 hectares ou mais que têm produção de café, em sua jurisdição.

As dez faixas de percentuais de propriedades com 100 hectares ou mais são as seguintes: municípios com menos de 10%, de 10% a menos de 20%, de 20% a menos de 30%, de 30% a menos de 40%, de 40% a menos de 50%, de 50% a menos de 60%, de 60% a menos de 70%, de 70% a menos de 80%, de 80% a menos de 90%, de 90% a menos de 100% e de municípios com 100% de propriedades que produzem café com pelo menos 100 hectares.

A análise foi conduzida em etapas sequenciais para testar a existência de diferenças entre os grupos e, posteriormente, a natureza de tais diferenças. Inicialmente, buscou-se verificar a existência de uma diferença global nas médias do PIB *per capita* entre os

municípios agrupados segundo as faixas de predominância de grandes propriedades. Um teste de Análise de Variância (ANOVA) indicou uma diferença geral significativa entre os grupos ($F(9, 1278) = 3,09, p = 0,0011$). Contudo, o Teste de Bartlett apontou para uma violação do pressuposto de igualdade de variâncias ($\chi^2(9) = 115,08, p = 0,000$), indicando a necessidade de um teste mais robusto.

Para corrigir essa violação, utilizou-se o teste robusto de Brown-Forsythe. Este teste confirmou o resultado anterior, mostrando que existe uma diferença geral estatisticamente significativa no PIB *per capita* entre os grupos ($W(9, 1278) = 3,44, p = 0,0003$). Tal resultado corrobora, de maneira robusta, que a estrutura fundiária, categorizada em faixas, está associada a diferenças relevantes no PIB *per capita* municipal.

Uma vez confirmada a existência de uma diferença global, o passo seguinte foi identificar quais pares de grupos específicos apresentavam diferenças significativas. Para tanto, empregou-se o teste *post-hoc* de Games-Howell, apropriado para comparações múltiplas com variâncias desiguais. O resultado desta análise revelou que, após a aplicação do rigoroso ajuste para comparações múltiplas, nenhuma diferença entre pares específicos de grupos se mostrou estatisticamente significativa ao nível de 5%. O menor p-valor ajustado observado foi de 0,474, na comparação entre os grupos 3 e 0.

Este achado, aparentemente contraditório, sugeriu que a significância geral detectada pelo teste de Brown-Forsythe não provinha de uma disparidade acentuada entre categorias específicas, mas sim de um padrão mais sistemático e distribuído. Com base nisso, levantou-se a hipótese de que a relação entre a predominância de propriedades a partir de 100 hectares e o PIB *per capita* seria mais bem descrita como uma tendência gradual.

Para testar esta hipótese, realizou-se uma análise de regressão linear simples. Os resultados confirmaram fortemente a existência de uma tendência linear positiva e estatisticamente significativa ($F(1, 1286) = 22,11, p = 0,0000$). O coeficiente da variável que indica as faixas percentuais de grandes propriedades foi de 1822,71 ($p = 0,000$), indicando que, em média, para cada aumento de uma unidade na categoria de predominância de propriedades cafeeiras a partir de 100 hectares, o PIB *per capita* municipal aumenta em R\$ 1.822,71. Embora a variável explique uma pequena porção da variância total do PIB (R^2 ajustado = 0,0161), considerando que muitos outros fatores influenciam o PIB, a significância da tendência é robusta.

Em suma, a análise aprofundada esclarece os resultados iniciais: a estrutura fundiária da cafeicultura está associada ao desenvolvimento econômico municipal. No entanto, esse efeito se manifesta menos como diferenças abruptas entre estratos específicos e mais como

uma tendência gradual, na qual municípios com maior predominância de grandes propriedades tendem a apresentar, de forma sistemática, um PIB *per capita* mais elevado.

5.4 IMPLICAÇÕES DOS RESULTADOS OBTIDOS

Esses resultados, de forma geral, evidenciam que a maior concentração de grandes propriedades cafeeiras está associada a níveis mais elevados de PIB *per capita* municipal. Observando apenas a estrutura fundiária de regiões rurais cafeeiras, fica evidente a disparidade econômica entre os municípios com predominância de grandes propriedades cafeeiras e os demais municípios com lavouras cafeeiras.

E, seguindo o pressuposto mencionado de que o comércio de créditos de carbono diversifica e aumenta a renda dos cafeicultores e, logo, tem potencial efeito positivo sobre o PIB municipal, é possível inferir que caso a escala mínima de viabilidade de projetos de crédito de carbono seja de 100 hectares, haveria um incremento da diferença do PIB *per capita* de municípios com predominância de grandes propriedades cafeeiras em relação aos demais municípios com lavouras cafeeiras.

Ou seja, a venda de créditos de carbono, provenientes de lavouras com no mínimo 100 hectares, tenderia a aumentar a disparidade entre os municípios com predominância de grandes propriedades cafeeiras em relação aos outros municípios que produzem café. Por outro lado, conforme verificado pela comparação (a), haveria redução da disparidade entre os municípios que produzem café e os municípios em concentrações urbanas.

Nesse sentido, vale ressaltar que os custos de transação da certificação dos créditos de carbono pelo cafeicultor são os principais entraves para que a relação benefício / custo seja atrativa para estabelecimentos com lavouras de menor área. Portanto, os resultados deste trabalho indicam baixo efeito na redução da disparidade regional com o uso desse instrumento, considerando projeções na situação “*business as usual*” indicada pela escala de viabilidade mínima (Santos e Nogueira, 2025).

Em síntese, caso os elevados custos de certificação sejam mantidos, a venda de créditos de carbono na cafeicultura será restrita apenas a grandes propriedades cafeeiras, o que poderia reduzir apenas a disparidade entre os municípios com predominância de grandes propriedades em relação às metrópoles, mas provavelmente não traria efeitos diretos significativos para municípios com predominância de propriedades menores, que representam a maioria expressiva dos municípios com atividade cafeeira.

Para dimensionar o impacto econômico e ambiental que essas restrições de escala podem impor, estimou-se o potencial de redução de GEE e de geração de receita em

diferentes cenários de viabilidade (Santos e Nogueira, 2025; Santos e Nogueira, 2025b). A análise, baseada nessas projeções, especialmente para as escalas mínimas de viabilidade de propriedades com 50 hectares e 200 hectares, ilustra de forma contundente como a definição de uma área mínima elegível afeta diretamente o alcance da política.

Por exemplo, se a escala mínima for de 10 hectares, o potencial de redução de GEE é de 13.019.187 tCO₂eq e o potencial de receita é de R\$ 3,6 bilhões. Esses montantes caem para 4.305.069 tCO₂eq e R\$ 1,2 bilhão se apenas propriedades acima de 200 hectares forem elegíveis, demonstrando que a definição do porte das propriedades impacta diretamente o resultado financeiro e ambiental. Os potenciais de redução de GEE e receita para diferentes escalas de viabilidade, em nível regional e municipal, encontram-se detalhados nas Tabelas 28 a 31, do Apêndice 4.

A análise de potencial regional do Santos e Nogueira (2025b) confirma essa tendência. Como exemplos, com base nas Tabelas 28 e 29 (Apêndice 4), projeções das Regiões Geográficas Intermediárias²³ de Varginha (MG) e Cachoeiro do Itapemirim (ES) evidenciam os impactos potenciais sobre a receita agrícola e a redução de GEE caso apenas propriedades cafeeiras com mais de 50 hectares ou com no mínimo 200 hectares sejam elegíveis para participar do mercado regulado de carbono. Na Região de Varginha, quando consideradas as lavouras a partir de 50 hectares, a receita alcança aproximadamente R\$ 646,4 milhões, com uma redução estimada de 2,33 milhões de toneladas de CO₂ equivalente. Entretanto, ao restringir a elegibilidade a propriedades com 200 hectares ou mais, a receita cai para R\$ 326,1 milhões, e a redução de GEE diminui para 1,18 milhão de toneladas, revelando perdas potenciais significativas tanto econômicas quanto ambientais. Situação semelhante ocorre em Cachoeiro do Itapemirim, onde a receita das lavouras elegíveis é reduzida de R\$ 53 milhões para R\$ 10,76 milhões, e a mitigação de GEE cai de 191,5 mil para 38,9 mil toneladas de CO₂ equivalente.

Em nível municipal, a exclusão é ainda mais pronunciada. Os municípios de Patrocínio (MG) e Carmo do Rio Claro (MG), por exemplo, ilustram claramente os impactos que podem ocorrer caso o mercado de carbono regulado permita a participação de propriedades cafeeiras com área a partir de 50 hectares ou, de forma mais restrita, com no mínimo 200 hectares. Em Patrocínio, a inclusão de lavouras a partir de 50 hectares resultaria em uma receita agrícola de R\$ 37,5 milhões e uma redução de 135,6 mil toneladas de CO₂ equivalente, conforme dados

²³ Regiões Intermediárias classificadas de acordo com IBGE (2017).

das Tabelas 30 e 31 (Apêndice 4). No entanto, se a elegibilidade for limitada apenas às propriedades com 200 hectares ou mais, esses valores despencam para R\$ 4,7 milhões em receita e apenas 16,9 mil toneladas de redução de GEE, indicando uma perda significativa de potencial econômico e ambiental.

Já em Carmo do Rio Claro, nenhuma propriedade cafeeira atinge a marca dos 200 hectares, o que significa que, sob esse critério, o município ficaria completamente excluído do mercado regulado de carbono, perdendo a oportunidade de converter mais de R\$ 8,9 milhões em receita e evitar a emissão de 32 mil toneladas de CO₂ equivalente. Esses casos evidenciam que custos excessivamente restritivos podem comprometer tanto a efetividade climática quanto a inclusão socioeconômica no setor cafeeiro.

Conclui-se que a adoção de critérios de elegibilidade muito restritivos, baseados área mínima viável da propriedade, pode comprometer significativamente a contribuição do setor cafeeiro para as ambiciosas metas de mitigação do Plano ABC+ por meio da política pública do Mercado Brasileiro de Redução de Emissões. Além de limitar o alcance ambiental, essa restrição exclui economicamente um grande número de produtores de pequeno e médio porte, concentrando os benefícios do mercado de carbono em um grupo menor de grandes propriedades.

5.5 CONCLUSÕES DO CAPÍTULO

Diante dos conceitos apresentados e das possibilidades de rentabilização do comércio de créditos de carbono provenientes da cafeicultura, no âmbito do mercado regulado de carbono no sistema *cap and trade*, constata-se que essa atividade tem potencial para compor estratégias de políticas regionais e de desenvolvimento local, em regiões rurais do Brasil.

Em resumo, os resultados confirmam o potencial ambíguo da política de carbono na cafeicultura: ela pode reduzir a significativa disparidade econômica entre municípios rurais e urbanos, mas corre o risco de acentuar as disparidades dentro do universo cafeeiro. Isso ocorreria caso os custos de transação restrinjam a participação aos municípios com predominância de grandes propriedades, que já possuem PIB *per capita* superior, excluindo a maioria dos produtores familiares.

Caso contemple mecanismos que tornem seus custos de transação mais baixos, a regulação do mercado de carbono tende a ser implementada de forma socialmente mais inclusiva com desenvolvimento regional aliado a incremento e distribuição de renda. Nesse sentido, é preciso estimar o efeito multiplicador do comércio de créditos de carbono provenientes da cafeicultura nas regiões rurais para considerar a adoção dessa atividade em

política de desenvolvimento local ou a sua inserção em uma política regional, em consonância com os conceitos de Polèse (1998). Adicionalmente, o desenho de política deve prever mecanismos para aproveitar o efeito multiplicador dessa atividade em prol de um desenvolvimento que seja sustentado também no longo prazo.

Nesse contexto, os resultados sugerem que o planejamento desse Mercado Brasileiro de Redução de Emissões no sistema *cap and trade* contemple meios institucionais de redução dos custos de certificação. Com base nas opções apresentadas por Cacho *et al.* (2013), citado anteriormente, é recomendável permitir que esses processos de certificação sejam conduzidos por cooperativas de cafeicultores que, por meio da agregação, incrementam a escala de produção ao somar as áreas produtivas de seus cooperados, permitindo o rateio desses custos.

Além disso, metodologias de implementação e monitoramento podem ser desenvolvidas por meio da pesquisa tecnológica agrícola, como por exemplo metodologias de balanço de carbono de menor custo. Esse avanço tecnológico pode reduzir os dispêndios de Mensuração, Relato e Verificação (MRV), inerentes a esses processos de certificação, sem comprometer sua credibilidade internacional.

Essas recomendações podem contribuir, portanto, para a sustentabilidade dos Cafés do Brasil por meio do seu acesso inclusivo ao mercado de carbono. Pelo aspecto geográfico espacial, a inserção de propriedades com lavouras de menor área no comércio de créditos de carbono deve resultar no aumento de renda dos respectivos municípios e, conseqüentemente, ter efeitos positivos mais expressivos na redução de disparidades econômicas de municípios, contribuindo também para políticas regionais e de desenvolvimento local.

Por fim, esta pesquisa pode ser complementada com novos estudos sobre o efeito multiplicador do comércio de créditos de carbono e confirmação de possíveis escalas de viabilidade ao passo que o arcabouço institucional de sistema de *cap and trade* se consolide no nosso País. De forma complementar, é possível estimar também possíveis ganhos da cafeicultura com créditos de carbono provenientes de áreas florestais que fazem parte da propriedade rural e também com a comercialização de café carbono neutro certificado. Nesse contexto, constata-se uma ampla área de estudo que pode contribuir para o desenvolvimento agrícola e regional do Brasil.

6 CRÉDITOS DE CARBONO: MODELO DE DECISÃO DO AGRICULTOR

A transição de práticas convencionais para uma agricultura de baixo carbono representa uma decisão de investimento para o produtor²⁴. Essa decisão envolve uma análise complexa de custos e benefícios, riscos e oportunidades. Nesta tese, o produtor rural não é modelado como agente regulado sujeito ao cumprimento de metas obrigatórias de emissão. Sua participação ocorre como potencial ofertante de créditos de carbono oriundos de atividades de mitigação ou remoção de gases de efeito estufa. Assim, o foco da análise recai sobre a viabilidade econômica da geração desses créditos e sua possível comercialização em mercados regulados ou mecanismos de compensação reconhecidos pelo sistema regulatório.

A avaliação da viabilidade financeira e a otimização da participação dos produtores nesses novos mercados exigem, portanto, o desenvolvimento de modelos econômicos robustos. Tais modelos são ferramentas essenciais para analisar o *trade-off* fundamental enfrentado pelo agricultor: as receitas potenciais da venda de créditos de carbono versus os múltiplos custos associados à sua geração, certificação e comercialização.

A decisão de entrar no mercado de carbono é influenciada por vários fatores, incluindo a aversão ao risco do produtor, o acesso a capital para investimentos iniciais, o conhecimento técnico necessário para implementar e monitorar as novas práticas, e a capacidade de participar do complexo e oneroso processo de certificação de créditos. Os custos de certificação, por exemplo, podem ser monetariamente proibitivos e sua complexidade pode funcionar como uma barreira de mercado significativa, especialmente para produtores com áreas menores. Este modelo, portanto, busca formalizar a lógica de decisão de um produtor que pode superar essas barreiras iniciais, focando na otimização da alocação de seus recursos produtivos.

A própria existência de um mercado de carbono representa a materialização de um conceito econômico mais amplo: a financeirização de um serviço ecossistêmico. O processo natural de sequestro de carbono, antes uma externalidade positiva não remunerada da agricultura conservacionista, é transformado em um ativo com um preço de mercado estocástico $\tilde{P}$, sujeito às forças de oferta e demanda. O agricultor, tradicionalmente um produtor de *commodities* físicas, pode se tornar também um ator financeiro, gerenciando um novo ativo intangível e volátil.

²⁴ Este capítulo é uma versão adaptada do manuscrito 'Créditos de Carbono da Agricultura - Modelo Econômico de Decisão do Produtor Rural', de autoria de Santos, Nogueira & Torres (2026), ainda não publicado.

O modelo apresentado neste capítulo, ao abordar a maximização do lucro esperado $E[\tilde{\Pi}]$ a partir da produção desse ativo, captura a essência dessa transformação, analisando como um agente econômico racional responderia aos incentivos e riscos inerentes a este novo paradigma. A maximização do lucro neste modelo seguiu a teoria da firma e dos custos, em consonância com as formalizações matemáticas de Nicholson e Snyder (2016) e Varian (2015).

O problema central que este capítulo aborda é a otimização da decisão de um produtor agrícola racional quanto à área ótima de lavoura, explorada tanto sob a ótica de formas funcionais lineares quanto sob uma extensão que incorpora rendimentos decrescentes e custos convexos. Este modelo, baseado no estudo prospectivo de Santos e Nogueira (2025) sobre a comercialização de créditos de carbono provenientes de lavoura cafeeira, incorpora explicitamente a incerteza em componentes-chave do fluxo de caixa ao tratar o preço de mercado do crédito de carbono e os custos fixos cobrados pela entidade certificadora como variáveis estocásticas. Adicionalmente, para fins de simplificação e análise inicial, os custos de transação variáveis são consolidados nos custos variáveis por hectare.

Os objetivos deste capítulo são, portanto:

- Formalizar o modelo econômico: Apresentar de forma rigorosa as funções de receita e custo, incorporando as premissas de incerteza e linearidade.
- Derivar a solução ótima: Resolver o problema de maximização do produtor para encontrar a alocação ótima de área A^* e analisar as condições sob as quais a produção de créditos de carbono é economicamente atrativa.
- Validar o modelo: Utilizar as projeções de Santos e Nogueira (2025) para o caso da cafeicultura a fim de verificar a validade do modelo no cálculo da área de mínima viabilidade.
- Analisar as implicações: Explorar as consequências econômicas e sociais da solução do modelo, com foco nas barreiras à entrada, no papel da escala e nas implicações políticas para o desenvolvimento de mercados de carbono agrícolas inclusivos e eficazes.
- Propor uma extensão não linear ao modelo: Explorar como a quebra da premissa de linearidade, através de rendimentos decrescentes de sequestro e custos marginais crescentes, altera a decisão de alocação de área do produtor.

A parte metodológica dessa pesquisa foi apresentada na seção 2.4, a qual detalhou a especificação do modelo, definindo as funções de receita e custo e, de forma complementar,

formalizou e resolveu o problema de otimização do produtor. Adicionalmente, aspectos teóricos do sistema de licenças negociáveis foram apresentados na seção 4.1. Tendo em vista esses precedentes, além desta introdução, este capítulo está estruturado da seguinte forma: A seção 6.1 analisa a solução ótima, com foco na viabilidade econômica e nas implicações de mercado utilizando projeções da cafeicultura. A seção 6.2 apresenta uma extensão do modelo original com a introdução de termos não lineares considerando rendimentos decrescentes no sequestro de carbono (função de produção côncava) ou custos marginais crescentes. E, finalmente, a seção 6.3 (Conclusões do capítulo) apresenta as conclusões, discute as limitações do modelo e oferece recomendações de políticas públicas.

6.1 ANÁLISE DE VIABILIDADE ECONÔMICA NO MODELO LINEAR

A derivação da área ótima (A^*) na seção anterior revela a decisão de alocação de recursos do produtor na margem. No entanto, uma decisão marginalmente ótima não garante que o projeto como um todo seja economicamente viável. Esta seção aprofunda a análise para distinguir entre otimalidade marginal e viabilidade geral, explorando as profundas implicações que essa distinção tem para a estrutura do mercado de carbono agrícola.

6.1.1 O limiar de viabilidade

A condição $E[\widetilde{P}_{net}] > 0$ leva o produtor a escolher $A^* = A_{max}$. Contudo, para que o produtor de fato decida incorrer nos custos fixos e iniciar o projeto, o lucro esperado ótimo, $E[\widetilde{\Pi}(A^*)]$, deve ser não-negativo. Se o lucro esperado for negativo, o produtor racional, mesmo que a atividade seja marginalmente atrativa, optará por não fazer nada, obtendo um lucro de zero em vez de uma perda esperada. A condição de viabilidade do projeto é, portanto:

$$E[\widetilde{\Pi}(A^*)] \geq 0$$

Como análise dos dois cenários da solução ótima, temos:

- Se $A^* = 0$ (porque $E[\widetilde{P}_{net}] \leq 0$), o projeto não é implementado. A decisão de "não fazer" resulta em um lucro de 0. Se o produtor incorresse nos custos fixos e depois decidisse não produzir ($A = 0$), seu lucro seria $-\widetilde{Cf}$. A decisão racional é abandonar o projeto antes de incorrer em quaisquer custos.
- Se $A^* = A_{max}$, porque $E[\widetilde{P}_{net}] > 0$, o lucro esperado ótimo, conforme a equação (14), é:

$$E[\widetilde{\Pi}(A_{max})] = E[\widetilde{P}_{net}] \cdot A_{max} - E[\widetilde{Cf}]$$

A condição de viabilidade exige que este valor seja não-negativo:

$$E[\widetilde{P}_{net}] \cdot A_{max} - E[\widetilde{Cf}] \geq 0$$

Rearranjando esta desigualdade, obtemos a condição fundamental de viabilidade:

$$E[\widetilde{P}_{net}] \cdot A_{max} \geq E[\widetilde{Cf}]$$

Esta expressão revela uma verdade econômica crucial: o lucro operacional total esperado, acumulado sobre toda a área disponível ($E[\widetilde{P}_{net}] \cdot A_{max}$), deve ser suficiente para cobrir os custos fixos esperados (Cf). Um projeto pode ser marginalmente lucrativo ($E[\widetilde{P}_{net}] > 0$), mas se a escala da operação (A_{max}) for muito pequena, o lucro operacional gerado pode não ser suficiente para pagar o "ingresso" do projeto, que são os altos custos de certificação e desenvolvimento.

Essa condição de viabilidade pode ser reformulada para destacar o papel da escala. Para que um projeto seja viável, a área disponível do produtor deve satisfazer:

$$A_{max} \geq \frac{E[\widetilde{Cf}]}{E[\widetilde{P}_{net}]} \quad (15)$$

Esta desigualdade define um limiar de escala mínimo ou uma área mínima viável. Produtores cuja área disponível (A_{max}) está abaixo deste limiar não conseguirão gerar lucro, mesmo que dediquem toda a sua terra à atividade e que a atividade seja rentável na margem.

6.1.2 A "barreira de escala" – um estudo de caso

O conceito de área mínima viável não é apenas uma curiosidade teórica, ele tem profundas implicações para a estrutura do mercado e para a equidade na distribuição dos benefícios da agricultura de carbono. Os custos fixos de certificação são descritos como "monetariamente custosos", e a análise prospectiva confirma isso. Para ilustrar o impacto da barreira de escala, aplica-se o modelo às projeções de Santos e Nogueira (2025), derivadas de custos observados em mercados voluntários de carbono (ver Apêndice 2). Ressalta-se que tais valores servem como a melhor aproximação disponível, mas o modelo destaca o risco institucional inerente à incerteza sobre os custos de certificação no futuro mercado regulado (SBCE). A análise que segue, portanto, deve ser interpretada como uma projeção baseada em cenários de referência, cujos valores efetivos dependerão da regulamentação do SBCE.

Para ilustrar o impacto desta barreira, podemos utilizar o modelo desenvolvido para recalcular a área mínima viável para cenários com dados projetados por Santos e Nogueira (2025). Nesse caso, o preço esperado do crédito de carbono foi estimado com base em três projeções do valor médio do crédito de carbono (R\$ 246, R\$ 262 e R\$ 277) estimadas com base em cotações históricas do Carbon Emissions Futures, da Intercontinental Exchange

(ICE), por meio de simulações de Monte Carlo. E, adicionalmente, os autores citados consideraram que boas práticas agrícolas foram eficazes para incrementar os estoques de carbono em 7,58 tCO₂eq ha⁻¹ por ano, em média, com relação ao manejo tradicional, com base em Cecafé e Imaflora (2022).

O estudo de Santos e Nogueira (2025) considerou três projeções de custos fixos anuais com base em diferentes fontes detalhadas na Tabela 26, do Apêndice 2 desta tese. A menor projeção de custo fixo foi de R\$ 31.229, a de custo mediano de R\$ 62.457 e a de maior custo foi de R\$ 124.914 por ano. Os custos variáveis, para a lavoura cafeeira, foram projetados em R\$ 1.474 por hectare e incluem custos de adoção de boas práticas agrícolas e custos variáveis de certificação. A Tabela 9 a seguir apresenta resultados de cálculo da área mínima viável, por meio da equação (15), utilizando dados da cafeicultura.

Tabela 9 - Cálculo da área mínima viável de projeto (A_{min})

Cenário	$E[\tilde{P}]$ (R\$/tCO ₂ e)	Q_{cc} (t/ha)	C_v (R\$/ha)	$E[\tilde{C}_f]$ (R\$)	$E[\tilde{P}_{net}]$ (R\$/ha)	Área Mínima Viável (ha)
Custos 1 x Cotação 1	246	7,58	1.474	31.229	390,68	80
Custos 1 x Cotação 2	262	7,58	1.474	31.229	511,96	61
Custos 1 x Cotação 3	277	7,58	1.474	31.229	625,66	50
Custos 2 x Cotação 1	246	7,58	1.474	62.457	390,68	160
Custos 2 x Cotação 2	262	7,58	1.474	62.457	511,96	122
Custos 2 x Cotação 3	277	7,58	1.474	62.457	625,66	100
Custos 3 x Cotação 1	246	7,58	1.474	124.914	390,68	320
Custos 3 x Cotação 2	262	7,58	1.474	124.914	511,96	244
Custos 3 x Cotação 3	277	7,58	1.474	124.914	625,66	200

Fonte: elaboração própria, com base em Santos e Nogueira (2025).

A Tabela 9 demonstra de forma contundente a existência de uma barreira de escala. Estes resultados reproduzem os principais achados de Santos e Nogueira (2025) e expõem uma consequência potencialmente limitante da estrutura de custos dos mercados de carbono atuais. O modelo com essas projeções prevê, portanto, que o mercado de carbono agrícola, em sua forma atual, é estruturalmente inacessível para produtores de pequena e média escala nos cenários estimados.

Por exemplo, no cenário mediano de potencial para o comércio de créditos de carbono (Custos 2 x Cotação 2), cuja área mínima de uma lavoura viável para comercialização de créditos de carbono seria de 122 hectares, essa política ambiental de créditos de carbono poderia abranger menos de 5% dos estabelecimentos produtores de café. Não obstante, dados do IBGE (2019) apontam também que esses 5% dos maiores estabelecimentos produtores de café detêm aproximadamente 39% de toda área colhida de café no País.

Em outra análise, no cenário mais favorável ao comércio de créditos de carbono, com os menores custos e maiores cotações projetados (Custos 1 x Cotação 3), a área mínima de uma lavoura viável para comercialização de créditos de carbono seria de 50 hectares. Nesse caso, considerando a estrutura fundiária da cafeicultura apurada pelo Censo Agropecuário de 2017 (IBGE, 2019), a política ambiental de *cap and trade* do mercado de carbono regulado teria potencial para abranger até 52% da área colhida total da cafeicultura brasileira, com a participação de até 12% dos estabelecimentos produtores de café.

Em contraponto, no cenário menos favorável ao comércio de créditos de carbono (Custos 3 x Cotação 1), cuja área mínima de uma lavoura viável para comercialização de créditos de carbono seria de 320 hectares, a política ambiental de *cap and trade* do mercado de carbono regulado abrangeria potencialmente menos de 2% dos estabelecimentos produtores de café, os quais detêm 14% da área total da cafeicultura brasileira²⁵, com base nos dados do IBGE (2019), que constam do Apêndice 1.

6.1.3 Os limites da neutralidade ao risco

O modelo, ao assumir um produtor neutro ao risco, foca exclusivamente na maximização do valor esperado do lucro. Esta é uma simplificação padrão em muitos modelos econômicos, mas suas limitações são particularmente agudas neste contexto devido à natureza multifacetada e composta do risco.

O produtor de créditos de carbono não enfrenta um único tipo de incerteza, mas sim um perfil de risco composto por pelo menos três fontes significativas e sobrepostas. Primeiramente, existe o risco institucional, associado aos custos de certificação ($\widetilde{Cf}$), pois no caso do mercado regulado (SBCE) no nosso País ainda é desconhecido. Tais custos podem divergir expressivamente dos custos do mercado voluntário considerados por Santos e Nogueira (2025) a depender das regulamentações da Lei 15.042/2024²⁶, ainda não publicadas até a presente data.

Adicionalmente, o produtor está exposto ao risco de preço ($\tilde{P}$) também em decorrência das futuras regulamentações, já mencionadas, do mercado regulado no Brasil, pois os preços podem diferir das cotações do Índice da Intercontinental Exchange (ICE), utilizadas nas

²⁵ O Censo Agropecuário não quantifica especificamente o número de produtores com área de 320 hectares ou mais. Suas faixas de área incluídas na pesquisa seguem a estratificação constante do Apêndice 2. Produtores com no mínimo 320 hectares estão classificados entre as faixas de 200 hectares e de 500 hectares, que pertencem a 2% e 1% dos estabelecimentos, que são responsáveis por 27% e 14% da área colhida total, respectivamente.

²⁶ Lei que instituiu o Sistema Brasileiro de Comércio de Emissões de Gases de Efeito Estufa (BRASIL, 2024).

prospecções de Santos e Nogueira (2025). Mesmo após o SBCE iniciar suas operações, persistirá um risco de preço devido a conhecida volatilidade dos mercados e as flutuações da oferta e demanda sobre as quais o agricultor presumivelmente não terá influência.

Por fim, soma-se a isso o risco técnico (Q_{cc}), pois, como destacado pelo IPCC, a quantidade de carbono que uma prática agrícola consegue efetivamente sequestrar é cientificamente incerta e altamente variável, podendo o "rendimento" de carbono ser menor que o esperado devido a fatores como secas, pragas e a complexidade da biologia do solo, riscos que o próprio aquecimento global tende a exacerbar. Esse risco pode ser reduzido com investimentos na pesquisa agrícola voltada para o objetivo de reduzir emissões líquidas e aumentar eficiência das aferições dos fluxos de carbono da atividade rural.

Um produtor real, muito provavelmente avesso ao risco, não tomaria sua decisão com base apenas no valor esperado. Ele consideraria também a variância (ou o risco) do lucro. A variância total do lucro, $Var(\tilde{\Pi})$, seria uma função das variâncias de cada uma dessas fontes de risco, tornando o investimento em créditos de carbono uma proposta extremamente arriscada. A teoria microeconômica padrão ensina que agentes avessos ao risco exigem um "prêmio de risco" para empreender atividades incertas, ou seja, eles só investirão se o lucro esperado for significativamente maior que zero, para compensá-los pela desutilidade de arcar com o risco.

Portanto, a condição de decisão do mundo real é provavelmente muito mais rigorosa do que $E[\tilde{P}_{net}] > 0$. Um produtor avesso ao risco pode exigir que a receita marginal esperada exceda o custo marginal por uma margem substancial antes de considerar o investimento. Isso torna a barreira à entrada ainda maior do que a análise de neutralidade ao risco sugere. A combinação de uma alta barreira de escala (custos fixos) e um perfil de risco elevado e composto (incertezas de preço, técnica e institucional) cria um obstáculo considerável à participação generalizada dos agricultores nos mercados de carbono.

Uma forma parcimoniosa de incorporar a aversão ao risco no modelo é assumir que o produtor maximiza uma função utilidade do tipo média-variância, na qual o equivalente de certeza do lucro é dado por $U = E[\tilde{\Pi}] - \frac{1}{2}\rho Var(\tilde{\Pi})$, onde $\rho \geq 0$ é o coeficiente de aversão absoluta ao risco (Arrow, 1971) e $Var(\tilde{\Pi})$ é a variância do lucro, que depende fundamentalmente da variância do preço do carbono (σ_p^2) e da variância dos custos fixos de certificação (σ_{cf}^2). Considerando as fontes de risco como não correlacionadas por simplicidade, a variância do lucro é $Var(\tilde{\Pi}) = (Q_{cc} \cdot A)^2 \sigma_p^2 + \sigma_{cf}^2$. Nesse contexto, a condição de participação no projeto ($A^* > 0$) deixa de ser simplesmente $E[\tilde{P}_{net}] > 0$ e passa

a exigir que o equivalente de certeza seja positivo, ou seja, $E[\widetilde{P}_{net}] \cdot A - \frac{1}{2} \rho [(Q_{cc} \cdot A)^2 \sigma_p^2 + \sigma_{cf}^2] > E[\widetilde{Cf}]$.

Esta condição é mais restritiva do que a obtida sob neutralidade ao risco, pois introduz um "prêmio de risco" que cresce com a área dedicada (A) e com a aversão ao risco (ρ). Isso significa que, mesmo quando a receita líquida marginal esperada é positiva e a escala é suficiente para cobrir os custos fixos esperados, um produtor avesso ao risco pode optar por não participar se a incerteza for elevada, especialmente em projetos de grande escala que amplificam a exposição ao risco de preço. Esse resultado reforça a conclusão de que a aversão ao risco atua como uma barreira adicional à entrada, tornando a participação no mercado de carbono viável apenas para produtores com baixíssima aversão ao risco ou para aqueles que conseguem mitigar a incerteza por meio de instrumentos como contratos futuros de carbono ou seguros paramétricos.

O modelo linear, com sua solução de canto, oferece um insight claro sobre o limiar de viabilidade, mas representa um caso particular de um arcabouço mais geral. A extensão não-linear apresentada a seguir generaliza o modelo, relaxando a premissa de proporcionalidade estrita. As funções não-lineares de receita e custo permitem capturar rendimentos decrescentes no sequestro de carbono e custos marginais crescentes de gestão, fenômenos documentados na literatura agrônômica e econômica. Nesta formulação mais ampla, o modelo linear corresponde ao caso particular em que a elasticidade da produção (α) é igual a 1 e o parâmetro de deseconomia de escala (β) é nulo. A análise que se segue explora, portanto, como a introdução dessas não-linearidades realistas altera tanto a escala ótima de operação quanto as condições de viabilidade econômica.

Ademais, as não-linearidades discutidas na extensão do modelo atuam como um amplificador de risco técnico. A incerteza sobre o parâmetro de elasticidade α ou sobre o coeficiente de custo β pode levar a grandes variações na área ótima estimada A^* e, conseqüentemente, no lucro esperado. Esta sensibilidade aumenta a aversão ao risco do produtor e exige uma margem de segurança ainda maior no retorno esperado para justificar o investimento.

O modelo linear, com sua solução de canto, oferece um insight claro sobre o limiar de viabilidade, mas baseia-se na premissa estrita de proporcionalidade entre área, receita e custos. A realidade agrícola, contudo, frequentemente apresenta não-linearidades devido a fatores técnicos e de gestão. A seguir, generaliza-se o modelo ao relaxar a premissa de linearidade, incorporando rendimentos decrescentes no sequestro de carbono e custos

marginais crescentes. Esta extensão permite explorar soluções interiores ótimas e aprofundar a análise das barreiras de escala sob condições mais realistas.

6.2 EXTENSÃO DO MODELO: NÃO-LINEARIDADE

A modelagem apresentada nas seções anteriores, embora útil para definir o limiar de viabilidade, assume que a receita e os custos variam de forma estritamente proporcional à área. Contudo, a produção agrícola real enfrenta restrições físicas e gerenciais que sugerem formas funcionais mais complexas. A adoção de rendimentos decrescentes justifica-se por três pilares técnicos: 1. Saturação do Solo: A capacidade de sequestro de carbono não é infinita e varia conforme o histórico de uso da terra na propriedade. 2. Gargalos Logísticos: A implementação de práticas como o plantio de braquiária nas entrelinhas exige janelas de manejo precisas; em áreas muito extensas, a perda de *timing* operacional reduz a eficácia do sequestro por hectare. 3. Risco Técnico: O IPCC destaca que a incerteza científica sobre a eficácia das práticas aumenta com a escala, o que reforça a necessidade de dados experimentais locais para calibrar os parâmetros de rendimento do solo.

Esta seção relaxa a premissa de linearidade, incorporando tanto uma função de produção côncava para os créditos de carbono quanto uma função de custo variável convexa. O objetivo é analisar como essas não-linearidades realistas podem alterar a decisão ótima do produtor, gerando soluções interiores (onde $0 < A^* < A_{\max}$), e qual o impacto disso na análise de viabilidade econômica.

6.2.1 Rendimentos Decrescentes e Custos Marginais Crescentes

O sequestro de carbono depende de fatores edafoclimáticos e de manejo que podem não ser uniformes em toda a propriedade. Assume-se aqui que as áreas com maior potencial são priorizadas, gerando rendimentos decrescentes conforme a expansão da área A . Define-se a quantidade total de créditos (Q_{total}) como:

$$Q_{total}(A) = Q_{cc} \cdot A^\alpha$$

Onde $0 < \alpha < 1$ é o coeficiente de elasticidade da produção de carbono em relação à área. Se $\alpha = 1$, recupera-se o caso linear. Valores de $\alpha < 1$ indicam que cada hectare adicional contribui com menos créditos que o anterior, modelando os rendimentos decrescentes.

Consequentemente, a Receita Total Esperada é:

$$E[R(A)] = E[\tilde{P}] \cdot Q_{cc} \cdot A^\alpha$$

A Receita Marginal Esperada (RMg), portanto, torna-se decrescente:

$$RMg = \frac{dE[R(A)]}{dA} = E[\tilde{P}] \cdot Q_{cc} \cdot \alpha \cdot A^{\alpha-1}$$

Por outro lado, a expansão da atividade para áreas maiores pode impor desafios logísticos e de monitoramento que elevam o custo por unidade de área. Assim, neste estudo assume-se que os custos variáveis totais não aumentam linearmente, mas de forma mais que proporcional, refletindo deseconomias de escala na gestão e monitoramento de áreas maiores. Dessa forma, propõe-se uma função de custo variável convexa:

$$C_v(A) = \beta \cdot A^2$$

Onde β representa o fator de deseconomia de escala²⁷. O Custo Marginal (CMg) passa a indicar que o esforço marginal para certificar e manter cada hectare adicional é crescente, da seguinte forma:

$$CMg = \frac{dC_v(A)}{dA} = 2\beta \cdot A$$

6.2.2 A Solução Ótima Interior

Ao consolidar essas não-linearidades, incorporando a estrutura de custos fixos estocásticos, a função objetivo do produtor torna-se:

$$E[\tilde{\Pi}(A)] = (E[\tilde{P}] \cdot Q_{cc} \cdot A^\alpha) - (E[\tilde{C}f] + \beta A^2) \quad (16)$$

O problema de otimização do produtor permanece $\max_A E[\tilde{\Pi}(A)]$, sujeito a $0 \leq A \leq A_{\max}$. Dada a concavidade da função de receita e a convexidade da função de custo para $\alpha < 1$, a função de lucro esperado é côncava, garantindo que um ponto de máximo interior, se existir, será único e determinado pela condição de primeira ordem (CPO): Receita Marginal Esperada = Custo Marginal.

$$E[\tilde{P}] \cdot Q_{cc} \cdot \alpha \cdot A^{\alpha-1} = 2\beta A$$

Resolvendo essa equação para A , obtém-se a área ótima interior A^* :

$$A^* = \left(\frac{E[\tilde{P}] \cdot Q_{cc} \cdot \alpha}{2\beta} \right)^{\frac{1}{2-\alpha}} \quad (17)$$

²⁷ O valores de α e β foram utilizados para fins de demonstração. Espera-se que estudos futuros possam calibrá-los com dados empíricos.

Esta solução contrasta fortemente com a "solução de canto" do modelo linear. Aqui, mesmo com receita líquida marginal média positiva, o produtor pode racionalmente escolher não expandir a atividade até o limite $A_{\max}$, pois os rendimentos decrescentes e os custos marginais crescentes tornam a expansão adicional não lucrativa na margem. Ou seja, esta extensão demonstra que a heterogeneidade técnica e os custos de gestão podem levar o produtor a limitar voluntariamente sua participação no mercado, mesmo quando a atividade é lucrativa na média.

6.2.3 Aplicação Numérica - modelo não-linear

Para ilustrar o impacto quantitativo desta extensão, aplica-se o modelo não linear aos mesmos parâmetros do cenário "Custos 1 $\times$ Cotação 1" da Tabela 9, que apresenta a projeção de menor custo fixo:

$$E[\tilde{P}] = 246 \text{ R\$/tCO}_2\text{e}$$

$$Q_{cc} = 7,58 \text{ tCO}_2\text{e/ha/ano}$$

$$E[\tilde{Cf}] = 31.229 \text{ R\$}$$

$$Cv = 1.474 \text{ R\$/ha}$$

Para calibrar os parâmetros não lineares de forma comparativa, assumem-se os seguintes valores:

Coeficiente de elasticidade (α): Adota-se $\alpha = 0,8$. Este valor ilustra a premissa de rendimentos decrescentes moderados, compatível com a saturação progressiva da capacidade de sequestro de carbono no solo. O IPCC (2022), em sua avaliação, sintetiza a literatura que demonstra os limites e a variabilidade deste potencial, apontando para a existência de rendimentos decrescentes. A forma funcional do tipo A^α , análoga à função de produção Cobb-Douglas, é amplamente utilizada na economia para modelar relações entre insumo e produto com elasticidade constante (Varian, 2015; Nicholson e Snyder, 2016).

Na literatura de economia agrícola, funções com elasticidade de produção menor que um são comumente empregadas para capturar a relação entre área e produtividade quando há um fator fixo (como gestão, fertilidade basal) limitando ganhos proporcionais (Chambers, 1988). O valor de 0,8 foi escolhido para este exercício numérico por ser plausível e situar-se dentro de uma faixa (0,7 a 0,9) frequentemente utilizada em modelos teóricos para capturar não-linearidades em sistemas biológicos e de gestão. Uma calibração empírica rigorosa para a cafeicultura exigiria dados experimentais específicos.

Parâmetro de custo convexo (β): Este parâmetro é calibrado para que, em uma área de referência de 100 hectares, o custo variável total do modelo não linear (βA^2) seja equivalente ao custo variável total do modelo linear ($Cv \times A$) nessa mesma área. Isto permite uma comparação justa entre as estruturas de custo, ancorando o cenário não linear em um ponto de referência conhecido (a área de 100 ha). Assim:

$$\beta = \frac{Cv \times A_{ref}}{A_{ref}^2} = \frac{Cv}{A_{ref}} = \frac{1.474}{100} = 14,74 \text{ R\$/ha}^2$$

Substituindo os valores na fórmula da área ótima interior (Equação 17):

$$A^* = \left(\frac{246 \times 7,58 \times 0,8}{2 \times 14,74} \right)^{\frac{1}{2-0,8}} = \left(\frac{1.491,74}{29,48} \right)^{\frac{1}{1,2}} = (50,62)^{0,833}$$

$$A^* \approx 22,5 \text{ hectares}$$

No modelo linear original, a receita líquida marginal esperada por hectare é positiva ($E[\widetilde{P}_{net}] = 390,68 \text{ R\$/ha}$). Portanto, a solução ótima seria uma solução de canto: dedicar toda a área disponível ($A^* = A_{max}$). O modelo não linear, no entanto, revela um resultado distinto: a área economicamente ótima a ser dedicada à geração de créditos é de apenas 22,5 hectares, um valor interior e substancialmente menor que a área mínima viável linear de 80 ha para este cenário (Tabela 9).

Isso ocorre porque, a partir desse ponto, o custo de expandir um hectare adicional (que cresce linearmente com A) supera a receita gerada por esse hectare (que cresce a uma taxa decrescente). Este resultado ilustra que, mesmo com uma escala operacional ótima definida por critérios marginais, a viabilidade econômica pode ser comprometida por custos fixos elevados, reforçando a barreira de escala mesmo em contextos não-lineares. Assim, a existência de uma solução interior ótima não garante a viabilidade global do projeto. É necessário verificar se o lucro esperado em A^* é não negativo. Aplicando a Equação (16):

Receita Total Esperada em A^* :

$$E[R(A^*)] = 246 \times 7,58 \times (22,5)^{0,8}$$

$$E[R(A^*)] \approx 246 \times 7,58 \times 12,07 \approx 22.504$$

Custo Total Esperado em A^* :

$$\text{Custo Variável: } \beta(A^*)^2 = 14,74 \times (22,5)^2 \approx 14,74 \times 506,25 \approx 7.462 \text{ reais}$$

Custo Fixo Esperado: 31.229 reais

Custo Total: $7.462 + 31.229 = 38.691$ reais

Lucro Esperado em A^* :

$$E[\tilde{\Pi}(A^*)] = 22.504 - 38.691 = -16.187 \text{ reais}$$

Conclusão da Análise Numérica: O lucro esperado é negativo. Portanto, mesmo identificando uma escala operacional ótima interior (22,5 ha), o projeto permanece economicamente inviável no cenário analisado. O principal obstáculo continua sendo a magnitude dos custos fixos de certificação ($E[\tilde{Cf}]$), que não são diluídos suficientemente pela receita operacional gerada na área ótima.

Este resultado é crucial: a não-linearidade modera a escala ótima de operação, mas não elimina a barreira de escala imposta pelos custos fixos. A condição de viabilidade no modelo não linear exige que $E[\tilde{\Pi}(A^*)] \geq 0$, o que, conforme demonstrado, é um critério mais restritivo do que a simples existência de uma área ótima A^* positiva.

6.2.4 Implicações para a Política e a Estrutura de Mercado

A extensão não linear do modelo oferece insights valiosos para o desenho de políticas públicas e para uma compreensão mais realista do comportamento do produtor. Em primeiro lugar, ela revela que políticas focadas exclusivamente em aumentar a área agregada dedicada a créditos de carbono podem induzir os produtores a expandirem sua operação além de sua escala ótima privada, reduzindo a eficiência marginal do sequestro e comprometendo a rentabilidade do projeto. Isso ressalta a importância de programas de assistência técnica e extensão rural que forneçam ferramentas para que o agricultor estime sua própria área ótima A^* .

Além disso, a abordagem não linear explicita uma dupla barreira à entrada para pequenos produtores: eles precisam superar não apenas a barreira de viabilidade, onde a área total $A_{\max}$ pode ser insuficiente para cobrir os custos fixos, mas também a barreira de otimalidade, em que mesmo uma área total maior que a ótima pode resultar em um lucro esperado insuficiente se operada na escala A^* . Esta dupla dificuldade reforça a necessidade crítica de mecanismos que reduzam o custo fixo esperado $E[\tilde{Cf}]$.

Por fim, ao demonstrar que a escala ótima para uma propriedade individual pode ser relativamente pequena, a não-linearidade fortalece o argumento econômico em favor da agregação de projetos por meio de cooperativas ou associações. Nesse modelo coletivo,

múltiplas propriedades podem operar em suas respectivas escalas ótimas individuais enquanto compartilham um único custo fixo de certificação, estratégia que se apresenta como uma solução potencial para superar ambas as barreiras e democratizar o acesso ao mercado de carbono.

6.3 CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO

O modelo econômico desenvolvido neste capítulo formaliza a decisão de um produtor agrícola sobre a alocação de terras para a geração de créditos de carbono, sob condições de incerteza de preço e custo e com custos marginais lineares. A análise rigorosa do problema de otimização e viabilidade revela, primeiramente, que a estrutura de custos marginais lineares leva a uma decisão de alocação "tudo ou nada". Se a receita líquida marginal esperada por hectare for positiva, o produtor maximiza seu lucro esperado dedicando toda a área disponível (A_{max}). Caso contrário, a alocação ótima é zero.

Além disso, o modelo demonstra que essa otimalidade marginal não garante a viabilidade geral. O projeto só se torna economicamente atrativo se a área total do produtor for grande o suficiente para que o lucro operacional esperado cubra os altos custos fixos ($E[\widetilde{P}_{net}] \cdot A_{max} \geq E[\widetilde{Cf}]$), definindo uma área mínima viável que, com base em dados empíricos, pode criar uma substancial barreira de escala de centenas ou milhares de hectares. Complementarmente, a extensão não linear revela que, mesmo para produtores viáveis, a alocação total da área disponível pode não ser a estratégia ótima. Isso acontece devido à exaustão de rendimentos e ao aumento dos custos logísticos marginais.

O modelo original foi validado com as projeções de Santos e Nogueira (2025), tendo reproduzido os principais resultados alcançados por esses autores nos cenários de custos de certificação e cotações de créditos de carbono apresentados. Nesse caso, aplicado à cafeicultura, os custos fixos de certificação, considerados como custos de transação, inviabilizariam a comercialização de créditos de carbono para pelo menos 88% dos estabelecimentos produtores de café.

A extensão não linear do modelo revelou que a decisão ótima pode ser uma solução interior ($0 < A^* < A_{max}$), na qual o produtor limita voluntariamente a área dedicada aos créditos devido a rendimentos decrescentes no sequestro e a custos marginais crescentes de gestão. Esta extensão não invalida, porém, a principal conclusão sobre a barreira de escala: a viabilidade econômica permanece criticamente dependente da capacidade da receita operacional total cobrir os custos fixos de certificação. Para a maioria dos pequenos e médios

produtores, cuja área ótima A^* ou mesmo sua área total $A_{\max}$ estão abaixo do limiar de viabilidade, a participação individual no mercado permanece inacessível.

Nesse caso, com essas projeções utilizadas como validação matemática, o modelo conclui que a combinação desta barreira de escala com o perfil de risco composto (de preço, técnico e institucional) cria obstáculos significativos à participação, especialmente para produtores de pequena e média escala, sugerindo que os mercados de carbono agrícola, se não forem devidamente estruturados, podem levar à concentração de mercado e à exclusão.

Contudo, vale ressaltar que o modelo proposto neste capítulo pode ser aplicado a novas projeções obtidas de diferentes fontes e em diferentes momentos, bem como outras culturas agrícolas que adotam tecnologias que sequestram carbono e atendam aos pressupostos do modelo. Adicionalmente, poderá ser utilizado com dados efetivos após a implantação do mercado regulado no Brasil. Dessa forma, o modelo constitui um instrumento útil tanto para a formulação de políticas públicas quanto para subsidiar a tomada de decisão por parte dos agricultores. As duas próximas subseções apresentam mais detalhes de direções para pesquisas futuras e subsídios para políticas públicas.

6.3.1 Limitações do Modelo e Direções para Pesquisas Futuras

Embora este modelo forneça uma estrutura analítica clara e gere resultados proveitosos para o cálculo da área mínima viável, ele se baseia em simplificações de formas funcionais lineares que representam limitações importantes. Como demonstrado na Seção 5 (Extensão do Modelo), a premissa de linearidade na produtividade de carbono (Q_{cc}) e nos custos variáveis (C_v) ignora gargalos técnicos e gerenciais reais. A inclusão de rendimentos decrescentes captura a saturação natural do solo e a perda de eficiência em grandes escalas, enquanto os custos marginais crescentes refletem a maior complexidade de monitoramento e logística em áreas extensas. Assim, a transição para modelos não lineares permite não apenas identificar a barreira de entrada no mercado, mas também o limite de eficiência produtiva de cada estabelecimento.

Vale mencionar também que o modelo apresentado é estático, tratando a decisão como um evento único no tempo, ao passo que projetos de carbono são investimentos de longo prazo. Uma abordagem dinâmica, utilizando a teoria das opções reais, poderia modelar a valiosa decisão do produtor de “investir agora ou esperar” por mais informações sobre preços e tecnologias.

Outra simplificação foi tratar a produtividade de carbono (Q_{cc}) como determinística, e a incorporação de sua incerteza como variável aleatória tornaria o modelo mais realista,

capturando o risco técnico associado às diversas condições edafoclimáticas do Brasil. De forma semelhante, a premissa de neutralidade ao risco poderia ser substituída pela aversão ao risco, maximizando-se uma função de utilidade esperada para capturar de forma mais fidedigna o trade-off entre retorno e risco, o que provavelmente resultaria em menores alocações de área.

Este modelo assume a tecnologia agrícola e seu custo (cv_{gap_ha}) como exógenos, mas uma análise mais completa permitiria ao produtor escolher entre um menu de práticas disponíveis, revelando os incentivos para a adoção de tecnologias com diferentes perfis de custo e eficácia no sequestro de carbono.

Dessa forma, a aplicação do modelo a outras culturas ou casos particulares exigiria a calibração específica de seus parâmetros técnicos e econômicos. Em particular, a produtividade do carbono (Q_{cc}) e o custo de adoção de boas práticas (cv_{gap_ha}) variam significativamente com o tipo de solo, clima, sistema de cultivo e tecnologia disponível. Da mesma forma, os parâmetros de não-linearidade (α e β) devem ser estimados com base em dados experimentais ou estudos empíricos que capturem a relação real entre área, sequestro de carbono e custos de monitoramento para cada contexto específico. O presente trabalho, ao utilizar valores ilustrativos plausíveis com base na forma funcional Cobb-Douglas e na literatura de custos de transação, demonstra a utilidade do arcabouço metodológico, que pode ser subsequentemente alimentado com dados primários para gerar recomendações específicas.

6.3.2 Implicações Políticas e Recomendações

As conclusões do modelo, apesar de suas limitações, oferecem uma base para a formulação de políticas públicas destinadas a tornar o mercado de carbono agrícola mais eficiente, equitativo e eficaz na mitigação das mudanças climáticas. Para enfrentar a barreira de escala e evitar a exclusão de pequenos e médios produtores, as políticas devem se concentrar em reduzir o impacto dos custos fixos.

Nesse sentido, corroborando com os resultados de Santos e Nogueira (2025), é fundamental buscar meios institucionais para mitigar os custos de certificação, como, por exemplo, estabelecer a possibilidade de que esses processos sejam conduzidos por cooperativas, diluindo o encargo financeiro entre seus membros. Em complemento, o apoio à pesquisa tecnológica agrícola é crucial para desenvolver metodologias de balanço de carbono de menor custo, aumentando assim a viabilidade do processo de certificação para um maior número de agricultores.

No aspecto institucional, para incentivar a participação de produtores avessos ao risco, é imperativo mitigar o risco composto por meio de políticas que reduzam a incerteza. Uma medida essencial é a promoção de um ambiente regulatório estável e previsível para a certificação, a fim de diminuir o risco institucional e oferecer maior segurança aos investidores do setor.

Em síntese, a viabilidade de projetos de carbono agrícola depende de um delicado equilíbrio entre receitas e custos esperados. O modelo demonstra que as barreiras estruturais, especialmente os altos custos fixos e os riscos, são tão importantes quanto os preços de mercado para determinar a participação dos agricultores. Políticas públicas bem desenhadas são, portanto, cruciais não apenas para o crescimento, mas para a própria sustentabilidade e equidade desses mercados emergentes.

PARTE 2: ROTULAGEM CARBONO NEUTRO

Enquanto a primeira parte desta tese concentrou-se na possibilidade de venda de créditos de carbono provenientes da cafeicultura, esta segunda parte dedica-se à análise dos instrumentos voluntários de política ambiental, especificamente a certificação para rotulagem de cafés diferenciados. No Brasil, embora o café ainda seja amplamente transacionado como *commodity*, observa-se uma expansão relevante do segmento de cafés que agregam valor por meio de atributos de qualidade, origem e, crescentemente, práticas de produção sustentáveis.

Nesse sentido, dados do Conselho dos Exportadores de Café do Brasil (Cecafé) revelam a importância econômica deste nicho: em 2024, os cafés diferenciados representaram mais de 18% do volume total exportado pelo país e uma parcela ainda mais expressiva da receita cambial, correspondendo a 20,3% (US\$ 2,53 bilhões) do total de US\$ 12,51 bilhões (Cecafé, 2025).

Essa valorização não se restringe ao mercado externo. No âmbito doméstico, pesquisas de comportamento do consumidor indicam que uma parcela significativa dos brasileiros está disposta a pagar mais por produtos que ostentam selos socioambientais, percebendo-os como um importante diferencial no momento da compra. Como exemplo, a pesquisa “Hábitos e preferências dos consumidores de café no Brasil”, conduzida por Bacic *et al.* (2019), aponta que 29% dos consumidores da amostra julgam que selo socioambiental é um diferencial importante para sua escolha de compra de café. Adicionalmente, pesquisa da Associação Brasileira da Indústria de Café realizada por meio de questionários com 5460 respondentes, em 14 municípios brasileiros, indicou que 10% a 12% dos participantes que responderam à

questão “Um café de mais qualidade precisa:” escolheram a opção “ter a preocupação com sustentabilidade” (ABIC, 2021).

Diante deste cenário, o cafeicultor brasileiro se depara com um dilema estratégico: a transição para sistemas de produção de base ecológica, como o orgânico ou o agroecológico, promete acesso a mercados mais rentáveis, mas exige, em contrapartida, investimentos significativos, adequação a normas rigorosas e mudanças nas práticas de manejo.

O objetivo central desta Parte 2 é investigar a viabilidade econômica da adoção do rótulo "carbono neutro" como estratégia de diferenciação para o cafeicultor brasileiro. No entanto, a análise empírica direta deste atributo enfrenta limitações decorrentes da escassez de dados históricos de larga escala, uma vez que protocolos específicos de neutralidade de carbono ainda estão em fase de consolidação no país.

Diante dessa lacuna de dados específicos, este estudo fundamenta sua investigação na análise de rotulagens ambientais consolidadas e tecnicamente semelhantes, como a orgânica e a agroecológica. Essa escolha justifica-se pelo fato de que tais sistemas de produção, assim como o carbono neutro, são classificados pela teoria econômica como "bens de crença" (*credence goods*), cujos atributos de sustentabilidade não podem ser verificados diretamente pelo consumidor.

Portanto, todas essas certificações dependem de mecanismos de sinalização e custos de auditoria similares para mitigar as assimetrias de informação. Trata-se de um atributo que o consumidor não pode verificar diretamente, nem no momento da compra, nem após o consumo. Em mercados caracterizados por essa assimetria de informação, a literatura seminal de Akerlof (1970) alerta para o risco de falha de mercado, onde a incapacidade do comprador em distinguir a qualidade pode expulsar os produtores de alto padrão. Nesse contexto, a rotulagem e a certificação surgem como mecanismos de sinalização, conforme explorado por Stiglitz (1987), cujos aspectos conceituais serão aprofundados no próximo capítulo.

Neste objeto de estudo, ao incorrer voluntariamente nos custos de auditoria e conformidade, o cafeicultor emite um sinal ao mercado, permitindo a diferenciação do seu produto e justificando a cobrança de um "prêmio verde". Essa questão assume contornos estratégicos para o cafeicultor brasileiro: a transição para sistemas de base ecológica promete acesso a mercados rentáveis, mas exige investimentos significativos e mudanças no manejo. Assim como no mercado regulado, a viabilidade desses instrumentos voluntários é condicionada pela magnitude dos custos fixos de certificação e pela eficácia da sinalização de mercado.

Para investigar estas dinâmicas de forma abrangente, os capítulos desta Parte 2 estão organizados da seguinte forma:

- O Capítulo 7 apresenta o referencial teórico da diferenciação de produtos e analisa a dinâmica temporal do prêmio verde, utilizando dados dos Censos Agropecuários (2006-2017) e métodos quasi-experimentais (PSM e DiD) para testar a hipótese de erosão do faturamento adicional em municípios com produção orgânica.
- O Capítulo 8 utiliza uma base de microdados inédita do Banco Central para estimar o impacto da classificação orgânica/agroecológica no faturamento do produtor, isolando o efeito da certificação de outros fatores de confusão para identificar o retorno financeiro que chega efetivamente à "porta da fazenda".
- O Capítulo 9 provê o modelo microeconômico de decisão específico para a rotulagem "carbono neutro". O modelo formaliza o *trade-off* entre custos de certificação e prêmios esperados, demonstrando matematicamente como a barreira de escala e o risco composto influenciam a escolha do produtor entre rotular toda a sua produção, parte dela ou manter-se no sistema convencional. Adicionalmente, este capítulo utiliza os parâmetros de valorização estimados nos capítulos anteriores para alimentar a formalização microeconômica do modelo de decisão específico para a rotulagem "carbono neutro", permitindo simular os limiares de viabilidade para este novo mercado.

Ao articular essas três dimensões, esta Parte 2 oferece subsídios quantitativos e teóricos para projetar o comportamento e o potencial de valorização do café carbono neutro a partir das lições aprendidas com os sistemas de base ecológica já estabelecidos e compreender se os instrumentos voluntários podem atuar como uma via de inclusão socioeconômica e um motor de valorização para os Cafés do Brasil na nova economia de baixo carbono.

7 A DINÂMICA DO PRÊMIO VERDE

A cafeicultura brasileira, líder mundial em produção e exportação, vivencia uma transformação gradual, mas profunda. Para além da produção em larga escala de *commodities*, ganha força o segmento de cafés diferenciados, que agregam valor por meio de atributos de qualidade, origem ou, de forma crescente, por meio de práticas de produção sustentáveis. A certificação orgânica, em particular, representa um dos principais vetores dessa diferenciação, prometendo aos produtores acesso a nichos de mercado dispostos a pagar um prêmio por produtos alinhados a preocupações ambientais e de saúde.

A literatura econômica tem consistentemente apontado para a existência de um prêmio de preço para cafés certificados. Contudo, a maior parte dessas análises oferece uma "fotografia" estática do mercado, calculando o prêmio em um ponto específico no tempo. Pouco se sabe, no entanto, sobre a dinâmica de longo prazo desse prêmio. À medida que a produção orgânica se expande e deixa de ser um nicho restrito para se tornar uma prática mais disseminada é teoricamente esperado que a vantagem de preço relativa diminua devido ao aumento da oferta, em um processo conhecido como *mainstreaming*.

Compreender essa dinâmica é de suma importância. Para o produtor, a decisão de investir na custosa transição para o sistema orgânico depende não apenas do prêmio atual, mas de seu comportamento futuro. Para os formuladores de políticas, a eficácia dos programas de incentivo à agricultura sustentável depende de uma compreensão clara de como as forças de mercado moldam os retornos dessas práticas ao longo do tempo.

Este estudo busca preencher essa lacuna, abordando a seguinte questão de pesquisa: Como o prêmio de faturamento associado à presença de cafeicultura orgânica em nível municipal evoluiu no Brasil entre 2006 e 2017? Para responder a essa pergunta, este trabalho faz uso de uma base de dados construída a partir dos dados agregados por município dos Censos Agropecuários de 2006 e 2017, realizados pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2009; IBGE, 2019).

Uma contribuição de destaque deste capítulo é sua abordagem metodológica dupla. Primeiramente, foi empregado o método de *Propensity Score Matching* (PSM) nos dados combinados para estimar o efeito médio da presença de produção orgânica sobre o faturamento municipal durante o período. Em seguida, e de forma central, foi utilizado um modelo de Diferenças em Diferenças (DiD) para analisar a evolução desse efeito, comparando a trajetória do faturamento dos municípios com produção orgânica com a de municípios sem essa produção ao longo da década. Essa combinação de métodos permite não apenas estimar quantitativamente o prêmio, mas também testar empiricamente a hipótese de "erosão do prêmio", oferecendo uma visão dinâmica e nuançada do mercado de café orgânico no Brasil.

O capítulo está estruturado da seguinte forma: a seção 7.1 revisa a literatura sobre certificação e a dinâmica de preços. A seção 7.2 apresenta e discute os resultados do PSM e do DiD. A seção 7.3 conclui, sintetizando os achados e suas implicações. Além disso, o detalhamento de fonte de dados e a estratégia econométrica foi apresentado anteriormente na seção 2.5.

7.1 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A decisão de um produtor de adotar práticas de certificação e a disposição de um consumidor em pagar um prêmio por elas são fenômenos econômicos que podem ser compreendidos por meio de teorias sobre informação e qualidade. A presente análise do mercado de cafés certificados se apoia em dois pilares teóricos e empíricos que serão tratados nas duas subseções a seguir: aspectos conceituais da rotulagem como mecanismo para mitigar a assimetria de informação e evidências empíricas da dinâmica desse mercado de diferenciação.

7.1.1 A Rotulagem como Instrumento Voluntário de Política Ambiental

Os instrumentos voluntários de política ambiental configuram-se como mecanismos de incentivo à adoção de práticas sustentáveis que prescindem de coerção estatal direta. Em contraste com os instrumentos de comando e controle, que impõem obrigações legais, os instrumentos voluntários baseiam-se na adesão espontânea de empresas e produtores, estimulada por pressões de mercado, reputação, incentivos econômicos e pela busca de diferenciação ambiental (Segerson, 2013; Castro, 2006).

De acordo com Segerson (2013), a eficácia dessas abordagens depende de três condições fundamentais: (i) incentivos de participação suficientemente fortes, de modo que os benefícios superem os custos das obrigações assumidas; (ii) monitoramento adequado para assegurar o cumprimento voluntário; e (iii) mecanismos que reduzam o comportamento de “carona” entre participantes de programas coletivos. No contexto da rotulagem de café carbono neutro, tais condições são essenciais, pois o êxito da certificação depende tanto da credibilidade da auditoria quanto da percepção dos consumidores sobre o valor ambiental agregado.

Em termos de eficiência econômica, os instrumentos voluntários tendem a apresentar custos administrativos menores e maior flexibilidade na implementação, já que permitem que os agentes ajustem suas estratégias de mitigação conforme suas realidades produtivas (Segerson e Li, 1999). No entanto, a OECD (2003) ressalta que a eficiência dessas abordagens é geralmente limitada, uma vez que raramente incorporam mecanismos que igualem os custos marginais de redução entre os produtores. Isso significa que, no caso da cafeicultura, pequenas propriedades podem enfrentar custos fixos de auditoria e de adequação proporcionalmente mais altos, o que reduz a atratividade da certificação individual.

A motivação para a adoção de instrumentos voluntários está associada tanto a fatores de mercado quanto institucionais. Segundo Castro (2006), empresas e produtores podem

adotar posturas proativas visando à redução de custos, acesso a novos mercados, obtenção de prêmios de preço ou financiamento, e melhora na imagem corporativa. No caso da rotulagem carbono neutro, a adesão pode ser explicada pela demanda crescente de consumidores por produtos com menor pegada de carbono e pela possibilidade de agregar valor econômico e reputacional ao café certificado.

No entanto, Segerson (2013) adverte que melhorias ambientais significativas são menos prováveis em contextos de fraca vontade política para políticas obrigatórias, uma vez que a participação voluntária se restringe aos agentes que percebem benefícios líquidos positivos. Assim, há um trade-off entre rigor e adesão: requisitos mais exigentes tendem a reduzir a taxa de participação, ainda que elevem a credibilidade ambiental do selo.

Adicionalmente, Segerson (2013) observa que programas de certificação e rotulagem funcionam como instrumentos de sinalização, reduzindo a assimetria de informações entre produtores e consumidores. Assim, a rotulagem carbono neutro traduz um esforço para converter os benefícios ambientais — bens públicos — em bens privados comercializáveis (Prakash, 2000), internalizando externalidades positivas relacionadas à mitigação de emissões. Essa dinâmica reforça o papel da certificação ambiental como instrumento híbrido entre política ambiental e estratégia de mercado.

O mercado de produtos agrícolas é caracterizado por uma assimetria de informação fundamental. Atributos como o método de produção (por exemplo, orgânico), o impacto ambiental ou as condições sociais de trabalho são "características de crença" (*credence goods*), ou seja, sua qualidade não pode ser verificada pelo consumidor nem no momento da compra, nem, muitas vezes, após o consumo. Em um mercado com tal assimetria, a teoria seminal de George Akerlof (1970), que analisa o mercado de carros usados, prevê que a incerteza sobre a qualidade pode levar a um colapso do mercado para produtos de alta qualidade. Se os compradores não conseguem distinguir produtos bons dos "limões" (produtos de baixa qualidade), eles estarão dispostos a pagar apenas um preço médio, que pode ser insuficiente para cobrir os custos dos produtores de alta qualidade, expulsando-os do mercado.

Nesse contexto, a rotulagem e a certificação surgem como mecanismos de sinalização, um conceito explorado por Joseph Stiglitz (1987), para mitigar a assimetria de informação. A certificação funciona como um sinal custoso e, portanto, crível, que permite aos produtores de alta qualidade (neste caso, que utilizam sistemas de produção de base ecológica) se diferenciarem dos produtores convencionais. Ao incorrer nos custos de adequação e auditoria

para obter um selo, o produtor sinaliza ao mercado que seu produto possui os atributos não observáveis declarados, justificando a cobrança de um preço premium.

Aplicando essa lógica ao setor de alimentos, Caswell e Mojduszka (1996) argumentam que a rotulagem informacional é uma ferramenta eficaz para corrigir falhas de mercado, permitindo que os consumidores façam escolhas alinhadas às suas preferências e incentivando os produtores a investir em qualidade. No setor cafeeiro, especificamente, Giovannucci e Ponte (2005) aprofundam essa análise, conceituando os padrões de sustentabilidade (como orgânico, Fair Trade, etc.) como uma "nova forma de contrato social". Esses padrões ajudam a estruturar o mercado, reduzir a assimetria de informação e criar valor, estabelecendo um conjunto de regras e expectativas compartilhadas entre produtores, intermediários e consumidores.

Por fim, vale destacar que as abordagens voluntárias baseadas no desempenho, como a certificação de carbono neutro, tendem a ser mais eficazes do que aquelas baseadas em práticas específicas, pois permitem flexibilidade na escolha dos meios de redução de emissões e estimulam a inovação tecnológica (Segerson, 2013). Essa característica é particularmente relevante na cafeicultura, onde as condições edafoclimáticas e tecnológicas variam amplamente entre regiões e produtores.

Em síntese, a rotulagem de café carbono neutro pode ser interpretada como uma aplicação concreta dos instrumentos voluntários de política ambiental. Sua efetividade depende da credibilidade da auditoria, da redução de custos de conformidade para pequenos produtores, e da existência de incentivos de mercado que garantam retornos econômicos e reputacionais proporcionais ao esforço ambiental.

7.1.2 Evidências Empíricas sobre o Prêmio de Preço para Cafés Certificados

A literatura empírica internacional corrobora a teoria, fornecendo diversas estimativas sobre o prêmio de preço associado a cafés certificados. Valkila (2009), ao estudar produtores de café orgânico e de comércio justo na Nicarágua, constatou que o prêmio não é fixo, mas varia significativamente com os preços de mercado. Em um ano de preços baixos (2005), o prêmio foi de 30,5%, enquanto em um ano de preços altos (2008), o prêmio caiu para 7,6%.

Em um estudo comparativo de impacto, Ruben e Zuniga (2011) constataram que a certificação Fair Trade proporcionava uma vantagem direta de preço de aproximadamente 5% aos agricultores, em comparação com produtores independentes. No entanto, os padrões privados (Rainforest Alliance e Café Practices) alcançaram os preços finais mais elevados, embora o artigo não especifique um diferencial percentual exato para esse prêmio,

descrevendo-os apenas como ligeiramente superiores. O sucesso econômico desses padrões privados deveu-se principalmente a um aumento significativo de 20% a 40% nos rendimentos e a uma melhor qualidade do grão, que era recompensada pelo mercado. A pesquisa conclui que, enquanto o Fair Trade é eficaz para garantir um preço mínimo estável, os padrões privados oferecem incentivos mais potentes para ganhos de eficiência e qualidade, resultando em receitas finais superiores para os agricultores.

Assim, uma análise mais aprofundada da literatura revela que a dinâmica dos prêmios de preço é mais complexa do que uma simples vantagem estática. Duas questões importantes emergem. A primeira é o dilema da "erosão do prêmio" e do "*mainstreaming*". O trabalho de Giovannucci e Ponte (2005) alerta que, à medida que a oferta de café certificado aumenta e a prática se torna mais comum, o diferencial de preço em relação ao café convencional tende a diminuir – processo conhecido como *mainstreaming*. Esse fenômeno também é observado por Silva e Nonnenberg (2023), que destacam a redução do prêmio com a popularização da certificação, embora não empreguem o termo. Isso implica que os prêmios observados hoje não são garantidos perpetuamente, exigindo dos produtores certificados um esforço contínuo de inovação e diferenciação para manter sua vantagem competitiva.

A segunda questão refere-se à lacuna entre a disposição a pagar do consumidor e o prêmio efetivamente recebido pelo produtor. Diversos estudos recentes evidenciam que consumidores, sobretudo em países de maior renda, demonstram disposição a pagar prêmios expressivos por cafés certificados. Fuller, Grebitus e Schmitz (2022) verificaram, em leilões experimentais realizados nos Estados Unidos, que os consumidores aceitariam pagar US\$ 2,57 a mais por um pacote de 340 g de café com selo Fair Trade + USDA Organic, US\$ 2,04 pelo selo USDA Organic, US\$ 1,79 pelo Fair Trade, US\$ 1,96 para Rainforest Alliance e US\$ 1,71 para Direct Trade. Resultados semelhantes foram observados na Espanha, onde Merbah e Benito-Hernández (2024) estimaram prêmios de € 1,48 para cafés Fairtrade e € 1,38 para cafés UTZ em embalagens de 250 gramas.

De modo convergente, pesquisa realizada na Costa Rica indicou que 74,4 % dos consumidores estariam dispostos a pagar um prêmio médio de cerca de 30% por cafés com certificações ambientais e sociais (Montero, Vargas e Alpízar, 2021). Embora esses números pareçam consistentes com os prêmios observados no nível da produção, a cadeia de valor do café é longa e complexa, com múltiplos intermediários. Como alertam Giovannucci e Ponte (2005), os benefícios e os prêmios podem ser "perdidos ou diluídos ao longo da cadeia de valor".

Uma vantagem metodológica crucial do presente estudo é o uso de dados de financiamento rural, que medem a receita esperada pelo cafeicultor, ou seja, diretamente pelo elo produtivo da cadeia de valor. Isso permite estimar diretamente o benefício financeiro que chega à "porta da fazenda", contornando os efeitos de confusão introduzidos por torrefadores, exportadores e varejistas, e fornecendo uma medida mais precisa do incentivo econômico real para o cafeicultor.

7.2 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A análise dos dados revela uma história de duas facetas. Por um lado, a produção orgânica confere, em média, um prêmio de faturamento, mas esse prêmio mostrou sinais de enfraquecimento ao longo do tempo. Nas duas próximas seções seguem os resultados obtidos da aplicação dos métodos de PSM e DiD.

7.2.1 O Efeito Médio: Um Prêmio de 14,7%

A aplicação do PSM seguiu os quatro passos descritos na metodologia. Inicialmente, estimou-se o escore de propensão por meio de um modelo logit, tendo como variável dependente a dummy *algum_organico* (1 se o município possuía pelo menos um estabelecimento com produção de café orgânico naquele ano censitário). As covariáveis incluídas foram aquelas que afetam simultaneamente a probabilidade de adoção da cafeicultura orgânica e o faturamento: proporção da área de café arábica (*Arabica*), área média dos estabelecimentos de café (*Areamedia_cafe*), proporção de estabelecimentos com irrigação (*irriga_share*), proporção com máquinas (*maquina_share*), proporção que recebe assistência técnica (*share_orienta*) e índice de escolaridade dos produtores (*indice_escolar*).

A Tabela 10 apresenta os coeficientes estimados, erros padrão e níveis de significância do modelo logit.

Tabela 10 - Modelo logit para o escore de propensão

Variável	Coeficiente	Erro Padrão	z	P> z
Arabica	-0,214	0,0841	-2,55	0,011
irriga_share	0,5723	0,2574	2,22	0,026
Areamedia_cafe	-0,0006	0,001	-0,57	0,571
maquina_share	0,4777	0,0847	5,64	0,000
share_orienta	-2,1354	0,1763	-12,11	0,000
indice_escolar	0,0713	0,0222	3,21	0,001
Constante	0,5605	0,163	3,44	0,001

Fonte: elaboração própria, com base nos resultados da regressão.

Nota: Número de observações: 3.263; LR $\chi^2(6) = 184,14$; Prob > $\chi^2 = 0,0000$; Pseudo R² = 0,0425.

Os resultados indicam que a probabilidade de um município apresentar produção orgânica está positivamente associada à irrigação, à mecanização e à escolaridade dos produtores. A variável *Arabica* apresenta coeficiente negativo, sugerindo que municípios com maior proporção de café arábica tendem a ter menor probabilidade de produzir orgânicos, possivelmente devido a características regionais ou históricas de produção. A assistência técnica (*share_orienta*) tem efeito negativo e altamente significativo, o que pode refletir um viés da extensão rural convencional em favor de sistemas não orgânicos. A área média do café não se mostrou significativa, indicando que, condicional às demais variáveis, o porte da lavoura não influencia a decisão de adoção.

7.2.1.1 Qualidade do Pareamento e Suporte Comum

Todos os municípios tratados (com algum estabelecimento orgânico) encontraram-se na região de suporte comum, garantindo a comparabilidade entre os grupos. A qualidade do pareamento foi avaliada por meio do teste de balanceamento (pctest), que compara as médias das covariáveis entre tratados e controles antes e depois do pareamento. A Tabela 11 sumariza os principais indicadores de balanceamento.

Tabela 11 - Indicadores de balanceamento antes e após o pareamento

Indicador	Antes do Pareamento	Após o Pareamento	Redução (%)
Pseudo R ²	0,041	0,004	90,2
LR χ^2 (p-valor)	179,17 (0,000)	22,05 (0,001)	—
Viés médio (%)	11,3	5,9	47,8
Viés mediano (%)	9,0	6,4	28,9
Estatística B de Rubin	48,3 *	14,7	—

Fonte: elaboração própria, com base nos resultados do balanceamento.

Nota: * Valor fora do intervalo aceitável ($B > 25\%$).

Observa-se uma redução expressiva no viés médio (de 11,3% para 5,9%) e no Pseudo R², indicando que as covariáveis perdem poder preditivo após o pareamento. A estatística B de Rubin cai de 48,3 (inaceitável) para 14,7 (abaixo do limite de 25%), sugerindo que o balanceamento global é satisfatório. Embora algumas variáveis individuais ainda apresentem diferenças estatisticamente significativas após o pareamento – como *maquina_share* (viés = 12,7%, $t = 4,17$) e *indice_escolar* (viés = 8,1%, $t = 2,59$) –, o viés médio geral de 5,9% está dentro do limite recomendado pela literatura (Caliendo e Kopeinig, 2008). Além disso, a análise de sensibilidade apresentada na Seção 7.2.4 indica que o efeito estimado é robusto a esse desbalanceamento residual.

7.2.1.2 Efeito Médio do Tratamento sobre os Tratados (ATT)

Com o pareamento realizado pelo algoritmo de vizinho mais próximo (com reposição), estimou-se o Efeito Médio do Tratamento sobre os Tratados (ATT) para o log do faturamento por tonelada (*log_faturmedio*). A Tabela 12 apresenta os resultados.

Tabela 12 - Efeito médio do tratamento (ATT) sobre o log do faturamento

Amostra	Média nos Tratados	Média nos Controles	Diferença (ATT)	Erro Padrão	Estatística t
Não pareada	1,5672	1,3887	0,1785	0,017	10,52
Pareada	1,5672	1,4303	0,1369	0,0183	7,49

Fonte: elaboração própria, com base nos resultados das estimações do efeito médio do tratamento sobre os tratados (ATT).

O ATT estimado é de 0,1369 (erro padrão = 0,0183), estatisticamente significativo ao nível de 1% ($t = 7,49$). Esse coeficiente indica que, em média, os municípios com presença de cafeicultura orgânica apresentam um faturamento por tonelada 14,7%²⁸ superior ao que teriam se não tivessem adotado o sistema orgânico, mantidas as demais características constantes. O intervalo de confiança de 95% para o ATT é [0,066; 0,160], correspondendo a um aumento entre 6,8% e 17,3%.

Como verificação de robustez, testou-se uma especificação alternativa do escore de propensão, incluindo termos quadráticos para *Areamedia_cafe* e interações entre variáveis. O ATT obtido nessa especificação foi de 0,1369 ($t = 7,49$), praticamente idêntico ao do modelo principal, reforçando a estabilidade da estimativa.

7.2.1.3 Análise de Sensibilidade a Fatores Não Observados

Para avaliar a sensibilidade dos resultados a um eventual confundidor não observado, aplicou-se o teste de *sensatt* (Rosenbaum bounds adaptado). O teste simula a presença de uma variável binária não observada que afeta tanto a probabilidade de tratamento quanto o resultado. Os resultados são apresentados na Tabela 13.

²⁸ A conversão do coeficiente ATT (Efeito Médio do Tratamento sobre os Tratados) de 0,1369 para um percentual de 14,7% é necessária porque a variável de resultado do modelo é o logaritmo do faturamento. Em modelos econométricos onde a variável dependente é logarítmica e a variável de interesse é binária (neste caso, ter ou não produção orgânica), o impacto percentual exato é calculado pela fórmula: $(\exp(\beta)-1) \times 100\%$, onde β é o coeficiente. Assim, $(\exp(0,1369)-1) \times 100\% \approx 14,7\%$.

Tabela 13 - Análise de sensibilidade (sensatt) para log_faturmedio

Especificação	ATT	Erro Padrão
Sem confundidor	0,120	0,023
Com confundidor	0,120	0,023

Fonte: elaboração própria, com base nos resultados da análise de sensibilidade do efeito médio do tratamento sobre os tratados (ATT).

A inclusão de um confundidor simulado não altera substancialmente a estimativa do ATT (0,120), e o erro padrão permanece inalterado. Esse resultado sugere que o efeito estimado é robusto à presença de variáveis omitidas com magnitude moderada, conferindo maior credibilidade à inferência causal.

Em conjunto, as evidências fornecidas pelo PSM indicam que a cafeicultura orgânica está associada a um prêmio de preço da ordem de 14,7% em nível municipal. Esse resultado é consistente em diferentes especificações do escore de propensão, mostra bom balanceamento pós-pareamento e é robusto a potenciais vieses de seleção observáveis e não observáveis. Tais achados corroboram a hipótese de que a diferenciação ecológica gera retornos econômicos para os produtores, constituindo um incentivo relevante à adoção de práticas ambientalmente sustentáveis.

7.2.2 A Dinâmica Temporal: Teste de Erosão do Prêmio

Se a análise de PSM oferece uma fotografia do efeito médio, o modelo de Diferenças em Diferenças (DiD) revela o filme da evolução desse efeito. A análise dos dados revela uma história mais complexa do que a inicialmente documentada em Santos, Nogueira & Torres (2025). Enquanto a versão preliminar deste estudo, baseada em modelos pooled, sugeria uma clara tendência de erosão do prêmio, a presente análise, ao empregar método mais rigoroso para dados em painel, qualifica substancialmente essa conclusão. Os resultados indicam que, embora a produção orgânica confira, em média, um prêmio de faturamento, não há evidências robustas de que esse prêmio tenha se alterado significativamente ao longo da década. A Tabela 14 apresenta os resultados do modelo DiD com o conjunto completo de controles.

Tabela 14 - Resultados da regressão de DiD para o log do faturamento

Variável	Coefficiente	Erro Padrão (Robusto)	Estatística-t	P> t
interacao2 (DiD)	-0,0316	0,0277	-1,14	0,255
censo2017	0,6289	0,0355	17,73	0,000
irriga_share	0,1130	0,0680	1,66	0,097

Areamedia_cafe	0,0001	0,0002	0,61	0,542
armazem_share	-0,0784	0,0686	-1,14	0,253
maquina_share	-0,0509	0,0144	-3,54	0,000
share_orienta	0,0037	0,0699	0,05	0,958
indice_escolar	-0,0235	0,0123	-1,91	0,056
_cons	1,5367	0,0972	15,81	0,000
Observações	2.060			
R ² within	0,7026			

Fonte: elaboração própria, com base nos resultados das estimações do modelo DiD.

Nota: O modelo inclui efeitos fixos para a combinação município-espécie (id), controlando a heterogeneidade não observada constante no tempo.

O coeficiente do termo de interação (DiD) é negativo (-0,0316), mas não estatisticamente significativo ($p = 0,255$). Este resultado contrasta com as estimativas de modelos pooled anteriormente reportados em Santos, Nogueira & Torres (2025), que, ao não controlarem por heterogeneidade não observada, encontravam um coeficiente negativo e significativo de -0,077. A diferença entre as estimativas evidencia o viés presente em modelos que não consideram a estrutura de painel dos dados.

A ausência de significância estatística no modelo com efeitos fixos é corroborada por robustos dois testes de sensibilidade. O primeiro, teste placebo *in-space* (didplacebo), forneceu o p-valor bilateral de 0,170, indicando que o efeito estimado não é estatisticamente distinguível de placebos gerados aleatoriamente. O segundo, *Wild cluster bootstrap* (com 9.999 replicações), indicou o p-valor de 0,265, com intervalo de confiança de 95% incluindo o zero [-0,087; 0,024]. Adicionalmente, vale mencionar que, do total de 1.814 municípios com dados em ambos os censos, 573 (31,6%) alteraram seu status de produção orgânica no período. Esse contingente razoável de *switchers* assegura que a estimativa não é prejudicada por falta de variação na amostra.

7.3 CONCLUSÕES DO CAPÍTULO

Este capítulo investigou a dinâmica do prêmio de faturamento associado à cafeicultura orgânica no Brasil, utilizando dados municipais dos Censos Agropecuários de 2006 e 2017. Por meio de uma estratégia empírica combinada – *Propensity Score Matching* (PSM) para estimar o efeito médio e Diferenças em Diferenças (DiD) com efeitos fixos para analisar a evolução temporal, foi possível obter uma visão clara do comportamento desse prêmio ao longo de uma década.

Os resultados do PSM indicam que a produção orgânica confere, em média, um prêmio de 12% no faturamento por tonelada, mantidas constantes as demais características municipais. O efeito é estatisticamente significativo, robusto a diferentes especificações do

escore de propensão e pouco sensível à presença de confundidores não observados de magnitude moderada. Essa evidência confirma que a diferenciação ecológica está associada a um diferencial econômico positivo no nível municipal.

Contudo, a análise dinâmica por meio do modelo DiD com efeitos fixos de município×espécie não encontra evidência estatisticamente robusta de alteração desse diferencial entre 2006 e 2017. O coeficiente da interação tratamento×período é negativo em magnitude ($-3,1\%$), porém não significativo aos níveis convencionais. A ausência de significância é corroborada por testes adicionais de robustez, incluindo placebo in-space e wild cluster bootstrap, cujos intervalos de confiança incluem o zero. A aparente tendência de redução observada em modelos *pooled* (Santos, Nogueira & Torres, 2025) mostrou-se, após o controle adequado para características fixas dos municípios, um atributo de viés de variável omitida.

Esse resultado revisado tem implicações importantes para os agentes do setor. Para os cafeicultores, a mensagem é dupla: por um lado, a certificação orgânica continua a oferecer um retorno econômico positivo e estável no período analisado; por outro, a ausência de erosão não significa que o prêmio esteja garantido no futuro. Em mercados dinâmicos, a diferenciação contínua, por meio de qualidade superior, rastreabilidade, origem ou certificações complementares, permanece essencial para sustentar a rentabilidade.

As implicações são relevantes tanto para produtores quanto para formuladores de políticas. Para os cafeicultores, os resultados sugerem que a certificação orgânica permanece associada a um diferencial econômico positivo, mas não há indícios de que esse diferencial esteja necessariamente em declínio. A rentabilidade da estratégia depende, portanto, não apenas da existência do prêmio médio, mas da capacidade de cada produtor capturar esse diferencial considerando sua estrutura de custos.

Para as políticas públicas, os achados reforçam a importância de programas de apoio à agricultura sustentável, mas indicam que o debate não deve se concentrar exclusivamente na hipótese de erosão de mercado. Em vez disso, políticas voltadas ao fortalecimento da competitividade, como assistência técnica orientada à qualidade, facilitação de acesso a mercados diferenciados e redução de custos de certificação, podem ser mais decisivas para assegurar que o prêmio observado se traduza em ganhos líquidos sustentáveis no longo prazo.

Por fim, este estudo demonstra a relevância de especificações econométricas adequadas à estrutura dos dados. A modelagem com efeitos fixos de alta dimensão fornece estimativas mais conservadoras e metodologicamente mais robustas da dinâmica do prêmio verde. Pesquisas futuras poderiam aprofundar essa análise com dados em nível de

estabelecimento e com informações sobre custos de produção, permitindo avaliar não apenas o diferencial de faturamento, mas o impacto líquido sobre a lucratividade da cafeicultura orgânica no Brasil.

8 IMPACTO DA ROTULAGEM NO FATURAMENTO DA CAFEICULTURA

Este capítulo²⁹ retoma o dilema estratégico do cafeicultor brasileiro que envolve a decisão de fazer ou não a transição para sistemas de produção de base ecológica, como o orgânico ou o agroecológico, tendo em vista que essa transição promete acesso a mercados mais rentáveis, mas exige, em contrapartida, investimentos significativos, adequação a normas rigorosas e mudanças nas práticas de manejo.

Dessa forma, a decisão de adotar ou não uma certificação torna-se, portanto, um cálculo complexo que pondera os custos e desafios operacionais contra o potencial de aumento de receita. Para que essa decisão seja informada e racional, é fundamental a existência de evidências quantitativas robustas sobre os retornos financeiros associados a tais práticas. A ausência de estimativas precisas sobre o prêmio de preço efetivamente recebido pelo produtor cria uma incerteza que pode inibir a adoção de sistemas mais sustentáveis.

Este estudo busca preencher essa lacuna, respondendo à seguinte questão de pesquisa: Qual é o efeito da adoção de sistemas de produção de base ecológica na cafeicultura, sinalizada pela rotulagem, sobre o faturamento esperado dos produtores rurais no Brasil? A principal contribuição deste trabalho reside em duas frentes. Primeiramente, ele se baseia em uma base de dados única e de grande escala: os microdados de operações de financiamento do Crédito Rural e do Proagro, disponibilizados pelo Banco Central do Brasil. Essa base, que abrange um período de dez anos (2014 a 2023) e mais de 660 mil observações, oferece uma visão detalhada da situação financeira de um vasto universo de propriedades cafeeiras no país.

Em segundo lugar, o estudo emprega uma metodologia de inferência causal, o *Propensity Score Matching* (PSM), para isolar o efeito da certificação de outros fatores que também influenciam a receita, como a espécie de café cultivada (arábica ou conilon), o uso de irrigação e o tamanho da área. Ao fazer isso, o método aborda diretamente o problema do viés de autosseleção, ou seja, a tendência de que os produtores que optam pela certificação já

²⁹ Este capítulo é uma versão adaptada do manuscrito 'Uma Análise do Impacto da Rotulagem de Sistemas de Produção de Base Ecológica no Faturamento da Cafeicultura Brasileira', de autoria de Santos, Nogueira & Torres (2026), ainda não publicado.

sejam, de alguma forma, diferentes dos produtores convencionais, o que permite uma interpretação do impacto da rotulagem.

Para delimitar o escopo deste capítulo, deve-se esclarecer que a fundamentação teórica, que enquadra a certificação como uma solução para a assimetria de informação e revisa a literatura empírica sobre os prêmios de preço no setor, foi apresentada na seção 7.1 do capítulo anterior. Em complemento, o detalhamento da fonte de dados e a metodologia econométrica empregada foi apresentada na seção 2.6 desta tese. Assim, este capítulo fica circunscrito a apresentar e discutir os resultados da pesquisa em quatro seções: a seção 8.1 faz uma análise preliminar por meio de uma regressão de Mínimos Quadrados Ordinários (MQO) que evidencia o viés de seleção. A seção 8.2 apresenta os resultados das estimativas pelo método do PSM e a seção seguinte (8.3) os resultados da análise de Dados em Panel. A seção 8.4 apresenta discussão dos resultados e limitações do estudo e a seção 8.5 conclui o trabalho, sintetizando os achados e discutindo suas implicações para produtores rurais e para a formulação de políticas públicas.

8.1 ANÁLISE PRELIMINAR E A EVIDÊNCIA DO VIÉS DE SELEÇÃO

Uma análise inicial, sem o controle para as diferenças observáveis entre os grupos, pode ser realizada por meio de uma regressão de Mínimos Quadrados Ordinários (MQO). A Tabela 15 apresenta os resultados de um modelo que regressa o logaritmo da receita por tonelada contra a variável de tratamento (organica) e um conjunto de covariáveis.

Tabela 15 - Resultados da regressão por Mínimos Quadrados Ordinários (MQO) para o logaritmo da receita por tonelada

Variável	Coefficiente	Erro Padrão	Estatística-t	P> t
organica	0,429	0,107	4,03	0,000
especie	0,489	0,006	84,38	0,000
vl_area_informada	0,002	0,000	31,99	0,000
_cons	8,135	0,005	1535,40	0,000
Observações	658.060			
R-quadrado	0,0125			

Fonte: elaboração própria, com base nos microdados do SICOR/BACEN (2014-2023).

O coeficiente da variável organica na Tabela 15 é de 0,429 e estatisticamente significativo. Uma interpretação direta deste resultado sugeriria um prêmio de receita de aproximadamente 43%. De forma similar, a simples diferença de médias do logaritmo da receita entre os grupos tratado e não tratado na amostra completa (não pareada) é de 0,439, conforme calculado na análise do PSM e citado no resumo inicial. Este valor, que superestima

o prêmio, não possui uma interpretação causal, pois, como visto na Tabela 18, os produtores que utilizam sistemas de produção de base ecológica são sistematicamente diferentes dos convencionais (por exemplo, cultivam mais café arábica e utilizam mais irrigação). O resultado da regressão MQO, embora controle linearmente por algumas características, ainda é suscetível ao viés de seleção.

A diferença substancial entre esta estimativa preliminar (43,9%) e a estimativa apresentada a seguir (30,1%) quantifica a magnitude do viés de superestimação. Isso demonstra que uma parte considerável do maior faturamento observado nos produtores de café cuja modalidade de agricultura foi classificada, nos dados de financiamento do Banco Central, como orgânica ou agroecológica/sintrópica não se deve ao sistema de produção em si, mas sim a outras características favoráveis inerentes a esses produtores. Este achado ressalta a importância de empregar métodos de inferência causal para obter recomendações de políticas e de negócios que sejam válidas.

8.2 RESULTADOS DA ESTIMAÇÃO POR PSM

A credibilidade da estimativa do ATT depende fundamentalmente do sucesso do procedimento de pareamento em criar grupos de tratamento e controle que sejam estatisticamente balanceados em suas características observáveis. A Tabela 16 apresenta os resultados do teste de balanceamento (pstest) para as covariáveis antes e depois do pareamento, utilizando o modelo PSM_AEI, que demonstrou o melhor desempenho.

Tabela 16 - Teste de balanceamento das covariáveis (antes e depois do pareamento – modelo PSM_AEI)

Variável	Amostra	Grupo Tratado	Grupo Controle	% Viés	Valor-p	Status
especie	Não Pareada	0,842	0,828	4,0	0,024	Desbalanceado
	Pareada	0,842	0,842	0,0	1,000	Balanceado
vl_area_informada	Não Pareada	9,945	8,991	4,0	0,150	Desbalanceado
	Pareada	9,945	9,941	0,0	0,998	Balanceado
irriga	Não Pareada	0,194	0,148	12,0	0,000	Desbalanceado
	Pareada	0,194	0,194	0,0	1,000	Balanceado
ano	Não Pareada	2018,7	2018,6	21,5	0,500	Desbalanceado
	Pareada	2018,7	2018,7	0,0	1,000	Balanceado

Fonte: elaboração própria, com base nos microdados do SICOR/BACEN (2014-2023).

Nota: o desbalanceamento foi avaliado com base no viés padronizado, considerando-se valores acima de 5% como indicativo de desequilíbrio relevante.

Os resultados da Tabela 16 demonstram a eficácia do pareamento. Na amostra não pareada, a variável irriga apresentava um viés padronizado de 12,8% e uma diferença de

médias estatisticamente significativa entre os grupos. Após o pareamento, o viés para todas as covariáveis foi drasticamente reduzido para valores muito próximos de zero (abaixo do limiar de 5% geralmente aceito), e os testes-t não indicam mais diferenças estatisticamente significativas (todos os p-valores são altos). O Pseudo R2 do modelo logit cai de 0,006 para 0,000, e o teste qui-quadrado de razão de verossimilhança (LR chi2) torna-se não significativo ($p=0,999$), indicando que as covariáveis, em conjunto, não mais predizem a alocação ao tratamento. Isso confere forte validade interna à análise, permitindo que a diferença de resultados observada após o pareamento seja atribuída ao tratamento.

Com a garantia do balanceamento, a Tabela 17 apresenta, como a estimativa do Efeito Médio do Tratamento sobre os Tratados (ATT).

Tabela 17 - Efeito médio do tratamento sobre os tratados (ATT) – impacto da cafeicultura de base ecológica na receita por tonelada

Variável de Resultado	Amostra	Tratados	Controles	Diferença (ATT)	Erro Padrão	Estatística-t
LOGreceitaPOR tonelada	Não Pareada	9,00006	8,56106	0,4390	0,1072	4,09
LOGreceitaPOR tonelada	Pareada (ATT)	9,00006	8,73695	0,2631	0,1058	2,49

Fonte: elaboração própria, com base nos microdados do SICOR/BACEN (2014-2023).

A Tabela 17 apresenta o Efeito Médio do Tratamento sobre os Tratados (ATT) obtido por meio do *Propensity Score Matching* (PSM), indicando que a adoção de sistemas de produção de base ecológica (orgânica ou agroecológica) está associada a um aumento médio de 0,2631 no logaritmo da receita por tonelada de café em relação ao grupo de controle estatisticamente equivalente. Esse coeficiente, após a transformação apropriada para modelos log-nível $[(e^{\beta} - 1) \times 100]$, revela um prêmio de preço da ordem de 30,1% para os produtores certificados.

A estimativa é estatisticamente significativa ($t = 2,49$) e reflete o efeito líquido da certificação após o controle do viés de seleção, uma vez que a diferença observada na amostra não pareada (0,439) era substancialmente superior, captando características favoráveis dos produtores que optam pela diferenciação ecológica.

8.3 ANÁLISE DE ROBUSTEZ VIA DADOS EM PAINEL

Como verificação de robustez, a Tabela 18 apresenta os resultados da análise de dados em painel com efeitos fixos de ano. O coeficiente para a variável “organica” é de 0,1308 ($p = 0,008$), correspondente a um prêmio de aproximadamente 14% na receita por tonelada.

Tabela 18 - Resultados do modelo de dados em painel (efeitos fixos de ano)

Variável	Coefficiente	Erro Padrão	Estatística t	P > t
organica	0,1308	0,0494	2,65	0,008
especie	0,4665	0,0093	50,40	0,000
vl_area_informada	0,0023	0,0005	4,46	0,000
irriga	0,1582	0,0091	17,40	0,000
_cons	8,1314	0,0080	1013,29	0,000

Fonte: elaboração própria, com base nos microdados do SICOR/BACEN (2014-2023).

Notas: 658.060 observações. Efeitos fixos de ano incluídos. Erros padrão clusterizados no nível do produtor.

Este resultado é consistente com um efeito positivo da agricultura orgânica, porém de magnitude mais conservadora do que a estimada via PSM (30,1%). A diferença entre as estimativas sugere que o modelo PSM pode estar capturando parte do efeito de variáveis não observadas invariantes no tempo, enquanto o modelo de painel, ao controlar para fatores anuais comuns, fornece uma estimativa mais precisa do efeito analisado.

O resultado central deste estudo, considerando a abordagem metodológica mais conservadora (dados em painel), é um efeito de 0,1308, estatisticamente significativo ao nível de 1%. Aplicando a transformação $[100 * (exp(\beta) - 1)]$ para interpretação em termos percentuais (Wooldridge, 2016), este coeficiente corresponde a um aumento de 14% no faturamento bruto esperado por tonelada de café produzido em sistema classificado como orgânico ou agroecológico.

Cabe destacar que, diferentemente do método de pareamento, o modelo de dados em painel com efeitos fixos de ano não explora variação do mesmo produtor ao longo do tempo, uma vez que a maioria dos produtores aparece apenas uma vez na base. Assim, essa especificação não controla para heterogeneidade não observada invariante ao nível do produtor, mas apenas para choques temporais comuns. Portanto, seus resultados devem ser interpretados como complementares às estimativas obtidas via PSM, oferecendo uma estimativa mais conservadora do prêmio médio associado à rotulagem, e não como uma substituição plena da identificação do efeito baseada em pareamento.

8.4 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS E LIMITAÇÕES

O resultado central deste estudo, considerando a abordagem metodológica mais robusta (dados em painel), é um aumento de aproximadamente 14% no faturamento bruto esperado por tonelada de café produzido em sistema classificado como orgânico ou agroecológico. A trajetória decrescente das estimativas, de 43% (MQO) para 30% (PSM) e

14% (Painel), possivelmente reflete o controle progressivo para vieses de seleção e heterogeneidade não observada.

O modelo de dados em painel com efeitos fixos de ano emerge como a especificação mais conservadora e metodologicamente adequada, equilibrando controle para fatores temporais comuns e preservação amostral. Embora a análise em painel contribua para a robustez dos resultados ao controlar fatores temporais comuns, ela não elimina possíveis vieses de seleção entre produtores, reforçando a importância da leitura conjunta dos resultados de painel e do PSM.

Ao contextualizar este achado com a literatura internacional, observa-se que o prêmio de 14% encontrado para o Brasil está na faixa inferior das estimativas reportadas por estudos como os de Valkila (2009) na Nicarágua e Ruben e Zuniga (2011), porém ainda economicamente significativo. Esta convergência na direção positiva, embora com magnitude mais moderada, fortalece a validade externa do achado, sugerindo que o prêmio pela rotulagem de base ecológica é um fenômeno robusto no mercado global de café.

É imperativo, contudo, reconhecer as limitações inerentes a qualquer estudo observacional. A principal delas é a dependência da hipótese de independência condicional. Embora o procedimento de PSM, conforme atestado pelo excelente balanceamento pós-pareamento (Tabela 16), garanta que os grupos sejam comparáveis em relação às covariáveis observadas espécie, *vl_area_informada*, irriga e ano, o método não controla para fatores não observados. Tais fatores, como a habilidade gerencial do produtor, sua aptidão para o empreendedorismo, a qualidade intrínseca do solo ou do microclima da propriedade (*terroir*), ou a adesão cooperativa com acesso a redes de informação e compradores de nicho, podem influenciar tanto a decisão de se rotular quanto a receita obtida.

Nesse sentido, duas fontes potenciais de viés de variável omitida merecem discussão aprofundada. A primeira refere-se às dotações geográficas. A qualidade do café é fortemente influenciada por fatores de *terroir*, como altitude, clima e solo. O Brasil reconhece formalmente esta importância através de 16 selos de Indicação Geográfica (IG) para o café, que atestam a qualidade superior de produtos de regiões como o Cerrado Mineiro e a Mantiqueira de Minas. Se os produtores em regiões de maior qualidade intrínseca forem também mais propensos a adotar a certificação de base ecológica, nosso estimador do ATT pode estar superestimado, capturando parte do "prêmio da localização". Embora a base de dados utilizada não permita a inclusão de efeitos fixos municipais, o controle por espécie (arábica e conilon) e adoção de irrigação mitiga parcialmente este viés, uma vez que estas características possuem forte correlação espacial.

A segunda e talvez mais significativa fonte de viés provável é a filiação a cooperativas. As cooperativas são agentes cruciais na difusão de tecnologia, na oferta de assistência técnica e, fundamentalmente, no acesso a mercados de maior valor que demandam cafés certificados. É altamente provável que a filiação a uma cooperativa forte esteja positivamente correlacionada tanto com a decisão de se certificar (o tratamento) quanto com a obtenção de melhores preços (o resultado). Como esta variável não pôde ser observada nos dados, sua omissão provavelmente introduz um viés de superestimação no coeficiente estimado.

Diante dessas potenciais fontes de viés, o efeito de 14% deve ser interpretado com nuance: ele representa o efeito do "pacote de tratamento" associado a se tornar um produtor certificado no contexto institucional brasileiro. Este pacote inclui não apenas a adoção das práticas agrônômicas de base ecológica, mas também o acesso a redes de informação, suporte técnico e canais de comercialização frequentemente mediados por cooperativas. Portanto, o resultado de 14% deve ser visto como uma representação abrangente do retorno financeiro obtido pelo produtor ao entrar nesse ecossistema de produção e comercialização diferenciada, refletindo não apenas o valor do selo em si, mas todo o conjunto de vantagens institucionais e de rede que o acompanham.

Com relação ao método, vale mencionar que a validade do PSM também depende da qualidade do pareamento. O modelo final (PSM_AEI) utilizou o algoritmo do vizinho mais próximo 1:1 sem reposição, que, conforme atestado pelos testes de balanceamento, foi altamente eficaz em equilibrar as covariáveis observáveis entre os grupos tratado e controle. No entanto, como em qualquer aplicação de PSM, a possibilidade de viés devido a variáveis omitidas não observáveis permanece.

Assim, um estudo futuro que realize a fusão de outras fontes de dados com a base de operações utilizada neste capítulo poderia incorporar controles para município e filiação a cooperativas, permitindo uma estimativa causal mais robusta e a análise da heterogeneidade regional do prêmio de preço.

8.5 CONCLUSÕES DO CAPÍTULO

Este estudo se propôs a mensurar o impacto da adoção de sistemas de produção orgânica ou agroecológica/sintrópica sobre o faturamento de cafeicultores no Brasil. Por meio da aplicação de múltiplos métodos econométricos (MQO, *Propensity Score Matching* e análise de dados em painel) a um vasto conjunto de microdados de crédito rural, foi possível isolar o efeito da certificação de outros fatores de confusão.

A principal conclusão é que a rotulagem desse tipo de cafés diferenciados é, de fato, uma estratégia que incrementa a receita do agricultor brasileiro. A análise de dados em painel, considerada a mais conservadora, revela que a transição para um sistema de produção de base ecológica está associada a um aumento médio de 14% no faturamento esperado por tonelada de café, um resultado estatisticamente significativo e economicamente relevante. O estudo demonstra ainda que análises que não controlam adequadamente o viés de autosseleção (MQO) tendem a superestimar substancialmente esse ganho, atribuindo erroneamente à certificação os efeitos de outras características favoráveis dos produtores que a adotam.

É importante ressaltar que o prêmio de 14% representa um efeito médio conservador para os produtores que adotaram a certificação. O retorno financeiro individual pode, contudo, variar significativamente em função de heterogeneidades não capturadas integralmente pelo modelo, como o porte do produtor, a região geográfica específica, a eficiência gerencial, o acesso direto a mercados premium ou o suporte de cooperativas. Portanto, este resultado deve ser interpretado como um parâmetro médio robusto para o agricultor brasileiro, e não como uma garantia uniforme para todos os casos.

As implicações desses achados são diretas e relevantes para dois públicos principais. Para os produtores rurais, o resultado de 14% oferece um parâmetro quantitativo crucial para a tomada de decisão. Ele funciona como um "prêmio" de receita esperado que pode ser comparado com os custos adicionais de investimento, manejo e certificação necessários para a conversão de sistemas de produção. Essa informação permite um planejamento financeiro mais acurado e reduz a incerteza associada à transição para práticas agrícolas mais sustentáveis.

Para os formuladores de políticas públicas, os resultados fornecem uma forte justificativa econômica para a criação e expansão de medidas de incentivo à produção de cafés diferenciados por sistemas de produção de base ecológica. Ao demonstrar que práticas ambientalmente desejáveis (como a agricultura orgânica) geram um benefício privado claro (maior faturamento), o estudo sugere um alinhamento entre interesses públicos e privados. Políticas que visem reduzir as barreiras à rotulagem — como a oferta de assistência técnica, a criação de linhas de crédito específicas para a transição e o fomento ao cooperativismo para diluir custos de auditoria — mostram-se, portanto, como investimentos eficientes para promover o desenvolvimento rural sustentável, a agregação de valor na agricultura e a conservação ambiental.

A despeito da robustez dos resultados, a análise aponta para importantes caminhos para pesquisas futuras. O presente estudo oferece uma análise detalhada do impacto sobre a

receita. No entanto, a decisão final do produtor baseia-se na lucratividade, que é a diferença entre receitas e custos. Como a produção de base ecológica frequentemente envolve uma estrutura de custos diferente da convencional (maior uso de mão de obra, insumos diferentes, taxas de certificação), uma investigação futura de grande valor seria complementar a presente análise de receita com uma análise comparativa de custos. A coleta de dados primários sobre os custos de produção em sistemas orgânicos e convencionais permitiria estimar o impacto líquido da certificação sobre o lucro do produtor, fornecendo um quadro ainda mais completo para a tomada de decisão.

Adicionalmente, seria valioso investigar a heterogeneidade do efeito do tratamento, analisando se o prêmio pela rotulagem varia de acordo com o porte do produtor, a região geográfica ou a espécie de café cultivada. Por fim, o modelo aqui desenvolvido estabelece uma linha de base robusta para estudos longitudinais. A aplicação desta mesma metodologia a dados de anos futuros permitirá testar empiricamente a hipótese de "erosão do prêmio", mencionada na literatura, verificando se esse prêmio se mantém estável ou diminui à medida que a oferta de café de base ecológica se expande no mercado brasileiro.

9 ROTULAGEM: MODELO ECONÔMICO DE DECISÃO DO CAFEICULTOR

Este capítulo³⁰ complementa a análise da decisão do cafeicultor de adotar ou não uma certificação com a formalização de um modelo matemático específico para essa escolha. Conforme mencionado no capítulo anterior, para que essa decisão seja racional, é fundamental considerar parâmetros dos retornos financeiros associados a tais práticas. Este estudo busca estabelecer tais parâmetros. Em outras palavras, o presente capítulo desenvolve e analisa um modelo microeconômico para a decisão de um produtor agrícola adotar a rotulagem "carbono neutro" como uma estratégia de diferenciação de produto.

O problema central que este estudo aborda é a otimização da decisão de um produtor agrícola racional quanto à quantidade ótima de produto a ser dedicada à rotulagem "carbono neutro", com o objetivo de maximizar seu lucro líquido esperado. A maximização do lucro neste modelo seguiu, à semelhança do capítulo 6, a teoria da firma e dos custos, em consonância com as formalizações matemáticas de Nicholson e Snyder (2016) e Varian (2015). O modelo incorpora explicitamente a incerteza em componentes-chave do fluxo de

³⁰ Este capítulo é uma versão adaptada do manuscrito 'Rotulagem "Carbono Neutro" na Cafeicultura - Modelo Econômico de Decisão do Produtor Rural', de autoria de Santos, Nogueira & Torres (2026), ainda não publicado.

caixa, tratando o prêmio de preço de mercado e os custos fixos de certificação como variáveis estocásticas.

Quanto à organização deste capítulo, deve-se notar que o referencial conceitual de sinalização de mercado e a revisão das evidências empíricas sobre prêmios de preço foram integralmente abordados na seção 7.1 do capítulo anterior. Adicionalmente, o detalhamento da fonte de dados e a metodologia econométrica empregada foi apresentada na seção 2.7 desta tese. Desse modo, as seções subsequentes focam na contribuição original deste capítulo: a seção 9.1 apresenta a lógica do modelo econômico. A seção 9.2 discute os riscos envolvidos na decisão do produtor e a seção seguinte (9.3) faz uma parametrização do modelo com simulação da barreira de entrada. A seção 9.4 propõe uma extensão não-linear do modelo e a seção 9.5 conclui o trabalho, sintetizando os achados, discutindo suas limitações e subsídios para a formulação de políticas públicas.

9.1 A LÓGICA DO MODELO ECONÔMICO

A transição de práticas convencionais para uma cafeicultura diferenciada por atributos de sustentabilidade, como o rótulo "carbono neutro", constitui uma decisão de investimento estratégica para o produtor. Diferente da comercialização de créditos de carbono, na qual o ativo é uma commodity financeira desvinculada do produto físico, a rotulagem ambiental opera por meio da agregação de valor e da sinalização de qualidade para mercados que valorizam "bens de crença". Essa decisão envolve uma análise complexa de custos e benefícios, na qual o agricultor deve ponderar o prêmio de preço esperado contra os múltiplos custos associados à adequação técnica, auditorias periódicas e gestão da rastreabilidade.

A decisão de adotar a rotulagem é influenciada por diversos fatores, incluindo a aversão ao risco do produtor, o acesso a canais de comercialização diferenciados e a capacidade de superar barreiras de escala impostas pelos elevados custos fixos de certificação. Esses custos fixos, muitas vezes monetariamente proibitivos para propriedades menores, funcionam como uma barreira de entrada significativa, o que ressalta a importância de mecanismos como a certificação coletiva via cooperativas para a inclusão da agricultura familiar. Este modelo, portanto, busca formalizar a lógica microeconômica de um produtor que visa otimizar a alocação de seus recursos produtivos diante da oportunidade de diferenciar seu café no mercado.

A eficácia dessa estratégia de diferenciação depende da credibilidade da sinalização e da estabilidade do prêmio de mercado frente a um perfil de risco composto, que abrange incertezas de mercado, institucionais e técnicas. Enquanto no mercado de créditos o agricultor

gerencia um ativo intangível e volátil, na rotulagem o desafio reside na internalização de externalidades positivas no preço final do grão e na manutenção da preservação de identidade ao longo da cadeia logística. Este capítulo analisa, por meio de modelagem linear e não linear, sob quais condições econômicas a adoção da rotulagem carbono neutro torna-se uma trajetória de investimento racional para o cafeicultor brasileiro.

O modelo linear apresentado neste capítulo, ao abordar a maximização do lucro esperado $E[\tilde{\Pi}]$ a partir da produção desse ativo, captura a essência dessa transformação, analisando como um agente econômico racional responderia aos incentivos e riscos inerentes a este novo paradigma. O problema de otimização do produtor neste modelo, desenvolvido com base na teoria da firma e dos custos, em consonância com as formalizações matemáticas de Nicholson e Snyder (2016) e Varian (2015), foi formalizado na seção 2.7 na seguinte função de maximização do lucro:

$$\max_q \quad E[\Pi(q)] = (E[P_{add}] - cv) \cdot q - E[C_f]$$

Sujeito a:

$$0 \leq q \leq qmax$$

Onde $qmax$ é a capacidade máxima de produção do agricultor.

O problema de otimização desse modelo linear está associado a uma solução de canto, na qual o produtor escolhe produzir a quantidade máxima se a Receita Marginal Líquida Esperada for positiva, ou seja, se o prêmio de preço por unidade supera os custos variáveis, ou o produtor escolhe não produzir nenhuma unidade no caso contrário. Uma regra sintetizada na Tabela 19, abaixo.

Tabela 19 - Resumo da condição de otimalidade e solução para q^*

Condição Matemática	Interpretação Econômica	Solução Ótima (q^*)
$E[P_{add}] > cv$	A receita marginal líquida esperada por unidade é positiva.	$q^* = qmax$
$E[P_{add}] \leq cv$	A receita marginal líquida esperada por unidade é negativa ou nula.	$q^* = 0$

Fonte: elaboração própria, com base nas condições de otimalidade do modelo de decisão linear.

Em essência, a solução define a alocação ótima de recursos na margem. No entanto, uma escolha marginalmente ótima não assegura, por si só, a viabilidade econômica do projeto como um todo. Para que o produtor decida arcar com os custos fixos e dar início ao projeto, é necessário que o lucro esperado ótimo, $E[\Pi(q^*)]$, seja não negativo. E essa condição, foi formalizada na seção 2.7 na seguinte equação:

$$qmax \geq \frac{E[C_f]}{E[P_{add}] - cv} = qmin \quad (18)$$

O modelo que define a "área mínima viável" para projetos de carbono utiliza a mesma lógica matemática de qualquer negócio com custos fixos: é preciso que a escala (em hectares, toneladas etc.) seja suficiente para cobri-los, ou seja, $Escala \geq Custos\ Fixos / Margem\ por\ Unidade$. Isso revela que a necessidade de atingir um tamanho mínimo não é exclusiva de um tipo específico de bem ambiental. Na verdade, essa barreira de escala é uma consequência universal da estrutura de custos presente em todos os mercados de certificação, que se caracterizam por altos custos de transação fixos e indivisíveis.

Em síntese, a formalização do modelo linear revela, portanto, que a decisão do produtor quanto à rotulagem "carbono neutro" desdobra-se em duas etapas lógicas distintas, porém encadeadas. Primeiro, a análise marginal determina se a atividade é operacionalmente viável: o produtor só considerará certificar sua produção se o prêmio de preço esperado superar o custo variável incremental por unidade. Constatada essa condição, a decisão de investimento no projeto como um todo depende de uma segunda análise, desta vez infra-marginal: é necessário que a escala de produção seja suficientemente grande para que a margem de contribuição unitária, multiplicada pelo volume total, consiga absorver os custos fixos indivisíveis da certificação.

A equação $q_{min} = \frac{E[C_f]}{E[P_{add}] - cv}$ sintetiza essa barreira de escala, demonstrando que, no modelo linear, a viabilidade se reduz a uma questão de dimensão mínima. No entanto, esta conclusão deriva de um arcabouço que assume um produtor neutro ao risco. Ao relaxar essa premissa na seção seguinte, a análise avança para um plano mais realista, investigando como a natureza composta do risco (de mercado, institucional e técnico) interage com a aversão ao risco do agricultor para elevar substancialmente a barreira de entrada aqui identificada.

9.2 A NATUREZA COMPOSTA DO RISCO

A análise até agora, ao assumir um produtor neutro ao risco, subestima a verdadeira altura da barreira de entrada. Ao incorporar a natureza composta do risco e a aversão do produtor, o modelo deixa de ser uma abstração linear para se tornar uma ferramenta capaz de capturar o 'prêmio de risco' que efetivamente eleva a barreira de entrada, espelhando os desafios reais enfrentados pela cafeicultura, especialmente o segmento familiar. Um produtor do mundo real, tipicamente avesso ao risco, enfrenta um obstáculo ainda maior devido a um perfil de risco composto por múltiplas fontes de incerteza:

1. Risco de Mercado: A incerteza sobre o prêmio de preço ($Padd$), impulsionada pela lacuna intenção-ação do consumidor.
2. Risco Institucional: A incerteza sobre os custos fixos de certificação ($Cfcert$), que podem variar dependendo da complexidade do projeto e da entidade certificadora.
3. Risco Técnico: A incerteza sobre a eficácia das práticas agrícolas em alcançar a neutralidade de carbono e atender aos padrões de certificação, análoga ao risco sobre a produtividade de carbono (Qcc) no modelo de créditos.

Sob a ótica da teoria da utilidade esperada, um produtor avesso ao risco maximiza não o lucro esperado, mas o equivalente de certeza desse lucro. Adotando uma função de utilidade de média-variância, o 'prêmio de risco' (k) que penaliza a viabilidade do projeto pode ser endogenamente definido como:

$$k = \frac{1}{2} \lambda \sigma_{\Pi}^2$$

Onde λ é o coeficiente de aversão absoluta ao risco do produtor e σ_{Π}^2 é a variância do lucro, impulsionada pela volatilidade do prêmio de preço ($Var(Padd)$). Assim, a condição de viabilidade real torna-se:

$$E[\Pi(q^*)] \geq \frac{1}{2} \lambda \sigma_{\Pi}^2$$

Essa formulação revela que a barreira de entrada não depende apenas dos custos fixos ($E[Cf]$), mas cresce linearmente com a aversão ao risco do produtor e com a instabilidade dos preços de mercado.

9.3 SIMULAÇÃO DA BARREIRA DE ENTRADA

A validação empírica do modelo teórico proposto requer a definição de parâmetros de mercado que reflitam a realidade econômica da cafeicultura brasileira contemporânea. Para tanto, estabeleceu-se um cenário base fundamentado em dados secundários de instituições de referência, estimativas de custos de transação inerentes aos processos de certificação e evidências recentes sobre prêmios de preço no mercado nacional.

No que tange à receita, adotou-se como referência de preço base ($Pbase$) o valor de R\$ 1.819,00 por saca de 60 kg, correspondente à média do indicador Cepea/Esalq para o café arábica (tipo 6, bebida dura para melhor, posto em São Paulo) observada no período recente

de comercialização. A escolha deste indicador justifica-se por sua ampla aceitação como *benchmark* para a formação de preços no mercado físico brasileiro.

A estrutura de custos, por sua vez, foi parametrizada para refletir a especificidade da rotulagem "Carbono Neutro". Diferentemente de certificações de processo, que demandam verificação de conformidade qualitativa, a neutralidade de carbono exige rigorosa quantificação técnica. Assume-se, portanto, um Custo Fixo de Projeto (Cf) de R\$ 31.229,00 anuais. Este montante compõe-se não apenas das taxas de auditoria de certificadoras credenciadas, mas substancialmente dos custos de consultoria especializada para a elaboração do Inventário de Emissões de Gases de Efeito Estufa (Escopos 1, 2 e 3), em conformidade com normas técnicas como a PAS 2060 ou a ISO 14064. Adicionalmente, estabeleceu-se um Custo Variável incremental (cv) de R\$ 49,14 por saca, destinado a cobrir *royalties* de uso do selo, taxas volumétricas cobradas por certificadoras e custos administrativos de rastreabilidade e segregação de lotes³¹.

Com base nestes parâmetros e considerando uma produtividade média de 30 sacas por hectare, procedeu-se à simulação da "Quantidade Mínima Viável" ($qmin$) necessária para superar a barreira de entrada, aplicando-se a Equação (18) derivada neste estudo. A análise considerou três cenários de prêmio de preço ($Padd$):

- Cenário Conservador (5%): Condizente com mercados saturados ou certificações convencionais consolidadas. Esse preço adicional foi aferido por Ruben e Zuniga (2011), conforme mencionado na seção 7.1.2;
- Cenário Intermediário (14%): Baseado em estimativas econométricas recentes para o mercado brasileiro. No capítulo 8 desta tese foi estimado este percentual médio de valorização para sistemas de produção de base ecológica na cafeicultura nacional, isolando o efeito da certificação sobre o faturamento;
- Cenário Otimista (30%): Refletindo nichos de alta diferenciação e disposição a pagar por atributos ambientais específicos em mercados de alta renda. Esse percentual está coerente com o prêmio médio é coerente com as estimativas de Valkila (2009) e de Montero, Vargas e Alpízar (2021), abordadas na seção 7.1.2.

³¹ O Custo Fixo foi considerado o "Custo 1" de certificação apresentado na seção 2.2.4. Em relação ao Custo Variável, considerou-se o mesmo apresentado na seção 2.2.4, no montante de R\$ 1.474 por hectare por ano. No entanto, esse valor foi dividido por 30 para que o Custo Variável fosse rateado pela quantidade de sacas de café produzidas em um hectare.

Os resultados da simulação, sintetizados na Tabela 20, evidenciam a magnitude da barreira de escala. No cenário conservador, onde a margem líquida adicional é comprimida para R\$ 41,81 por saca, o produtor necessitaria comercializar aproximadamente 748 sacas certificadas apenas para cobrir os custos fixos do projeto³². Isso corresponde a uma área produtiva mínima de 24,9 hectares, dimensão que supera o tamanho médio das propriedades da agricultura familiar em diversas regiões cafeeiras do Brasil.

Tabela 20 - Estimativa da quantidade mínima viável (q_{min}) e área produtiva correspondente para adoção da rotulagem

Cenário	Referência	Prêmio (%)	Margem Líquida ($Padd - cv$)	q_{min} (sacas)	Área Mínima (ha)
Conservador	Benchmark Int.	5%	R\$ 41,81	748	24,9
Intermediário	Estimado (Seção 8.3)	14%	R\$ 205,52	152	5,1
Otimista	Nichos especiais	30%	R\$ 496,56	63	2,1

Fonte: elaborado pelo autor com base em dados do Cepea (2025) e estimativas do modelo da Seção 8.3.

O cenário intermediário, fundamentado nos parâmetros estimados na Seção 8.3, revela um ponto de inflexão importante. Com um prêmio de 14%, a barreira de entrada cai para aproximadamente 5,1 hectares. Este resultado sugere que, sob condições realistas de mercado brasileiro, a rotulagem "Carbono Neutro" torna-se acessível para a faixa superior da agricultura familiar e para médios produtores, desde que estes operem com eficiência e consigam capturar o prêmio estimado. Já o cenário otimista (30%) confirma que a viabilidade econômica é altamente elástica em relação ao preço: em contextos de forte valorização, a barreira de escala é mitigada para cerca de 2,1 hectares, permitindo ampla inclusão.

9.4 EXTENSÃO DO MODELO: NÃO-LINEARIDADE

O modelo linear apresentado nas seções anteriores é útil para identificar a barreira de entrada, mas assume que a receita cresce indefinidamente com a quantidade e que os custos marginais são constantes. No entanto, a realidade operacional da segregação de cafés especiais impõe restrições que sugerem formas funcionais não lineares.

A garantia da neutralidade de carbono exige "Preservação de Identidade" (IP). À medida que o volume (q) aumenta, a complexidade logística para evitar a contaminação

³² Como a quantidade mínima viável deve corresponder a um número inteiro de sacas comercializadas, os valores de q_{min} foram arredondados para cima, de modo a garantir a cobertura integral dos custos fixos do projeto.

cruzada com cafés convencionais e gerenciar lotes segregados cresce de forma mais que proporcional. Propõe-se uma função de custo variável convexa:

$$cv(q) = \beta \cdot q^2$$

O parâmetro β captura as fricções logísticas reais de um sistema de identidade preservada (IP). Em unidades de beneficiamento de café, a segregação de lotes 'carbono neutro' exige a paralisação de máquinas para limpeza completa de moegas, elevadores e tulhas, a fim de evitar a contaminação física com grãos convencionais. Quanto maior o volume processado (q) e a frequência de alternância entre tipos de café, maiores são os tempos mortos operacionais e os riscos de mistura accidental. Diferente do modelo industrial padrão, onde a escala dilui custos, na gestão de atributos de credibilidade ('*credence goods*'), a escala pode gerar complexidade gerencial exponencial, justificando a adoção de uma função de custo marginal crescente.

Conforme alertado por Giovannucci e Ponte (2005) sobre o fenômeno do *mainstreaming*, o prêmio de preço tende a cair com o aumento da oferta. Isso pode ser modelado por uma receita que cresce a taxas decrescentes (função côncava):

$$R(q) = P_{base} \cdot q^\alpha$$

Onde $0 < \alpha < 1$ captura a elasticidade da receita em relação à quantidade ofertada no nicho.

A nova função de lucro esperado torna-se:

$$E[\Pi(q)] = (P_{base} \cdot q^\alpha) - (E[C_f] + \beta q^2), \text{ com } 0 < \alpha < 1, \beta > 0$$

A maximização deste lucro leva a uma solução interior ($q^* < q_{max}$), onde a Receita Marginal iguala o Custo Marginal crescente e faz com que o produtor possa optar por certificar apenas uma fração de sua produção ($q^* < q_{max}$), destinando o restante ao mercado convencional. Tal comportamento é mais condizente com a realidade observada em mercados de produtos diferenciados, nos quais a segregação total pode ser proibitivamente custosa.

A condição de primeira ordem para um máximo interior (isto é, para $0 < q < q_{max}$) é obtida derivando-se a função em relação a q e igualando a zero:

$$\frac{dE[\Pi]}{dq} = \alpha P_{base} \cdot q^{\alpha-1} - 2\beta q = 0$$

Reorganizando os termos, tem-se a igualdade entre receita marginal e custo marginal:

$$\alpha P_{base} \cdot q^{\alpha-1} = 2\beta q$$

Para $q > 0$, pode-se dividir ambos os lados por q , obtendo:

$$\alpha P_{base} \cdot q^{\alpha-2} = 2\beta$$

Isolando q , chega-se à expressão da quantidade ótima interior:

$$q^* = \left(\frac{\alpha P_{base}}{2\beta} \right)^{\frac{1}{2-\alpha}}$$

A solução q^* representa o ponto em que o ganho marginal de certificar uma unidade adicional iguala o custo marginal crescente decorrente da complexidade logística e da diluição do prêmio. Para que essa solução seja factível, duas condições devem ser satisfeitas: (i) $q^* \leq q_{max}$, caso contrário a solução ótima seria o canto $q^* = q_{max}$; e (ii) o lucro esperado em q^* deve ser não negativo, garantindo a viabilidade do projeto. A condição de segunda ordem é verificada pela derivada segunda negativa:

$$\frac{d^2 E[\Pi]}{dq^2} = \alpha(\alpha - 1)P_{base} \cdot q^{\alpha-2} - 2\beta < 0,$$

o que é assegurado pelos parâmetros adotados ($\alpha < 1$ e $\beta > 0$), confirmando que q^* é um ponto de máximo.

Esse resultado evidencia uma diferença crucial em relação ao modelo linear: a presença de deseconomias de escala e de um prêmio decrescente. Isso demonstra que, diferentemente do modelo linear ("tudo ou nada"), pode haver um ponto ótimo onde o produtor decide rotular apenas uma parte da sua produção (ex: apenas os cafés de melhor qualidade e mais fáceis de separar em lotes diferenciados), vendendo o restante como convencional, para evitar os custos crescentes de certificação.

9.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO

O modelo econômico desenvolvido neste capítulo formaliza a decisão de um produtor agrícola sobre a adoção da rotulagem "carbono neutro". A análise rigorosa gera três conclusões principais. Primeiro, a estrutura de custos marginais lineares leva a uma decisão de alocação "tudo ou nada": o produtor rotula toda a sua produção ou nenhuma. Segundo, a viabilidade geral depende de a escala de produção ser grande o suficiente para superar uma "quantidade mínima viável" (q_{min}), que atua como uma barreira de escala significativa. Terceiro, o perfil de risco composto (de mercado, institucional e técnico) eleva essa barreira para produtores avessos ao risco. Sem intervenções políticas adequadas, os mercados

voluntários de produtos sustentáveis correm o risco de levar à concentração de mercado e à exclusão da maioria dos produtores de pequena e média escala.

Embora este modelo forneça uma estrutura analítica clara, ele se baseia em simplificações que representam oportunidades para futuras pesquisas. O modelo é estático, enquanto uma abordagem dinâmica com teoria de opções reais poderia capturar a decisão de "esperar para investir". A premissa de neutralidade ao risco poderia ser substituída pela aversão ao risco para estimar de forma mais realista os limiares de adoção. Finalmente, a tecnologia agrícola e seus custos poderiam ser endogeneizados, permitindo ao produtor escolher entre um menu de práticas de mitigação.

9.5.1 Implicações Políticas e Recomendações

As conclusões do modelo oferecem uma base para a formulação de políticas públicas, que podem ser estruturadas em torno das alavancas da equação da quantidade mínima viável: $q_{min} = (E[Cf] + k)/(E[Padd] - cv)$.

1. Reduzir a Barreira de Custo Fixo (Diminuir $E[Cf]$):

A principal recomendação para superar a barreira de escala é o apoio à certificação cooperativa. O modelo prevê teoricamente que a partilha de custos fixos reduziria a escala mínima necessária. A evidência empírica valida essa previsão: cooperativas de café brasileiras, como a monteCCer e a Expocacer, são pioneiras globais em certificações de carbono, demonstrando que este é um modelo institucional comprovado para viabilizar a participação de múltiplos produtores. Iniciativas como o "Projeto Neutralidade Carbono" do Sistema OCB, que capacita cooperativas para mensurar suas pegadas de carbono, são cruciais e devem ser ampliadas. As políticas públicas devem, portanto, focar em financiar, escalar e replicar esses modelos cooperativos como a estratégia central para a inclusão de pequenos e médios produtores.

2. Aumentar a Receita Marginal Líquida (Aumentar $E[Padd]$):

Para que a atividade seja marginalmente lucrativa, as políticas devem focar em fortalecer o lado da demanda, abordando diretamente a lacuna intenção-ação. A construção da confiança do consumidor é fundamental. O recém-criado "Selo Verde Brasil" é um exemplo de política pública essencial, pois visa padronizar selos, combater o greenwashing e criar um referencial de credibilidade que pode aumentar o prêmio de preço efetivamente pago pelos consumidores. Campanhas de educação pública e o uso de compras públicas verdes são outras ferramentas importantes.

3. Mitigar o Risco Composto (Diminuir k):

Para incentivar a participação de produtores avessos ao risco, é imperativo mitigar a incerteza. Um ambiente regulatório estável e previsível para os padrões de certificação reduz o risco institucional. O investimento público em pesquisa e desenvolvimento de metodologias de Mensuração, Relato e Verificação (MRV) mais baratas e precisas, bem como em práticas agrícolas de baixo carbono, reduz o risco técnico.

4. Criar Sinergias com Políticas Habilitadoras (Diminuir *cvbpa*):

Existe uma relação simbiótica entre políticas públicas existentes e os mercados voluntários. O Plano ABC+ é um programa federal robusto que oferece apoio técnico e financeiro (crédito subsidiado) para que os agricultores adotem as mesmas práticas de baixo carbono necessárias para a certificação. O Plano ABC+ atua como uma política habilitadora crítica, reduzindo o custo incremental (*cvbpa*) e o risco da transição tecnológica inicial. Isso torna mais viável para os produtores acessarem as oportunidades de receita dos mercados voluntários. As políticas devem, portanto, fortalecer a integração entre o Plano ABC+ e os programas de certificação para criar um caminho contínuo desde a adoção de práticas sustentáveis até a recompensa de mercado.

Em síntese, a viabilidade de mercados voluntários para produtos agrícolas sustentáveis depende de um delicado equilíbrio entre receitas, custos e riscos. O modelo demonstra que as barreiras estruturais são tão importantes quanto os preços de mercado. Políticas públicas bem desenhadas, que abordem simultaneamente todos esses fatores, são cruciais para a sustentabilidade e a equidade desses mercados emergentes.

10 O POTENCIAL DA CAFEICULTURA PARA A REDUÇÃO DE GEE

O problema central de pesquisa deste capítulo reside na hipótese de que, embora o potencial teórico de mitigação da cafeicultura seja expressivo, sua materialização é ameaçada por barreiras econômicas intrínsecas ao funcionamento dos mercados de carbono. Os elevados custos de transação, associados à certificação, monitoramento, relato e verificação (MRV) dos créditos, criam uma escala mínima de viabilidade econômica que pode, na prática, excluir a maioria dos produtores do mercado. Diante disso, o objetivo deste artigo é quantificar o impacto dessa barreira de escala na efetividade global do mercado de carbono para o setor agrícola e discutir as implicações para o desenho de uma política climática que seja, ao mesmo tempo, ambientalmente eficaz e socialmente inclusiva.

A agricultura pode contribuir para a redução de GEE de duas maneiras principais: reduzindo as emissões diretas (por exemplo, através do manejo de dejetos animais ou do uso otimizado de fertilizantes nitrogenados) e removendo o dióxido de carbono (CO₂) da

atmosfera, sequestrando-o na biomassa e, principalmente, no solo. A Tabela 21 apresenta metas quantitativas de área de adoção de tecnologias que reduzem emissões de GEE, contempladas pelo Plano ABC+.

Tabela 21 - Metas quantitativas do Plano ABC+ (2020-2030) por tecnologia

Tecnologia (SPSABC)	Meta de Adoção (Área/Volume/Unidade)
Práticas para Recuperação de Pastagens Degradadas (PRPD)	30 milhões de hectares
Sistema Plantio Direto de Grãos (SPDG)	12,5 milhões de hectares
Sistemas de Integração Lavoura-Pecuária-Floresta (iLPF)	10 milhões de hectares
Bioinsumos (incluindo FBN)	13 milhões de hectares
Florestas Plantadas (FP)	4 milhões de hectares
Sistemas Irrigados (SI)	3 milhões de hectares
Sistemas Agroflorestais (SAFs)	100 mil hectares
Manejo de Resíduos da Produção Animal (MRPA)	208,4 milhões de m ³ de resíduos tratados
Terminação Intensiva (TI)	5 milhões de animais abatidos

Fonte: Brasil (2021).

Tecnologias como o sistema de plantio direto, a integração lavoura-pecuária-floresta (iLPF) e outros cultivos consorciados, a recuperação de pastagens degradadas e sistemas agroflorestais, mencionadas no Plano ABC+, são reconhecidas por seu potencial de incrementar os estoques de carbono no solo. Esse é um serviço ecossistêmico que pode ser quantificado e promovido por políticas ambientais.

Dessa forma, a formulação de políticas públicas e privadas voltadas à sustentabilidade tornou-se prioridade. Nesse contexto, os instrumentos econômicos e instrumentos voluntários de política ambiental emergem como alternativas complementares aos mecanismos tradicionais de comando e controle, ao promoverem incentivos de mercado e estímulos para a adoção de práticas sustentáveis.

10.1 CUSTOS DE TRANSAÇÃO E A BARREIRA DA ESCALA

Apesar da elegância teórica dos mercados de licenças negociáveis, sua aplicação prática é condicionada pela existência de custos de transação, um conceito explorado pioneiramente por Coase (1937). No contexto dos mercados de carbono, esses custos se manifestam como as despesas necessárias para definir, validar, monitorar e comercializar um crédito de carbono. Eles incluem os altos gastos com a elaboração de metodologias, a validação por entidades terceiras, o monitoramento contínuo das práticas adotadas e a verificação periódica dos resultados de mitigação.

Esses custos possuem uma característica econômica particular: uma parcela significativa deles é fixa, ou seja, não varia proporcionalmente com a escala do projeto. A

despesa administrativa para certificar os créditos de uma propriedade de 10 hectares pode ser muito similar à de uma propriedade de 500 hectares. Essa dinâmica cria uma consequência inevitável: a existência de uma escala mínima de viabilidade econômica. Projetos de pequena escala, que geram um volume reduzido de créditos de carbono, podem se tornar financeiramente inviáveis, pois a receita potencial com a venda dos créditos é insuficiente para cobrir os elevados custos fixos de transação.

Este fenômeno transforma um instrumento de mercado teoricamente neutro em um mecanismo que, na prática, seleciona participantes com base em sua escala. O estudo de Santos e Nogueira (2025) estima que, para a cafeicultura brasileira, essa área mínima viável situa-se entre 50 e 320 hectares, um patamar que exclui a grande maioria dos produtores. A literatura aponta estratégias para mitigar essa barreira, como a agregação de pequenos produtores em projetos coletivos, o uso de infraestrutura de gestão existente (como cooperativas) e a redução dos custos de informação por meio de metodologias simplificadas de implementação e monitoramento, conforme sugerido por Cacho *et al.* (2013).

A redução de custos de certificação por meio de projetos coletivos é uma prática comum no processo de rotulagem voluntária de sustentabilidade, que faz parte de instrumentos voluntários de política ambiental. Essa certificação tem se consolidado como um dos principais instrumentos de incentivo à adoção de práticas agrícolas ambientalmente responsáveis na cafeicultura brasileira (Moreira *et al.*, 2011). Além de diferenciar o produto nos mercados especializados, a certificação pode funcionar como um mecanismo de motivação para a adoção de boas práticas ambientais, incluindo medidas voltadas à redução do impacto ambiental, ao manejo racional dos recursos naturais e à valorização do trabalho rural (Duarte e Ferreira, 2019; Pereira, 2014).

Para pequenos produtores, a certificação individual enfrenta barreiras econômicas significativas, especialmente devido aos custos fixos de auditoria e de conformidade (Duarte e Ferreira, 2019). Entretanto, no contexto brasileiro, a certificação coletiva via cooperativas surge como a principal estratégia para superar essa barreira. Nesse modelo, os custos fixos de auditoria e conformidade, que inviabilizam a certificação individual (Duarte e Ferreira, 2019), são diluídos entre os membros, gerando economias de escala que viabilizam a participação de pequenos produtores (Latynskiy e Berger, 2017). Iniciativas como o Certifica Minas Café comprovam que essa abordagem é um caminho estratégico para a cafeicultura sustentável, ao tornar o processo acessível e fortalecer a governança local (Minas Gerais, 2020; Perosa e Sparsis, 2016; Araújo *et al.*, 2016).

Assim, para um cafeicultor com cerca de 10 hectares, a certificação sustentável é viável e estratégica quando realizada coletivamente. A certificação em grupo reduz os custos fixos, melhora a capacidade de gestão ambiental e promove a inserção competitiva em mercados diferenciados, consolidando-se como instrumento de desenvolvimento rural sustentável e mitigação das emissões agrícolas.

10.2 POTENCIAL DE MITIGAÇÃO DA CAFEICULTURA: RESULTADOS

A análise dos cenários quantifica o vasto potencial de mitigação da cafeicultura e, ao mesmo tempo, revela como diferentes instrumentos de política ambiental determinam a sua realização. Os resultados demonstram que, enquanto o mercado regulado de carbono (SBCE) enfrenta barreiras estruturais que limitam a participação, instrumentos voluntários como a rotulagem ambiental emergem como uma via estratégica para incluir a agricultura familiar e maximizar o impacto climático e social do setor.

10.2.1 Potencial Agregado Nacional

A análise em escala nacional, apresentada na Tabela 22, contrapõe dois modelos de política distintos. Os cenários de 50, 100 e 200 hectares, projetados por Santos e Nogueira (2025) e apresentados na seção 2.8 desta tese, simulam os resultados prováveis do SBCE, onde os custos de transação para a venda de créditos de carbono criam barreiras de escala. Em contraste, o cenário inclusivo de 10 hectares foi especificamente inserido para estimar o potencial máximo que poderia ser alcançado através de uma política de incentivo à rotulagem de "café carbono neutro", por exemplo. Este instrumento voluntário, ao invés de depender da venda de créditos, cria valor através de um prêmio de preço no mercado consumidor, tornando a adoção de práticas sustentáveis viável até para os pequenos produtores, especialmente quando organizados em cooperativas.

Tabela 22 - Potencial nacional de mitigação, área de conversão e receita da cafeicultura de baixo carbono sob diferentes cenários de viabilidade

Escala mínima viável (ha)	Área (ha)	Toneladas GEE (tCO ₂ eq)	Receita (R\$)
10	1.717.654	13.019.817	n.a. ³³
50	1.093.251	8.286.843	2.295.455.395
100	823.909	6.245.230	1.729.928.771

³³ Para os cenários de 50, 100 e 200 hectares, a receita foi calculada com base nos dados do Santos e Nogueira (2025). Para o cenário de 10 hectares, que depende da adoção de rotulagem como instrumento voluntário, a receita não foi calculada.

200	567.951	4.305.069	1.192.503.997
-----	---------	-----------	---------------

Fonte: elaborado pelo autor, com base nos dados do Santos e Nogueira (2025) e projeção de área inclusiva para cenário inclusivo.

Os dados revelam uma diferença expressiva. O cenário de rotulagem (10 ha) demonstra que a cafeicultura brasileira tem um potencial técnico de mitigar aproximadamente 13 milhões de toneladas de CO₂ equivalente (tCO₂eq). No entanto, se a política climática se restringir apenas ao mercado de carbono (SBCE), mesmo em sua configuração mais otimista (50 ha), o potencial realizável cai para 8,3 milhões de tCO₂eq. Em um cenário mais restritivo (200 ha), que reflete a realidade de altos custos de transação, o potencial despenca para 4,3 milhões de tCO₂eq.

Isso significa que uma política focada exclusivamente no mercado regulado deixaria de realizar entre 36% e 67% do potencial total de mitigação do setor. A diferença de quase 8,7 milhões de tCO₂eq entre o cenário de rotulagem e o cenário mais restritivo do SBCE representa o "custo de oportunidade" de não se implementar uma política complementar de incentivo a instrumentos voluntários. Fica evidente que, para o Brasil atingir suas metas climáticas, a promoção da rotulagem não é apenas uma opção, mas uma necessidade estratégica para engajar a base da pirâmide produtiva.

Nesse contexto, os resultados sugerem que o planejamento desse Mercado Brasileiro de Redução de Emissões no sistema *cap and trade* contemple meios institucionais de redução dos custos de certificação e permitam agregar o potencial difuso dos pequenos produtores para que a eficácia da política seja maximizada. Com base nas opções apresentadas por Cacho *et al.* (2013) é recomendável permitir que esses processos de certificação sejam conduzidos por cooperativas de cafeicultores que, por meio da agregação, incrementam a escala de produção ao somar as áreas produtivas de seus cooperados, permitindo o rateio desses custos. Vale mencionar que essa prática de certificação coletiva, por meio de cooperativas por exemplo, já vem sendo adotada para certificações de rotulagem sustentável, consideradas instrumentos voluntários de política ambiental.

Além disso, metodologias de implementação e monitoramento podem ser desenvolvidas por meio da pesquisa tecnológica agrícola, como por exemplo metodologias de balanço de carbono de menor custo. Esse avanço tecnológico pode reduzir os dispêndios de Mensuração, Relato e Verificação (MRV) no caso do comércio de créditos de carbono e também gastos de auditoria de rotulagem sustentável, inerentes a esses processos de certificação, sem comprometer sua credibilidade internacional.

10.2.2 Impactos Assimétricos em Nível Municipal

A análise em nível municipal aprofunda essa conclusão, mostrando como uma política de rotulagem poderia funcionar como um poderoso instrumento de desenvolvimento regional, precisamente nas áreas que seriam marginalizadas pelo mercado de carbono. As Tabelas 23 e 24 expõem a heterogeneidade dos impactos, onde a estrutura agrária local define quem ganha e quem perde.

Tabela 23 - Área potencial de adoção de boas práticas que reduzem emissão de GEE por município em faixas de área a partir de 10, 50, 100 e 200 hectares

Município	Área de propriedades partir de 10 hectares (em hectare)	Área de propriedades partir de 50 hectares (em hectare)	Área de propriedades partir de 100 hectares (em hectare)	Área de propriedades partir de 200 hectares (em hectare)
Patrocínio (MG)	25.326	17.883	10.866	2.235
Boa Esperança (MG)	18.804	15.444	12.363	7.275
Três Pontas (MG)	18.952	14.679	11.793	6.503
Campos Gerais (MG)	22.382	14.196	9.756	5.799
Piumhi (MG)	13.901	12.327	10.707	8.565
São Sebastião do Paraíso (MG)	15.399	12.117	9.377	5.949
Machado (MG)	12.775	10.472	7.279	3.955
Monte Carmelo (MG)	12.999	10.256	7.026	7.026
Garça (SP)	10.059	8.628	7.580	5.389
Ibiraci (MG)	12.664	8.319	5.078	2.078
Araguari (MG)	11.673	7.856	4.324	1.609
Linhares (ES)	14.737	7.839	4.282	1.797
Jaguaré (ES)	12.247	7.032	4.840	2.478
Campestre (MG)	12.954	6.665	4.772	3.598
Rio Bananal (ES)	15.905	5.874	2.606	589
São Mateus (ES)	11.408	5.205	3.019	1.644
Manhuaçu (MG)	12.969	4.928	1.660	1.660
Nova Venécia (ES)	10.334	4.341	1.975	803
Carmo do Rio Claro (MG)	8.485	4.247	1.983	-
Vila Valério (ES)	9.155	4.113	2.813	1.904
Santa Margarida (MG)	7.933	3.780	2.789	1.334
Lajinha (MG)	6.972	3.261	1.917	567
Afonso Cláudio (ES)	9.393	3.215	1.091	382
Pancas (ES)	8.823	3.069	1.578	594
Iúna (ES)	7.583	3.039	1.664	903
Simonésia (MG)	7.539	2.187	798	-
Castelo (ES)	7.411	1.903	183	-
Nova Resende (MG)	9.027	1.892	775	-

Fonte: elaborado pelo autor com base nos dados do Santos e Nogueira (2025) e projeção de área inclusiva para cenário inclusivo.

Nota: a seleção representa os 28 municípios no quantil 99,5, que juntos somam 0,5% da área total cultivada com café no Brasil.

A incorporação da rotulagem ambiental como instrumento complementar ao mercado regulado altera de forma substantiva os resultados anteriormente apresentados na Seção 5.4.

Enquanto a análise restrita à venda de créditos de carbono evidenciou forte sensibilidade do potencial de mitigação à definição de escalas mínimas de 50 ou 200 hectares, a possibilidade de inclusão de propriedades com aproximadamente 10 hectares amplia significativamente o universo elegível, sobretudo em municípios caracterizados por estrutura fundiária fragmentada. As Tabelas 23 e 24 demonstram que a redução do limiar de participação não apenas eleva o potencial agregado de mitigação, mas modifica a distribuição espacial dos ganhos ambientais.

Tabela 24 - Quantidade redução de GEE por municípios em faixas de área a partir de 10, 50, 100 e 200 hectares

Município	Redução de GEE em propriedades a partir de 10 hectares (em ton de CO₂ eq))	Redução de GEE em propriedades a partir de 50 hectares (em ton de CO₂ eq)	Redução de GEE em propriedades a partir de 100 hectares (em ton de CO₂ eq)	Redução de GEE em propriedades a partir de 200 hectares (em ton de CO₂ eq)
Patrocínio (MG)	191.971	135.553	82.364	16.941
Boa Esperança (MG)	142.534	117.066	93.712	55.145
Três Pontas (MG)	143.656	111.267	89.391	49.293
Campos Gerais (MG)	169.656	107.606	73.950	43.956
Piumhi (MG)	105.370	93.439	81.159	64.923
São Sebastião do Paraíso (MG)	116.724	91.847	71.078	45.093
Machado (MG)	96.835	79.378	55.175	29.979
Monte Carmelo (MG)	98.532	77.740	53.257	53.257
Garça (SP)	76.247	65.400	57.456	40.849
Ibiraci (MG)	95.993	63.058	38.491	15.751
Araguari (MG)	88.481	59.548	32.776	12.196
Linhares (ES)	111.706	59.420	32.458	13.621
Jaguaré (ES)	92.832	53.303	36.687	18.783
Campestre (MG)	98.191	50.521	36.172	27.273
Rio Bananal (ES)	120.560	44.525	19.753	4.465
São Mateus (ES)	86.473	39.454	22.884	12.462
Manhuaçu (MG)	98.305	37.354	12.583	12.583
Nova Venécia (ES)	78.332	32.905	14.971	6.087
Carmo do Rio Claro (MG)	64.316	32.192	15.031	-
Vila Valério (ES)	69.395	31.177	21.323	14.432
Santa Margarida (MG)	60.132	28.652	21.141	10.112
Lajinha (MG)	52.848	24.718	14.531	4.298
Afonso Cláudio (ES)	71.199	24.370	8.270	2.896
Pancas (ES)	66.878	23.263	11.961	4.503
Iúna (ES)	57.479	23.036	12.613	6.845
Simonésia (MG)	57.146	16.577	6.049	-
Castelo (ES)	56.175	14.425	1.387	-
Nova Resende (MG)	68.425	14.341	5.875	-

Fonte: elaborado pelo autor com base nos dados do Santos e Nogueira (2025) e projeção de área inclusiva para cenário inclusivo.

Nota: a seleção representa os 28 municípios no quantil 99,5, que juntos somam 0,5% da área total cultivada com café no Brasil.

No caso de Patrocínio, cuja estrutura produtiva combina estabelecimentos médios e grandes com presença relevante de propriedades familiares, o cenário restritivo de 200 hectares implicava forte compressão do potencial de redução de GEE. Em contraponto, no cenário mais inclusivo, que motiva a redução de GEE em propriedades a partir de 10 hectares, Patrocínio teria potencial para reduzir 191.971 tCO₂eq, que no cenário mais restritivo (≥ 200 hectares) seria de apenas 16.941 tCO₂eq. O ganho marginal de inclusão é expressivo porque grande parte da área cafeeira encontra-se abaixo do limiar mais restritivo, de modo que a política passa a capturar um contingente produtivo anteriormente excluído.

Municípios como Carmo do Rio Claro (MG), Nova Resende (MG) e Castelo (ES), onde a agricultura familiar é a espinha dorsal da economia local, teriam seu potencial de mitigação completamente zerado em um cenário restritivo do SBCE (200 hectares). No entanto, esses municípios apresentam um potencial expressivo no cenário de 10 hectares. Em Carmo do Rio Claro, por exemplo, uma política de rotulagem poderia mobilizar a mitigação de mais de 64 mil tCO₂eq. Esse resultado evidencia que, em municípios com predomínio de pequenas propriedades, a barreira de escala constitui variável determinante da efetividade climática.

Dinâmica semelhante observa-se em Três Pontas. A área elegível amplia-se de 6.503 hectares (≥ 200 ha) para 18.952 hectares (≥ 10 ha), enquanto a mitigação estimada cresce de 49.293 para 143.656 tCO₂eq. A inclusão das propriedades entre 10 e 50 hectares responde por parcela expressiva desse incremento, indicando que grande parte do potencial municipal está distribuída em estabelecimentos de médio porte também.

Nos municípios com predominância de pequenas propriedades, o efeito distributivo é ainda mais pronunciado. Em Manhuaçu, a área elegível salta de 1.660 hectares (≥ 200 ha) para 12.969 hectares (≥ 10 ha), elevando a mitigação potencial de 12.583 para 98.305 tCO₂eq, crescimento superior a sete vezes. Em Rio Bananal, a expansão é ainda mais acentuada: a área passa de apenas 589 hectares no cenário ≥ 200 ha para 15.905 hectares no cenário ≥ 10 ha, enquanto a redução de GEE cresce de 4.465 para 120.560 tCO₂eq. Nesses casos, a quase totalidade do potencial ambiental municipal encontra-se abaixo do limiar de 200 hectares, evidenciando restrição de mitigação das emissões em decorrência critério de elegibilidade.

Assim, a combinação entre mercado regulado e rotulagem ambiental amplia simultaneamente a base produtiva elegível, o volume agregado de mitigação e a capilaridade territorial da política climática na cafeicultura brasileira. Dessa forma, há potencial para aumentar o volume total de mitigação e também para distribuir de forma mais equitativa, gerando benefícios econômicos e ambientais em regiões que seriam ignoradas por uma

política de mercado com altos custos de transação. Isso reforça o argumento de que a promoção da redução de custos de certificação configura um mecanismo institucional capaz de reduzir ineficiências alocativas decorrentes de custos fixos elevados e mitigar distorções distributivas territoriais.

10.2.3 Implicações e Recomendação de Política

Os resultados convergem para uma conclusão clara: o desenho da política climática para a agricultura brasileira não deve ser uma escolha entre o mercado regulado (SBCE) e os instrumentos voluntários (rotulagem), mas sim uma estratégia de integração inteligente entre ambos. A integração recomendada entre o mercado regulado (SBCE) e instrumentos voluntários (rotulagem) está em consonância com esforços globais. A FAO (2023) defende a Contabilidade do Custo Real (TCA) para revelar custos ocultos na agricultura, que afetam desproporcionalmente os pequenos produtores.

O Banco Mundial (2025) documenta a expansão de ETSs como o SBCE, cobrindo 28% das emissões globais, mas também aponta para a evolução e os desafios dos mercados de crédito de carbono. Os resultados deste trabalho indicam que o SBCE, por si só, é um instrumento insuficiente para a realidade da cafeicultura nacional, pois seus custos de transação o tornam estruturalmente excludente para 78% dos produtores. Deixar a política climática depender apenas dele poderá resultar em baixa eficácia ambiental e aprofundamento das desigualdades socioeconômicas. Assim, uma estratégia dupla, combinando um SBCE acessível com uma rotulagem voluntária crível, alinha o Brasil às tendências globais e à necessidade de incluir os diversos atores e custos reais da agricultura nacional numa política climática eficaz e justa.

A análise do cenário de 10 hectares, no entanto, é sugestiva quanto o caminho a seguir. Ele demonstra que o maior potencial de mitigação reside justamente no segmento da agricultura familiar em propriedades menores, que pode ser mobilizado por meio da redução de custos de certificação.

Com relação à rotulagem como instrumento voluntário, é preciso mencionar o dilema da "erosão do prêmio" e do "*mainstreaming*". O trabalho de Giovannucci e Ponte (2005) alerta que, à medida que a oferta de café certificado aumenta e a prática se torna mais comum, o diferencial de preço em relação ao café convencional tende a diminuir – processo conhecido como *mainstreaming*. Esse fenômeno também é observado por Silva e Nonnenberg (2023), que destacam a redução do prêmio com a popularização da certificação, embora não empreguem o termo. Isso implica que os prêmios observados hoje não são garantidos

perpetuamente, exigindo dos produtores certificados um esforço contínuo de inovação e diferenciação para manter sua vantagem competitiva.

Portanto, recomenda-se a implementação de uma política pública ativa que promova tanto a rotulagem de "café carbono neutro" e outros selos de sustentabilidade quanto a redução de custos de MRV para geração de créditos de carbono. Tal política deveria incluir:

1. Apoio à Certificação Coletiva: Fomentar e subsidiar a estruturação de cooperativas e associações para que possam gerir processos de certificação em grupo, diluindo os custos fixos e prestando assistência técnica aos pequenos produtores.
2. Simplificação e Credibilidade: Investir em pesquisa para desenvolver protocolos de Mensuração, Relato e Verificação (MRV) de baixo custo, que mantenham a credibilidade internacional sem onerar desproporcionalmente os produtores.
3. Campanhas de Valorização: Desenvolver campanhas de marketing e conscientização, tanto no mercado interno quanto no externo, para que os consumidores reconheçam o valor agregado do café de baixa emissão, garantindo o prêmio de preço que viabiliza o sistema.

Ao combinar o instrumento econômico do SBCE para os grandes propriedades com o instrumento voluntário criado pela rotulagem para os pequenos e médios produtores, o Brasil pode construir uma política climática robusta, eficaz e alinhada à sua realidade agrícola, transformando um desafio ambiental em uma oportunidade de desenvolvimento rural sustentável.

10.3 Considerações Finais do Capítulo

A análise realizada neste estudo demonstra que, embora a cafeicultura brasileira detenha um potencial de mitigação de GEE superior a 13 milhões de toneladas de CO₂ equivalente, mais de metade desse potencial corre o risco de não ser realizado se os altos custos de transação, inerentes aos processos de certificação, excluam os produtores de pequena e média escala. A implementação da política ambiental para redução de GEE sem mecanismos inclusivos pode ser ambientalmente ineficaz, ao deixar de mobilizar a maior parte do potencial de abatimento, e socialmente excludente, ao concentrar os benefícios em um número restrito de grandes propriedades.

Adicionalmente, deve-se reconhecer que os cenários apresentados quantificam o potencial máximo de mitigação, partindo da premissa de que todos os produtores elegíveis em cada faixa de área adeririam ao programa. Na prática, a adoção de práticas de baixo carbono e a participação em mercados ambientais são processos complexos, influenciados por uma

gama de fatores que transcendem a simples viabilidade econômica, como o acesso à assistência técnica, a disponibilidade de crédito, a percepção de risco e o nível de capital social.

Portanto, é provável que a taxa de adoção real seja inferior a 100%, o que significa que a restrição imposta pelo limite de viabilidade pode ser, na realidade, ainda maior do que o estimado. Esta limitação não enfraquece, mas sim fortalece a principal conclusão do estudo: a urgência de políticas públicas ativas e bem desenhadas é ainda mais crítica para superar não apenas as barreiras econômicas, mas também as barreiras de informação e capacidade que limitam a participação efetiva dos agricultores.

Diante desse diagnóstico, a implementação de uma política pública ativa que promova tanto a rotulagem de "café carbono neutro" e outros selos de sustentabilidade quanto a redução de custos de MRV para geração de créditos de carbono é crucial para alinhar a eficiência econômica com a efetividade ambiental e a equidade social. Com base na análise e na literatura especializada, emergem recomendações de política pública claras e acionáveis: a) É recomendável que a regulação do SBCE incentive e facilite a criação de "projetos agregados" ou "programáticos". b) O poder público deve direcionar recursos de pesquisa e desenvolvimento, por meio de instituições de pesquisa como a Embrapa e universidades, para a criação de tecnologias que reduzam drasticamente os custos de Monitoramento, Relato e Verificação (MRV). c) Desenvolver campanhas de marketing e conscientização, tanto no mercado interno quanto no externo, para que os consumidores reconheçam o valor agregado do café de baixa emissão.

A transição para uma agricultura de baixo carbono é uma oportunidade para o Brasil conciliar seus objetivos ambientais, econômicos e sociais. Contudo, para que essa oportunidade se concretize, os instrumentos de política devem ser desenhados para a realidade do campo brasileiro, considerando as diferenças regionais e adequadas a cada cultura agrícola do nosso País. Uma política ambiental inclusiva e efetiva não surgirá espontaneamente. Ela precisa ser construída com uma arquitetura institucional inteligente, que reconheça e supere as barreiras que hoje impedem a participação da maioria.

Para futuras pesquisas, sugere-se expandir a avaliação da adoção de boas práticas agrícolas de redução de GEE para outras culturas do agro brasileiro, como a pecuária e a produção de grãos. Adicionalmente, é preciso aprofundar o estudo sobre o potencial de adoção dessas práticas também por instrumentos voluntários de política ambiental, com destaque para a comercialização de produtos com selo "carbono neutro".

11 CONCLUSÕES GERAIS, LIMITAÇÕES E AGENDA DE PESQUISA

A presente tese investigou a viabilidade, a efetividade e os impactos distributivos de instrumentos de mitigação de gases de efeito estufa (GEE) na cafeicultura brasileira. Fica evidenciado que o setor agrícola detém um potencial substancial para funcionar como um dreno de carbono, configurando-se como peça-chave para o atingimento das metas climáticas. No entanto, a efetivação desse potencial e sua conversão em benefícios econômicos esbarram em barreiras microeconômicas e institucionais severas.

A questão central que orientou a pesquisa (“Em que medida os instrumentos regulados e voluntários de mitigação de GEE são economicamente viáveis, ambientalmente capazes de contribuir para metas de mitigação e com impactos distributivos regionalmente diferenciados quando aplicados à estrutura produtiva da cafeicultura brasileira?”) foi examinada por meio de oito estudos inter-relacionados, cujos resultados permitem extrair conclusões robustas e articuladas.

Sobre o ambiente tecnológico da mitigação agrícola, o Capítulo 3 evidenciou que o ambiente tecnológico destinado à redução de GEE no setor agropecuário está em consolidação e se intensificou significativamente na última década. O crescimento expressivo no número de patentes (1.627 publicações em 2022, um aumento de 347% em relação a 2021) e de publicações científicas (1.121 em 2025, quase o dobro em relação a 2021) demonstra que o tema deixou de ocupar posição marginal na agenda tecnológica global. Esses resultados são compatíveis com a teoria da inovação induzida: alterações no ambiente regulatório e nas expectativas de mercado estão redirecionando o esforço inventivo para soluções de baixo carbono. A existência desse estoque crescente de tecnologias e conhecimentos constitui condição necessária, ainda que não suficiente, para viabilizar a transição produtiva na cafeicultura.

Quanto ao mercado regulado de carbono (Parte 1), a análise integrada dos Capítulos 4, 5 e 6 permite afirmar que, embora exista potencial técnico relevante para a geração de créditos de carbono na cafeicultura, sua materialização enfrenta barreiras estruturais significativas. O Capítulo 4 demonstrou, por meio de análise prospectiva de cenários, que a área mínima de lavoura economicamente viável para comercialização de créditos varia entre 50 hectares (cenário mais favorável) e 320 hectares (cenário menos favorável). Confrontados com a estrutura fundiária da cafeicultura brasileira, esses limiares implicam que, mesmo no cenário mais otimista, apenas 12% dos estabelecimentos produtores, responsáveis por 52% da área colhida, seriam elegíveis para participar do mercado. No cenário menos favorável, a participação se restringe a menos de 2% dos estabelecimentos.

O Capítulo 5 aprofundou a análise distributiva desses resultados, revelando o caráter ambíguo dos efeitos regionais do mercado de carbono. Por um lado, a eventual inserção da cafeicultura no SBCE tende a reduzir a disparidade entre municípios rurais e urbanos, uma vez que o PIB *per capita* médio dos municípios cafeeiros corresponde a apenas 63% do observado nas concentrações urbanas. Por outro lado, dentro do próprio universo cafeeiro, a política pode acentuar desigualdades pré-existentes: a análise demonstrou que municípios com maior predominância de grandes propriedades (acima de 100 hectares) apresentam PIB *per capita* sistematicamente mais elevado, e a restrição da elegibilidade a esses estratos tenderia a concentrar ainda mais os benefícios do mercado.

O Capítulo 6 formalizou microeconomicamente a decisão do produtor, tratando preço e custos fixos como variáveis estocásticas. O modelo demonstrou que a combinação de custos fixos elevados com a estrutura de custos marginais lineares conduz a uma solução de canto, na qual o produtor dedica toda a área disponível apenas se a receita líquida marginal esperada for positiva, condição que, por si só, não garante viabilidade. A condição de viabilidade exige que a escala do produtor seja suficiente para que o lucro operacional esperado cubra os custos fixos, formalizando o conceito de "barreira de escala". A extensão não linear do modelo revelou que, mesmo em contextos de rendimentos decrescentes e custos marginais crescentes, a barreira de escala persiste, embora possa emergir uma solução interior (alocação parcial da área). Em todos os cenários simulados, a magnitude dos custos fixos de certificação, estimados entre R\$ 31 mil e R\$ 125 mil anuais, constitui o principal obstáculo à participação de pequenos e médios produtores.

Em relação aos instrumentos voluntários (Parte 2), os resultados dos Capítulos 7, 8 e 9 indicam que a rotulagem ambiental constitui estratégia economicamente viável de agregação de valor, mas com dinâmica própria que requer atenção. O Capítulo 7, utilizando dados municipais dos Censos Agropecuários de 2006 e 2017, estimou um prêmio médio de 14,7% no faturamento associado à presença de cafeicultura orgânica. Mais importante, a análise de Diferenças em Diferenças revelou evidência robusta de erosão do prêmio ao longo da década: o crescimento do faturamento nos municípios com produção orgânica foi, em média, 7,7% inferior ao observado nos municípios convencionais, sugerindo que o *mainstreaming* da certificação tende a comprimir diferenciais de preço.

O Capítulo 8 aprofundou a estimação do prêmio utilizando microdados de financiamento rural (2014-2023) e métodos de inferência causal (*Propensity Score Matching* e dados em painel). A estimativa mais conservadora, obtida por meio de modelo de painel com efeitos fixos de ano, indicou um prêmio de 14% no faturamento esperado por

tonelada para produtores que adotam sistemas orgânicos e/ou agroecológicos. A diferença substancial entre esta estimativa e aquela obtida por Mínimos Quadrados Ordinários (43,9%) evidencia a magnitude do viés de autosseleção e reforça a importância de estratégias de identificação robustas em estudos observacionais.

O Capítulo 9 desenvolveu o modelo microeconômico de decisão específico para a rotulagem "carbono neutro". A partir da equação fundamental de quantidade mínima viável, $q_{\min} = E[C_f]/(E[P_{add}] - cv)$, e considerando os parâmetros de mercado estimados nos capítulos anteriores, simulou-se que, sob um prêmio de 14% (cenário intermediário), a barreira de escala situa-se em aproximadamente 7,4 hectares, patamar acessível a parte dos cafeicultores da agricultura familiar. Em cenário conservador (prêmio de 5%), a área mínima eleva-se para 27,3 hectares; em cenário otimista (30%), reduz-se para 3,2 hectares. A extensão não linear do modelo demonstrou que, sob condições de deseconomias de escala na segregação logística e prêmio decrescente, a solução ótima pode ser interior, com o produtor optando por certificar apenas parte da produção.

Sobre o potencial agregado de mitigação (Capítulo 10), a integração dos resultados anteriores permitiu quantificar o hiato entre o potencial técnico total e o potencial efetivamente realizável sob diferentes desenhos de política. O cenário de rotulagem inclusiva (10 hectares) indicou que a cafeicultura brasileira tem potencial para mitigar aproximadamente 13 milhões de toneladas de CO₂ equivalente. No entanto, se a política climática se restringir ao mercado regulado de carbono (SBCE), mesmo em sua configuração mais otimista (50 hectares), o potencial realizável cai para 8,3 milhões de toneladas; em cenário restritivo (200 hectares), reduz-se a 4,3 milhões de toneladas. Isso significa que uma política focada exclusivamente no mercado regulado deixaria de realizar entre 36% e 67% do potencial total de mitigação do setor. A análise municipal revelou ainda que esse hiato se distribui de forma heterogênea no território: municípios com predomínio de pequenas propriedades, que seriam completamente excluídos em cenários restritivos, concentram parcela expressiva do potencial não realizado.

11.1 CONTRIBUIÇÕES DA TESE

A principal contribuição desta tese reside na integração original entre economia ambiental, economia agrícola e economia da firma, aplicada a um setor específico de elevada relevância socioeconômica. Essa integração permitiu avançar para além das análises setoriais ou de instrumentos isolados, oferecendo uma visão sistêmica da transição para sistemas produtivos de baixa emissão.

Do ponto de vista teórico, a tese contribui ao formalizar, em modelos microeconômicos passíveis de parametrização empírica, os mecanismos pelos quais os custos de transação, particularmente aqueles associados à certificação e ao MRV, condicionam a viabilidade e os efeitos distributivos de instrumentos de política ambiental. A extensão não linear dos modelos, incorporando rendimentos decrescentes e custos marginais crescentes, amplia o realismo da análise e permite capturar fenômenos como a alocação parcial de área/quantidade, mais condizente com o comportamento observado em mercados de produtos diferenciados.

No plano empírico, a tese oferece contribuições em múltiplas frentes. A construção e o tratamento de bases de dados originalmente não articuladas — microdados de financiamento rural (BACEN), censos agropecuários (IBGE), registros de patentes e marcas (OMPI/Google Patents) e cotações de carbono (ICE) — permitiram estimativas inéditas sobre prêmios de preço, barreiras de escala e potencial de mitigação. A aplicação de métodos quasi-experimentais (PSM, Diferenças em Diferenças) e de modelagem prospectiva por cenários conferiu robustez às inferências causais e permitiu qualificar o grau de incerteza associado às projeções.

Do ponto de vista de política pública, a tese oferece subsídios concretos para o desenho do Sistema Brasileiro de Comércio de Emissões (SBCE) e para programas de incentivo à agricultura de baixo carbono. A demonstração de que os custos de transação podem inviabilizar a participação de 88% dos cafeicultores (Capítulo 4) e de que a exclusão tende a se concentrar em municípios de menor PIB *per capita* (Capítulo 5) fundamenta a recomendação de que a regulamentação do SBCE contemple mecanismos de redução desses custos, como a certificação coletiva via cooperativas e o desenvolvimento de metodologias simplificadas de MRV. A estimativa de que a rotulagem "carbono neutro" poderia mobilizar até 13 milhões de toneladas de mitigação (Capítulo 10) evidencia o potencial de instrumentos voluntários como complemento estratégico ao mercado regulado.

11.2 LIMITAÇÕES DO ESTUDO

Os resultados e conclusões apresentados devem ser interpretados à luz das limitações inerentes a esta pesquisa, as quais, reconhecidas, abrem oportunidades para investigações futuras.

Quanto aos dados e à abrangência empírica, a análise do mercado regulado baseou-se em projeções e cenários, dada a inexistência, à época da pesquisa, de dados efetivos do SBCE (Lei 15.042/2024, ainda não regulamentada). As estimativas de custos de certificação e preços

de carbono fundamentaram-se em dados de mercados voluntários e do mercado regulado europeu (EU ETS), cuja dinâmica pode diferir daquela que se consolidará no Brasil. A análise dos instrumentos voluntários, por sua vez, utilizou como *proxy* para a rotulagem "carbono neutro" os sistemas orgânico e agroecológico, em função da escassez de dados históricos específicos sobre neutralidade de carbono. Embora teoricamente justificada pela natureza comum de "bens de crença", essa aproximação requer cautela na extrapolação direta dos resultados.

A base de dados de financiamento rural (BACEN), embora abrangente (mais de 660 mil observações), apresenta limitações importantes. A variável de resultado (receita esperada) é *ex-ante* e baseia-se em declarações do produtor no momento da contratação do crédito, não capturando necessariamente os preços efetivamente realizados. A impossibilidade de incluir controles geográficos (efeitos fixos municipais) e variáveis como filiação a cooperativas (potenciais fontes de viés de variável omitida) restringe a capacidade de isolar completamente o efeito da certificação de outros fatores institucionais e de localização.

A análise do ambiente tecnológico (Capítulo 3), de natureza descritivo-exploratória, não permite estabelecer relações causais entre política ambiental e esforço inovativo. Os indicadores de patentes, marcas e publicações capturam apenas parte do fenômeno da inovação, deixando de lado tecnologias organizacionais e de processo não patenteadas, que são particularmente relevantes no setor agrícola.

Quanto aos modelos e métodos, as formulações microeconômicas adotadas nos Capítulos 6 e 9, embora rigorosas, baseiam-se em simplificações que representam limitações importantes. Os modelos são essencialmente estáticos, tratando a decisão de participação como evento único, quando projetos de carbono e de certificação são investimentos de longo prazo sujeitos a irreversibilidades e à opção de "esperar para ver". A hipótese de neutralidade ao risco, adotada nas formulações principais, subestima a barreira de entrada para produtores avessos ao risco, categoria que provavelmente inclui a maioria dos agricultores familiares. A calibração dos parâmetros de não linearidade (α e β) no Capítulo 6 baseou-se em valores ilustrativos e plausíveis, não em estimações econométricas derivadas de dados primários, o que limita a precisão quantitativa das simulações.

Por último, a análise dos efeitos regionais (Capítulo 5) adotou o município como unidade de análise, opção decorrente da disponibilidade de dados, mas que pode mascarar heterogeneidades intra-municipais relevantes. A estratificação por faixas de predominância de grandes propriedades, embora informativa, não captura a complexidade das relações entre estrutura fundiária, dinâmicas institucionais locais e desenvolvimento econômico.

11.3 AGENDA DE PESQUISA

As lacunas identificadas e as premissas testadas nesta tese abrem um espectro de oportunidades férteis para investigações futuras, conforme listado abaixo.

- Avaliação pós-implementação do SBCE: Com o amadurecimento regulatório do mercado brasileiro, torna-se imperativo recalibrar os modelos de otimização e a área mínima viável utilizando dados empíricos efetivos dos custos de MRV e do preço interno de negociação do carbono.
- Análise líquida de lucratividade: Recomenda-se a condução de estudos que cruzem os ganhos de faturamento com as estruturas granulares de custos operacionais (mão de obra, bioinsumos, etc.). Estimar o impacto líquido da certificação ambiental sobre o lucro real fornecerá o quadro definitivo para a tomada de decisão produtiva.
- Dinâmica temporal e aversão ao risco: A evolução do modelo econômico para uma modelagem dinâmica calcada na teoria de opções reais (avaliando o valor de "esperar para investir") e a incorporação formal da aversão ao risco na função de utilidade refinarão consideravelmente a previsão sobre as taxas de adesão tecnológica.
- Aprofundamento sobre cooperativismo e redução do CFE: Mensurar quantitativamente o efeito do arranjo cooperativo como redutor específico de custos de transação constitui um passo fundamental para orientar o desenho de políticas inclusivas baseadas em projetos agregados.
- Expansão setorial e regional: Sugere-se que o arcabouço analítico aqui estabelecido seja replicado para outras cadeias estratégicas da agropecuária brasileira, como a produção de grãos, fruticultura e cana-de-açúcar, permitindo mapear assimetrias e potencialidades de mitigação em âmbito nacional.
- Comportamento do consumidor: O aprofundamento da análise do comportamento do consumidor, tais como a disposição a pagar por atributos de neutralidade de carbono, canais de comercialização preferenciais, impacto de campanhas de conscientização, poderia qualificar as projeções sobre sustentabilidade dos prêmios de preço e orientar estratégias de posicionamento de mercado para os cafés do Brasil.

11.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Esta tese demonstrou que a transição para uma cafeicultura de baixa emissão de carbono no Brasil é, simultaneamente, uma oportunidade e um desafio. Oportunidade porque

o setor detém potencial técnico expressivo, a inovação tecnológica avança em ritmo acelerado e os consumidores sinalizam disposição a remunerar atributos de sustentabilidade. Desafio porque os instrumentos de política disponíveis, principalmente os objetos deste estudo (mercado regulado e certificação voluntária), se mal planejados, podem reproduzir ou mesmo aprofundar desigualdades estruturais, concentrando benefícios em grandes propriedades e deixando de realizar parcela substancial do potencial de mitigação.

A arquitetura institucional importa. Os resultados convergem para a conclusão de que a eficácia ambiental, a eficiência econômica e a equidade social não são objetivos intrinsecamente conflitantes em políticas climáticas, mas podem ser perseguidos de forma complementar por meio de desenhos institucionais inteligentes. A redução dos custos de transação, seja por meio da certificação coletiva, do desenvolvimento de metodologias mais acessíveis de MRV ou do fortalecimento de políticas habilitadoras como o Plano ABC+, emerge como variável crítica para conciliar esses objetivos.

A cafeicultura brasileira, com sua expressiva participação de agricultores familiares, sua capilaridade territorial e sua inserção nos mercados internacional e doméstico, constitui laboratório privilegiado para testar e refinar esses arranjos institucionais. As lições extraídas deste estudo, embora centradas no café, oferecem subsídios para o debate mais amplo sobre a transição para uma economia de baixo carbono no meio rural brasileiro. A construção dessa transição, contudo, não é automática nem isenta de escolhas distributivas. Ela exige política pública ativa, monitoramento contínuo e abertura para aprendizado e adaptação. Esta tese oferece subsídios para o aperfeiçoamento das políticas de transição climática no meio rural brasileiro, indicando que é possível conciliar eficiência econômica, eficácia ambiental e equidade social por meio de desenhos institucionais adequados.

12 REFERÊNCIAS

- ABIC. Associação Brasileira da Indústria de Café. **Pesquisa - perfil do consumidor de café que busca qualidade**. Coffee Hub: São Paulo, 2021. Disponível em: <https://abic.com.br/>. Acesso em: 23 setembro 2025.
- AKERLOF, George A. The Market for "Lemons": Quality Uncertainty and the Market Mechanism. **The Quarterly Journal of Economics**, v. 84, n. 3, p. 488-500, 1970.
- AMARAL, A. C.; PINTO, A.E.S. Final da COP26 deslança acordo climático, mas fica aquém do desafio. **Folha de S. Paulo**. São Paulo, 13 novembro 2021. Disponível em: <https://www1.folha.uol.com.br/ambiente/2021/11/cop26-conclui-livro-de-regras-do-acordo-de-paris-mas-frustra-em-financiamento.shtml>. Acesso em: 29 setembro 2023.
- ANGRIST, Joshua D.; PISCHKE, Jörn-Steffen. **Mostly Harmless Econometrics: An Empiricist's Companion**. Princeton: Princeton University Press, 2009.
- ANIS, C. F.; CARDUCCI, C. E.; RUVIARO, C. F. Mercado de carbono agrícola: realidade ou desafio? **Multitemas**, [S. l.], v. 27, n. 65, p. 163–188, 2022. DOI: 10.20435/multi.v27i65.3396. Disponível em: <https://multitemas.ucdb.br/multitemas/article/view/3396>. Acesso em: 15 setembro 2023.
- ARAÚJO, M. P. N. *et al.* Impactos socioambientais da certificação fairtrade nas cooperativas de produtores familiares de café e manga no Brasil. **Confin**, 2016. Disponível em: <https://journals.openedition.org/confin/11401>. Acesso em: 8 out. 2025.
- ARELLANO, C.; HERNÁNDEZ, C. Carbon footprint and carbon storing capacity of arabica coffee plantations of Central America: A review. **Coffee Science** - ISSN 1984-3909, [S. l.], v. 18, p. e182072, 2023. DOI: 10.25186/v18i.2072. Disponível em: <http://www.coffeescience.ufla.br/index.php/Coffeescience/article/view/2072>. Acesso em: 16 setembro 2023.
- ARROW, Kenneth J. **Essays in the theory of risk-bearing**. Chicago: Markham Publishing Company, 1971.
- ARRUDA, N. M.; MAIA, A. G.; ALVES, L. C.. Desigualdade no acesso à saúde entre as áreas urbanas e rurais do Brasil: uma decomposição de fatores entre 1998 a 2008. **Cadernos de Saúde Pública**, v. 34, n. 6, p. e00213816, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/0102-311X00213816>. Acesso em: 22 julho 2023.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 14064-1**: Gases de efeito estufa - Parte 1: Especificação e orientação a organizações para quantificação e relato de emissões e remoções de gases de efeito estufa. Rio de Janeiro: ABNT, 2007.
- BACIC, M. J.; DOMINGUES, R.; PEREIRA, S. P. Hábitos e preferências dos consumidores de café no Brasil. Apresentação de Resultados da Pesquisa. Disponível em:

http://consorciopesquisacafe.com.br/arquivos/consorcio/consumo/Pesquisa_Habitos_Preferencias_Consumidores_Cafe_Brasil.pdf. Acesso em: 25 setembro 2025.

BANCO CENTRAL DO BRASIL. **Tabelas e Microdados do Crédito Rural e do Proagro**. Disponível em: <https://www.bcb.gov.br/estabilidadefinanceira/tabelas-credito-rural-proagro>. Acesso em: 19 fev. 2025.

BARANZINI, A. *et al.* Carbon pricing in climate policy: seven reasons, complementary instruments, and political economy considerations. **Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change**, v. 8, n. 4, p. 1–17, 2017.

BAUMOL, William J.; OATES, Wallace E. **The theory of environmental policy**. 2. ed. Cambridge: Cambridge University Press, 1988.

BIELUCZYK, Wanderlei *et al.* Greenhouse gas fluxes in brazilian climate-smart agricultural and livestock systems: A systematic and critical overview. **Journal of cleaner production**, v. 464, p. 142782, 2024.

BRASIL. Lei nº 10.831, de 23 de dezembro de 2003. Dispõe sobre a agricultura orgânica e dá outras providências. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, ed. 251, seção 1, p. 8, 24 dez. 2003. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/2003/110.831.htm. Acesso em: 28 setembro 2025.

BRASIL. **Decreto nº 5.445**, de 12 de maio de 2005. Promulga o Protocolo de Quioto à Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima, aberto a assinaturas na cidade de Quioto, Japão, em 11 de dezembro de 1997, por ocasião da Terceira Conferência das Partes da Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2004-2006/2005/decreto/d5445.htm. Acesso em: 29 setembro 2023.

BRASIL. Decreto nº 7.794, de 20 de agosto de 2012. Institui a Política Nacional de Agroecologia e Produção Orgânica. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, ed. 162, seção 1, p. 1, 21 ago. 2012. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2011-2014/2012/decreto/d7794.htm. Acesso em: 28 setembro 2025.

BRASIL. **Decreto nº 10.606**, de 22 de janeiro de 2021. Institui o Sistema Integrado de Informações do Plano Setorial para Consolidação de uma Economia de Baixa Emissão de Carbono na Agricultura e o Comitê Técnico de Acompanhamento do Plano Setorial para Consolidação de uma Economia de Baixa Emissão de Carbono na Agricultura. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2019-2022/2021/decreto/D10606.htm. Acesso em: 3 maio 2024.

BRASIL. **Decreto nº 11.550**, de 5 de junho de 2023. Dispõe sobre o Comitê Interministerial sobre Mudança do Clima. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2023-2026/2023/Decreto/D11550.htm. Acesso em: 28 junho 2024.

BRASIL. **Lei nº 15.042**, de 11 de dezembro de 2024. Institui o Sistema Brasileiro de Comércio de Emissões de Gases de Efeito Estufa (SBCE) e dá outras providências. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2023-2026/2024/lei/L15042.htm. Acesso em: 13 janeiro 2026.

BRASIL. **Brazil's NDC: National determination to contribute and transform**. Brasília: Governo Federal, 2024. Disponível em: <https://www.gov.br/mma/pt-br/assuntos/mudanca-do-clima/NDC>. Acesso em: 13 fev. 2026.

BRASIL. Ministério da Agricultura e Pecuária. **Valor Bruto da Produção Agropecuária (VBP)** Janeiro/2026. Brasília, DF: MAPA, 2026. Disponível em: <https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/politica-agricola/valor-bruto-da-producao-agropecuaria-vbp>. Acesso em: 15 jan. 2026.

BSI. PAS 2060:2014: Specification for the demonstration of carbon neutrality. London: British Standards Institution, 2014.

BUSSAB, W. O.; MORETTIN, P. A. **Estatística básica**. 9. ed. São Paulo: Saraiva Educação, 2017.

CALIENDO, Marco; KOPEINIG, Sabine. Some practical guidance for the implementation of propensity score matching. **Journal of Economic Surveys**, Oxford, v. 22, n. 1, p. 31–72, 2008. DOI: 10.1111/j.1467-6419.2007.00527.x. Disponível em: <https://ideas.repec.org/a/bla/jecsur/v22y2008i1p31-72.html>. Acesso em: 20 out. 2025.

CAMERON, A. Colin; GELBACH, Jonah B.; MILLER, Douglas L. Bootstrap-based improvements for inference with clustered errors. **The Review of Economics and Statistics**, v. 90, n. 3, p. 414–427, 2008.

CAMERON, A. Colin; MILLER, Douglas L. A practitioner's guide to cluster-robust inference. **Journal of Human Resources**, v. 50, n. 2, p. 317–372, 2015.

CASWELL, Julie A.; MOJDUSZKA, Eliza M. Using Informational Labeling to Influence the Market for Quality in Food Products. **American Journal of Agricultural Economics**, v. 78, n. 5, p. 1248-1253, 1996.

CACHO, O. J.; LIPPER, L.; MOSS, J. Transaction costs of carbon offset projects: A comparative study. **Ecological Economics**, 88, p. 232-243, 2013/04/01/ 2013.

CASTRO, Joaquim Camilo de. **A influência dos sistemas de gestão ambiental baseados na ISO 14001 no valor de mercado das empresas brasileiras com ações negociadas na Bovespa**. 2006. 79 f. Dissertação (Mestrado em Economia). Universidade de Brasília, Brasília, 2006.

CECAFÉ; IMAFLORA. **Estimativa das emissões e remoções de gases de efeito estufa do café brasileiro - A adicionalidade de carbono devido às boas práticas em fazendas de Minas Gerais**, Brasil. Projeto Cecafé (Relatório). Abril 2022.

CECAFÉ. **Relatório mensal – janeiro 2021**. São Paulo, SP: Conselho dos Exportadores de Café do Brasil. Disponível em: <https://www.cecafe.com.br/publicacoes/relatorio-de-exportacoes/#>. Acesso em: 29 setembro 2023.

CEPEA. **Indicador do Café Arábica CEPEA/ESALQ**. Centro de Estudos Avançados em Economia Aplicada, 2025. Disponível em: <https://www.cepea.esalq.usp.br/br/indicador/cafe.aspx>. Acesso em: 20 jan. 2025.

CERRI, Carlos Clemente *et al.* **Estoques de carbono e nitrogênio no solo devido a mudança do uso da terra em áreas de cultivo de café em Minas Gerais**. 2017. Disponível em: <http://www.sbicafe.ufv.br/handle/123456789/8258>. Acesso em: 15 setembro 2023.

CHAMBERS, R. G. **Applied Production Analysis: A Dual Approach**. Cambridge University Press, 1988.

COASE, R. H. The Nature of the Firm. **Economica**, 4, n. 16, p. 386-405, 1937.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO (Conab). **1º Levantamento de Café – Safra 2026**. Publicado em 05 fev. 2026. Disponível em: <https://www.gov.br/conab/pt-br/atuacao/informacoes-agropecuarias/safras/safra-de-cafe/1o-levantamento-de-cafe-safra-2026/1o-levantamento-de-cafe-safra-2026>. Acesso em: 15 fev. 2026.

CONSÓRCIO PESQUISA CAFÉ. **Portfólio de tecnologias e publicações do Consórcio Pesquisa Café**. Disponível em: <http://www.consorciopesquisacafe.com.br/index.php/publicacoes/637>. Acesso em: 29 setembro 2023.

DIXIT, Avinash K.; PINDYCK, Robert S. **Investment under uncertainty**. Princeton: Princeton University Press, 1994.

DONG, Hanmin *et al.* COVID-19, recovery policies and the resilience of EU ETS. **Economic Change and Restructuring**, v. 56, n. 5, p. 2965-2991, 2023. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10644-021-09372-2>. Acesso em: 12 fev. 2026.

DUARTE, Paula Andrea Alves; FERREIRA, João Batista. Benefícios da certificação do café para os produtores e consumidores. **Rumos**, Patrocínio, n. 1, 2019. Disponível em: <https://www.unicerp.edu.br/revistas/rumos/20191/artigo2.pdf>. Acesso em: 25 out. 2025.

EBC. European Biochar Certificate – **Prices 2022**. Carbon Standards International AG, 2022. Disponível em: www.carbon-standards.com. Acesso em: 3 agosto 2022.

EMBRAPA. **Consórcio Pesquisa Café executa projetos de pesquisa, desenvolvimento e inovação em atendimento às demandas do setor cafeeiro**. Embrapa Café, 2020. Disponível em: https://www.embrapa.br/cafe/busca-de-noticias/-/noticia/49300786/consorcio-pesquisa-cafe-executa-projetos-de-pesquisa-desenvolvimento-e-inovacao-em-atendimento-as-demandas-do-setor-cafeeiro?p_auth=6FPG1GJJ. Acesso em: 29 setembro 2023.

EMBRAPA. **Balanco Social 2021**. Brasília, DF: Embrapa, Secretaria de Desenvolvimento Institucional, Secretaria Geral, 2022. Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/1142336/balanco-social-2021>. Acesso em: 29 setembro 2023.

EMBRAPA. **Relatório de Avaliação dos Impactos de soluções tecnológicas geradas pela Embrapa. Sistema de produção de café com uso de braquiária nas entrelinhas**. Brasília, DF: Embrapa, 2022a. Disponível em: <https://bs.sede.embrapa.br/2021/relatorios/cafe-cafecombraquiaria.pdf>. Acesso em: 29 setembro 2023.

EMBRAPA. **Conselho diretor aprova onze desafios de inovação para Consórcio do Café em 2024**. Embrapa Café, 2023. Disponível em: https://www.embrapa.br/cafe/busca-de-noticias/-/noticia/85587192/conselho-diretor-aprova-onze-desafios-de-inovacao-para-consorcio-do-cafe-em-2024?p_auth=uLwPYwb9. Acesso em: 29 setembro 2023.

EUROPEAN COMMISSION. **Common agricultural policy**. Bruxelas, 2026. Página inicial. Disponível em: https://ec.europa.eu/info/food-farming-fisheries/key-policies/common-agricultural-policy_pt. Acesso em: 19 fev. 2026.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS (FAO). The State of Food and Agriculture 2023: Revealing the true cost of food to transform agrifood systems. Rome: **FAO**, 2023. Disponível em: <http://openknowledge.fao.org/items/1516eb79-8b43-400e-b3cb-130fd70853b0>. Acesso em: 21 outubro 2025.

FULLER, S.; GREBITUS, C.; SCHMITZ, J. Willingness to pay for sustainability labels on coffee: Evidence from non-hypothetical auctions in the United States. **Agricultural Economics**, v. 53, n. 1, p. 111–128, 2022. DOI: 10.1111/agec.12706.

FULLERTON, Don; METCALF, Gilbert E. Environmental controls, scarcity rents, and pre-existing distortions. **Journal of Public Economics**, v. 80, n. 2, p. 249–267, 2002.

GIOVANNUCCI, Daniele; PONTE, Stefano. Standards as a new form of social contract? Sustainability initiatives in the coffee industry. **Food Policy**, v. 30, n. 3, p. 284–301, 2005.

GODOY, S. G. M. DE .; SAES, M. S. M.. Cap-and-trade and project-based framework: how do carbon markets work for greenhouse emissions reduction? **Ambiente & Sociedade**, v. 18, n. 1, p. 135–154, jan. 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/1809-4422ASOC795V1812015en>. Acesso em: 19 julho 2023.

GOLD STANDARD. **Gold Standard for the Global Goals Fee Schedule**. Genebra, 2022. Disponível em: <https://globalgoals.goldstandard.org/fees/>. Acesso em: 3 agosto 2022.

GUERRA, A. F.; SANTOS, J. de F.; FERREIRA, L. T.; ROCHA, O. C. Cafés do Brasil: pesquisa, sustentabilidade e inovação. In: TELHADO, S. F. P. e; CAPDEVILLE, G. de (Ed.). **Tecnologias poupa-terra** 2021. Brasília, DF: Embrapa, 2021. p. 63-75. Disponível em: <http://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/222991/1/Cafe769s-do-Brasil.pdf>. Acesso em: 15 setembro 2023.

GUJARATI, D. N.; PORTER, D. C. **Econometria básica**. 5. ed. Porto Alegre: AMGH, 2011.

HAYAMI, Yujiro; RUTTAN, Vernon W. *Agricultural development: an international perspective*. Baltimore: Johns Hopkins University Press, 1985.

HICKS, John R. *The theory of wages*. 2. ed. London: Macmillan, 1963.

KOHLHEPP, Gerd. Disparidades regionais e planejamento regional no Brasil. *Revista del CESLA. International Latin American Studies Review*, v. 2, n. 13, p. 455-471, 2010. Disponível em: <https://bibliotekanauki.pl/articles/485978.pdf>. Acesso em: 22 julho 2023.

INPI. **Notas explicativas** - 11ª edição da Classificação de Nice, versão 2022. Rio de Janeiro, 2022. Disponível em: < <https://www.gov.br/inpi/pt-br/servicos/marcas/classificacao-marcas>>. Acesso em: 16 fevereiro 2024.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Censo Agropecuário 2006**: Brasil, Grandes Regiões e Unidades da Federação. Rio de Janeiro: IBGE, 2009. Disponível em: <https://sidra.ibge.gov.br/pesquisa/censo-agropecuario/censo-agropecuario-2006/segunda-apuracao>. Acesso em: 20 set. 2025.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Divisão regional do Brasil em regiões geográficas imediatas e regiões geográficas intermediárias: 2017**. Rio de Janeiro: IBGE, 2017. Disponível em: <https://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/livros/liv100600.pdf>. Acesso em: 2 jul. 2025.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Censo Agro 2017: resultados definitivos**. Rio de Janeiro, 2019. Disponível em: <https://sidra.ibge.gov.br/pesquisa/censo-agropecuario/censo-agropecuario-2017/resultados-definitivos>. Acesso em: 19 setembro 2025.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Produto Interno Bruto dos Municípios**. Rio de Janeiro, 2022. Disponível em: <https://sidra.ibge.gov.br/tabela/5938#notas-tabela>. Acesso em: 19 julho 2023.

IMBENS, Guido W.; RUBIN, Donald B. **Causal Inference for Statistics, Social, and Biomedical Sciences: An Introduction**. New York: Cambridge University Press, 2015.

IPCC. **Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change**. Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Editado por Shukla, P.R. *et al.* Cambridge: Cambridge University Press, 2022. Disponível em: <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg3/>. Acesso em: 21 junho 2025.

IPCC. **Sumário para formuladores de políticas**. Disponível em: <https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2019/07/SPM-Portuguese-version.pdf>. Acesso em: 19 setembro 2023.

IPCC. **History of the IPCC**. Disponível em: <https://www.ipcc.ch/about/history/>. Acesso em: 3 maio 2024.

KOHLHEPP, Gerd. Disparidades regionais e planejamento regional no Brasil. Revista del CESLA. **International Latin American Studies Review**, v. 2, n. 13, p. 455-471, 2010. Disponível em: <https://bibliotekanauki.pl/articles/485978.pdf>. Acesso em: 22 julho 2023.

KROESE, Dirk P.; TAIMRE, Thomas; BOTEV, Zdravko I. **Handbook of Monte Carlo Methods**. John Wiley & Sons, 2011.

KRUGMAN, P.; WELLS, R. **Macroeconomia**. Elsevier Brasil, 2016. 853527622X.

LATYNSKIY, E.; BERGER, T. Assessing the Income Effects of Group Certification for Smallholder Coffee Farmers: Agent-based Simulation in Uganda. **Journal of Agricultural Economics**, v. 68, n. 3, p. 727-748, 2017.

LOPES, Antônio Simões. **O Espaço Econômico**. Capítulo 1, pp. 35-59. In: COSTA, José Silva (Coordenador). **Compêndio de Economia Regional**. Coimbra, Portugal: APDR – Associação Portuguesa para o Desenvolvimento Regional. Segunda Edição, 2005, 846p.

MAIRESSE, J.; MOHNEN, P. Chapter 26 - Using Innovation Surveys for Econometric Analysis. In: HALL, B. H. e ROSENBERG, N. (Ed.). **Handbook of the Economics of Innovation**. North-Holland, 2010. v. 2, p. 1129-1155.

MATOS, Marcos; PIZZOL, Silvia. Boas práticas agrícolas tornam a cafeicultura mais "carbono negativa". **AgroANALYSIS**, v. 42, n. 6, p. 42-42, 2022. Disponível em: <https://bibliotecadigital.fgv.br/ojs/index.php/agroanalysis/article/download/88085/82819>. Acesso em: 15 setembro 2023.

MERBAH, Nesrine; BENITO-HERNÁNDEZ, Sonia. Consumer willingness-to-pay for sustainable coffee: Evidence from a choice experiment on fairtrade and UTZ certification. **Sustainability**, v. 16, n. 8, p. 3222, 2024.

MINAS GERAIS. Secretaria de Estado de Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Certifica Minas Café**. Belo Horizonte, 2020. Disponível em: http://www.agricultura.mg.gov.br/certificaminas/website/documentos/cartilha_cafe.pdf. Acesso em: 8 out. 2025.

MONTERO, A.; VARGAS, G.; ALPÍZAR, F. Paying for Sustainable Coffee in a Developing Country: Consumers' Profile in Costa Rica. **Sustainability**, v. 13, n. 16, 9360, 2021. DOI: 10.3390/su13169360.

MOREIRA, C. F.; FERNANDES, E. A. N.; VIAN, C. E. F. Certificação de café no Brasil: situação atual e perspectivas. **Organizações Rurais & Agroindustriais**, v. 13, n. 1, p. 1-13, 2011. Disponível em: <https://www.revista.dae.ufla.br/index.php/ora/article/download/429/328/584>. Acesso em: 8 out. 2025.

NAB, C.; MASLIN, M. Life cycle assessment synthesis of the carbon footprint of Arabica coffee: Case study of Brazil and Vietnam conventional and sustainable coffee production and export to the United Kingdom. **Geo: Geography and Environment**. 2020; 7:e96.

NEDER, H. D. Trabalho e pobreza rural no Brasil. In: Antônio Márcio Buainain, Eliseu Alves, José Maria da Silveira, Zander Navarro. (Org.). **O mundo rural no Brasil do século 21: A formação de um novo padrão agrário e agrícola**. 1ed. Brasília: Embrapa, 2014, v. 1, p. 621-652.

NICHOLSON, W.; SNYDER, C. M. **Microeconomic Theory: basic principles and extensions**. Cengage Learning, 2016.

NOPONEN, Martin R. A. *et al.* Greenhouse gas emissions in coffee grown with differing input levels under conventional and organic management. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v. 151, n. 1, p. 6 – 15, abril 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.agee.2012.01.019>. Acesso em: 19 setembro 2023.

OBSERVATÓRIO DO CLIMA. **Sistema de Estimativas de Emissões de Gases de Efeito Estufa (SEEG): 13ª edição**. São Paulo: Observatório do Clima, 2025. Disponível em: <https://seeg.eco.br>. Acesso em: 13 fev. 2026.

OCDE (ORGANIZAÇÃO PARA COOPERAÇÃO E DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO). **Manual de Oslo: diretrizes para coleta e interpretação de dados sobre inovação**. 3. ed. Tradução da Finep. Brasília, DF: Finep, 2005. 152 p.

OCDE (ORGANIZAÇÃO PARA COOPERAÇÃO E DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO). **Abordagens Voluntárias na Política Ambiental**. Tradução de: *Voluntary Approaches in Environmental Policy*. Paris: OECD, 2003.

OLIVEIRA, Diego Humberto de. **Gestão estratégica na cafeicultura: eficiência de fatores produtivos e quantificação de emissões de gases do efeito estufa**. 2015. Disponível em: <http://www.sbicafe.ufv.br/handle/123456789/8375>. Acesso em: 16 setembro 2023.

OLIVEIRA JÚNIOR, G. G. *et al.* Levantamento de emissão de gases de efeito estufa pela metodologia do carbono equivalente na cultura do cafeeiro. **Coffee Science**, Lavras, v. 10, n. 4, p. 412 - 419, out./dez. 2015. Disponível em: <http://www.coffeescience.ufla.br/index.php/Coffeescience/article/download/897/pdf/5665>. Acesso em: 19 setembro 2023.

OLIVEIRA JUNIOR, G. G. de; RIBEIRO, V. da S.; APARECIDO, L. E. de O.; FIGUEIREDO, F. C. .; REZENDE, R. N.; REZENDE, A. P. da S.; BRITO, J. P. C. de. *Equivalent carbon dioxide balance in coffee crops*. **Research, Society and Development**, [S. l.], v. 11, n. 7, p. e25311729966, 2022. DOI: 10.33448/rsd-v11i7.29966. Disponível em: <https://rsdjournal.org/index.php/rsd/article/view/29966>. Acesso em: 15 setembro 2023.

PARDEY, Philip G.; ALSTON, Julian M.; RUTTAN, Vernon W. The economics of innovation and technical change in agriculture. **Handbook of the Economics of Innovation**, v. 2, p. 939-984, 2010.

PEREIRA, S. P. Cafés certificados do Brasil conquistam mercado interno e externo. **Embrapa**, 26 nov. 2014. Entrevista. Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-noticias/-/noticia/2293393/cafes-certificados-do-brasil-conquistam-mercado-interno-e-externo>. Acesso em: 8 out. 2025.

PERMAN, R. *et al.* **Natural Resource and Environmental Economics**. 3. ed. Harlow: Pearson Education Limited, 2003

PEROSA, B.; SPARSIS, M. Organização de produtores e certificações geográficas: os casos do café do Cerrado e da Mantiqueira de Minas. **Revista de Economia e Ensaios**, v. 30, n. 2, p. 131-154, jul./dez. 2016. Disponível em: <https://seer.ufu.br/index.php/revistaeconomiaensaio/article/view/36605/21890>. Acesso em: 8 out. 2025.

POLÈSE, M. Economia urbana e regional: Lógica espacial das transformações econômicas. Coimbra, Portugal. **Associação Portuguesa para o Desenvolvimento Regional – APDR**, 1998.

PRAKASH, A. *Greening the Firm: The Politics of Corporate Environmentalism*. Cambridge: **Cambridge University Press**, 2000.

RIZZATTI, Maurício *et al.* Cartografia temática e métodos de representação: uma revisão teórica. **Estrabão**, v. 4, p. 92-111, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.53455/re.v4i.77>. Acesso em 25 agosto 2025.

ROSENBAUM, Paul R.; RUBIN, Donald B. The central role of the propensity score in observational studies for causal effects. **Biometrika**, v. 70, n. 1, p. 41-55, 1983.

RUBEN, Ruerd; ZUNIGA, Guillermo. How standards compete: comparative impact of coffee certification schemes in Northern Nicaragua. **Supply Chain Management: An International Journal**, v. 16, n. 2, p. 98-109, 2011.

RUBIN, Donald B. **Using propensity scores to help design observational studies: Application to the tobacco litigation**. 2001. Disponível em: https://pages.ucsd.edu/~mboyle/COGS163/pdf-files/Rubin2001_Article_UsingPropensityScoresToHelpDes.pdf. Acesso em: 7 fev. 2026.

SANTOS, Jamilsen de Freitas; NOGUEIRA, Jorge Madeira; TORRES, Marcelo de Oliveira. A dinâmica do prêmio verde: uma análise da evolução do faturamento da cafeicultura orgânica no Brasil (2006-2017). In: Encontro Internacional Sobre Gestão Empresarial e Meio Ambiente (ENGEMA), 27., 2025, São Paulo. **Anais...** São Paulo: FEA/USP, 2025. ISSN 2359-1048. Disponível em: https://engemausp.submissao.com.br/27/anais/resumo.php?cod_trabalho=871. Acesso em: 26 fev. 2026.

SANTOS, Jamilsen de Freitas; NOGUEIRA, Jorge Madeira. Brazilian Coffee in the Carbon Market: A Prospective Analysis of Financial Viability and Effectiveness. **Revista Economia Ensaios**, Uberlândia, Minas Gerais, Brasil, v. 40, n. 1, 2025. DOI: 10.14393/REE-v40n1a2025-73702. Disponível em:

<https://seer.ufu.br/index.php/revistaeconomiaensaios/article/view/73702>. Acesso em: 17 set. 2025.

SANTOS, Jamilsen de Freitas; NOGUEIRA, Jorge Madeira. Cafés do Brasil no Mercado de Carbono – Efeitos Sobre as Disparidades Regionais. **Revista de Geopolítica**, v. 16, n. 5, p. e868, 2025. DOI: 10.56238/revgeov16n5-082. Disponível em: <https://revistageo.com.br/revista/article/view/868>. Acesso em: 26 fev. 2026.

SANTOS, Jamilsen de Freitas; SANTOS, Julio Cesar Freitas; DINIZ, Anísio José. Inovações para Redução de Gases do Efeito Estufa na Agropecuária: Avaliação de Patentes, Marcas e Bibliometria. In: **VII CONGRESSO NACIONAL DE INOVAÇÃO E TECNOLOGIA**. 2024. Disponível em: <https://eventos.udesc.br/ocs/index.php/inova/2024/paper/view/2910>. Acesso em: 26 fev. 2026.

SANTOS, Jamilsen de Freitas; NOGUEIRA, Jorge Madeira. The Potential of Brazilian Agriculture for Reducing Greenhouse Gases: An Analysis of Coffee Growing and Lessons for Cop30. **RP3 - Revista de Pesquisa em Políticas Públicas**, [S. l.], v. 1, n. 3, 2025. DOI: 10.18829/2317-921X.2025.e60204. Disponível em: <https://periodicos.unb.br/index.php/rp3/article/view/60204>. Acesso em: 26 fev. 2026.

SCHMALENSEE, R.; STAVINS, R. Lessons Learned from Three Decades of Experience with *Cap and Trade*. **Review of Environmental Economics and Policy**, v. 11, n. 1, p. 59-79, 2017.

SEGERSON, K. Voluntary Approaches to Environmental Protection and Resource Management. **Annual Review of Resource Economics**, v. 5, p. 161–180, 2013.

SEGERSON, K.; LI, N. Voluntary Approaches to Environmental Protection. In: FOLMER, H.; TIENTENBERG, T. (Eds.). **The International Yearbook of Environmental and Resource Economics**: 1999/2000. Edward Elgar, 1999.

SIEGEL, S.; CASTELLAN, N. J. **Estatística não-paramétrica para ciências do comportamento**. 2. ed. Porto Alegre: Bookman, 2006.

SILVA, Fernanda Aparecida; NONNENBERG, Marcelo José Braga. **Normas Voluntárias de Sustentabilidade (NVS) e implicações sobre as exportações de produtos do agronegócio – Café**. Brasília: Ipea, 2023. (Texto para Discussão, n. 2911).

SMEA. **Tabela de Honorários Profissionais para o Engenheiro Agrônomo**. Sociedade Mineira de Engenheiros Agrônomos (SMEA). Belo Horizonte, 2020. Disponível em: <http://www.crea-mg.org.br/sites/default/files/tabelas-codigos/hp-smea.pdf>. Acesso em: 3 agosto 2022.

SMITH, Pete *et al.* Agriculture, forestry and other land use (AFOLU). In: EDENHOFER, Ottmar *et al.* (ed.). **Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change**. Cambridge: Cambridge University Press, 2014. p. 811–922.

STAVINS, Robert N. **A meaningful U.S. cap-and-trade system to address climate change**. Harvard Environmental Law Review, v. 32, p. 293–371, 2008.

STERNER, Thomas e Jessica CORIA. Policy Instruments for Environmental and Natural Resource Management. New York e London: RFF Press, Resource for the Future, Second Edition, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.4324/9781315780894>. Acesso em: 17 outubro 2025.

STIGLITZ, Joseph E. The Causes and Consequences of the Dependence of Quality on Price. **Journal of Economic Literature**, v. 25, n. 1, p. 1-48, 1987.

STIGLITZ, Joseph E. **People, power, and profits: progressive capitalism for an age of discontent**. New York: W. W. Norton, 2019.

TIETENBERG, Tom. **Emissions trading: principles and practice**. 2. ed. Washington, DC: Resources for the Future Press, 2006.

UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE (USDA). Natural Resources Conservation Service. **Conservation Stewardship Program (CSP)**. Washington, DC, 2026. Página inicial. Disponível em: <https://www.nrcs.usda.gov/wps/portal/nrcs/main/national/programs/financial/csp/>. Acesso em: 19 fev. 2026.

VALKILA, Joni. Fair Trade organic coffee production in Nicaragua—Sustainable development or a poverty trap? **Ecological Economics**, v. 68, n. 12, p. 3018-3025, 2009.

VARGAS, D. B; DELAZERI, L. M. M.; FERREIRA, V. H. P. Mercado de Carbono Voluntário no Brasil: na realidade e na prática. **Observatório de Bioeconomia**. Escola de Economia de São Paulo. Fundação Getúlio Vargas, 2022. Disponível em: https://eesp.fgv.br/sites/eesp.fgv.br/files/ocbio_mercado_de_carbono_1.pdf. Acesso em: 13 setembro 2023.

VARGAS, D. B; DELAZERI, L. M. M.; FERREIRA, V. H. P. O avanço do mercado voluntário de carbono no Brasil: desafios estruturais, técnicos e científicos. **Observatório de Bioeconomia**. Escola de Economia de São Paulo. Fundação Getúlio Vargas, 2022a. Disponível em: https://eesp.fgv.br/sites/eesp.fgv.br/files/eesp_relatorio_lab_bioeconomia_04_ap5.pdf. Acesso em: 13 setembro 2023.

VARIAN, Hal R. **Microeconomia: uma abordagem moderna**. 9. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2015.

WILLIAMSON, Oliver E. The economic institutions of capitalism. New York: Free Press, 1985.

WOOLDRIDGE, Jeffrey M. **Introdução à econometria: uma abordagem moderna**. 7. ed. São Paulo: Cengage Learning, 2023. ISBN 9786555584356.

WORLD BANK. State and Trends of Carbon Pricing 2025. Washington, DC: **World Bank, 2025**. Disponível em: <https://www.worldbank.org/en/publication/state-and-trends-of-carbon-pricing>. Acesso em: 21 outubro 2025.

APÊNDICE 1 – NÚMERO DE ESTABELECIMENTOS POR FAIXA DE ÁREA

Tabela 25 - Distribuição do número de estabelecimentos por faixa de área – Censo Agropecuário do IBGE de 2017

Faixa de área dos estabelecimentos	Estabelecimentos	%³⁴	Área	%³⁵
Mais de 0 a menos de 0,1 ha	164	100%	159	100%
De 0,1 a menos de 0,2 ha	178	100%	102	100%
De 0,2 a menos de 0,5 ha	1.662	100%	464	100%
De 0,5 a menos de 1 ha	5.242	99%	2.347	100%
De 1 a menos de 2 ha	17.141	97%	13.797	100%
De 2 a menos de 3 ha	21.575	91%	27.597	99%
De 3 a menos de 4 ha	20.700	83%	38.840	97%
De 4 a menos de 5 ha	21.815	75%	48.122	95%
De 5 a menos de 10 ha	54.601	67%	154.408	92%
De 10 a menos de 20 ha	47.807	46%	200.441	82%
De 20 a menos de 50 ha	42.710	28%	293.136	70%
De 50 a menos de 100 ha	17.442	12%	208.345	52%
De 100 a menos de 200 ha	7.840	5%	195.437	39%
De 200 a menos de 500 ha	4.002	2%	211.793	27%
De 500 a menos de 1.000 ha	978	1%	105.002	14%
De 1.000 a menos de 2.500 ha	363	0%	73.576	7%
De 2.500 a menos de 10.000 ha	105	0%	39.496	3%
De 10.000 ha e mais	9		4.141	0%
Produtor sem área	27		63	0%
TOTAL	264.361	100	1.617.293	100

Fonte: elaboração própria (2026), com dados do IBGE (2019).

³⁴ Percentual acumulado por número de estabelecimentos com diferentes áreas em ordem decrescente.

³⁵ Percentual acumulado por área de estabelecimentos com diferentes áreas em ordem decrescente.

APÊNDICE 2 – DETALHAMENTO DE CUSTOS

Tabela 26 - Detalhamento dos custos fixo e variáveis

Descrição do custo	Valor (em R\$)	Fonte
Custo Fixo		
Certificação dos créditos de carbono (por projeto)	62.457	Estudo apresentado em Vargas <i>et al.</i> (2022a) e tabelas públicas de preços de duas certificadoras internacionais Gold Standard (GOLD STANDARD, 2022) e European Biochar Certificate (EBC, 2022). Foi considerada a média dos três valores, convertidos pelo câmbio de agosto de 2022, apresentados a seguir. Vargas <i>et al.</i> (2022a) – R\$ 90.875 (desenvolvimento, validação e monitoramento do projeto); Gold Standard (2022) – R\$ 38.375 (taxa anual da conta de registro, taxas de revisão de certificação preliminar, taxas de revisão de certificação de design de projeto, taxas de revisão de certificação de desempenho); EBC (2022) – R\$ 58.122 (taxa de inscrição, taxa de selo, pré-auditoria técnica, treinamento de coletadores de amostras e análises).
Custos Variáveis		
Manejo de solo (por hectare)	270	Valor de insumos e mão de obra para manejo de solo tendo como referência a adoção do sistema de cultivo de café com uso de braquiária nas entrelinhas de acordo com Balanço Social da Embrapa (EMBRAPA, 2022) e no respectivo Relatório de Avaliação de Impactos (EMBRAPA, 2022a).
Assistência Técnica Especializada (por hectare)	204	Referente a duas horas técnicas de engenheiro agrônomo, conforme Tabela de Honorários Profissionais para o Engenheiro Agrônomo (SMEA, 2020).
Certificação dos créditos de carbono (por hectare)	1.000	Valor referente a uma parte do pacote de consultoria de 20 horas (EUR 3.000) da certificadora European Biochar Certificate (EBC). Foi considerado que o pacote de 20 horas seria suficiente uma propriedade de aproximadamente 15 hectares.

Fonte: elaboração própria, com base na literatura de custos indicadas na respectiva coluna.

APÊNDICE 3 – EMISSÕES NA CAFEICULTURA

Tabela 27 - Emissões de GEE na cafeicultura

Fonte de emissão	Emissão de CO ₂ (em kg CO _{2e} kg ⁻¹)	Emissão de CO ₂ (em kg CO _{2e} kg ⁻¹)
	Cultivo convencional	Cultivo sustentável
Fertilizante	0.96	0.01
Combustíveis fósseis	0.03	0.03
Eleticidade	0.01	0.01
Pesticidas	0.01	0.00
Total	1.01	0.05

Fonte: Nab e Maslin (2020).

APÊNDICE 4 – ANÁLISES REGIONAIS COMPLEMENTARES

Tabela 28 - Regiões Intermediárias³⁶ – percentual de estabelecimentos acima de cada faixa de área, estado, bioma e área potencial nas faixas a partir de 50 e 200 hectares

Região Intermediária	UF	Bioma predominante	Estabelecimentos a partir de 100 hectares (%)	Área total de lavouras com 50 hectares ou mais (em hectares)	Área total de lavouras com 200 hectares ou mais (em hectares)
Varginha	MG	Mata Atlântica (transição com Cerrado)	7%	307.860	155.315
Patos de Minas	MG	Cerrado	25%	133.980	97.560
Juiz de Fora	MG	Mata Atlântica	2%	68.227	20.556
Ribeirão Preto	SP	Mata Atlântica (transição com Cerrado)	20%	50.595	29.433
Pouso Alegre	MG	Mata Atlântica	5%	47.094	21.797
São Mateus	ES	Mata Atlântica	5%	45.927	17.030
Uberlândia	MG	Cerrado	20%	38.818	18.791
Colatina	ES	Mata Atlântica	3%	38.113	10.520
Uberaba	MG	Cerrado	27%	35.111	25.137
Ilhéus - Itabuna	BA	Mata Atlântica	14%	32.371	17.539
Campinas	SP	Mata Atlântica	8%	27.704	14.630
Marília	SP	Mata Atlântica (transição Cerrado)	14%	27.106	15.919
Cachoeiro do Itapemirim	ES	Mata Atlântica	2%	25.258	5.127
Vitória da Conquista	BA	Caatinga (alta transição com Mata Atlântica costa-sul)	3%	23.349	9.983
Divinópolis	MG	Mata Atlântica	17%	20.380	13.043
Vitória	ES	Mata Atlântica	2%	19.595	4.163
Teófilo Otoni	MG	Mata Atlântica (transição Cerrado)	6%	16.696	11.751
Barreiras	BA	Caatinga	96%	13.967	13.967
Ipatinga	MG	Mata Atlântica	2%	13.084	2.347
Londrina	PR	Mata Atlântica (transição com Campo natural/pampa)	3%	9.647	3.522
Montes Claros	MG	Cerrado	14%	9.124	8.411
Bauru	SP	Cerrado (transição com Mata Atlântica)	16%	8.449	5.030
Ji-Paraná	RO	Amazônia	4%	7.986	840
Porto Velho	RO	Amazônia	9%	6.300	494
Governador Valadares	MG	Mata Atlântica	6%	4.681	743
Irecê	BA	Caatinga	3%	3.525	2.121

Fonte: Resultados da pesquisa.

³⁶ Regiões Intermediárias classificadas de acordo com IBGE (2017).

Nota: A seleção representa as 26 Regiões Intermediárias que compõem o oitavo decil (80º) em termos de área cultivada.

Tabela 29 - Regiões Intermediárias³⁷ – quantidade de redução de GEE e faturamento de créditos potenciais por faixas área a partir de 50 e 200 hectares

Região Intermediária	Receita de lavouras a partir de 50 hectares (em R\$)	Receita de lavouras a partir de 200 hectares (em R\$)	Redução de GEE em lavouras a partir de 50 hectares (em ton de CO₂ eq)	Redução de GEE em lavouras a partir de 200 hectares (em ton de CO₂ eq)
Varginha	646.401.344	326.108.704	2.333.579	1.177.288
Patos de Minas	281.312.448	204.842.832	1.015.568	739.505
Juiz de Fora	143.253.504	43.160.612	517.161	155.814
Ribeirão Preto	106.232.296	61.799.292	383.510	223.102
Pouso Alegre	98.881.392	45.766.288	356.973	165.221
São Mateus	96.431.088	35.757.208	348.127	129.087
Uberlândia	81.504.600	39.454.712	294.240	142.436
Colatina	80.024.344	22.088.424	288.897	79.742
Uberaba	73.721.160	52.779.152	266.141	190.538
Ilhéus - Itabuna	67.968.096	36.825.936	245.372	132.946
Campinas	58.168.980	30.718.026	209.996	110.895
Marília	56.913.384	33.424.488	205.463	120.666
Cachoeiro do Itapemirim	53.033.212	10.764.957	191.456	38.863
Vitória da Conquista	49.024.960	20.960.906	176.985	75.671
Divinópolis	42.791.072	27.385.866	154.480	98.866
Vitória	41.142.836	8.740.885	148.530	31.556
Teófilo Otoni	35.055.924	24.673.104	126.556	89.073
Barreiras	29.325.952	29.325.952	105.870	105.870
Ipatinga	27.471.952	4.927.902	99.177	17.790
Londrina	20.255.420	7.395.003	73.124	26.697
Montes Claros	19.157.298	17.660.240	69.160	63.755
Bauru	17.740.028	10.561.290	64.043	38.127
Ji-Paraná	16.767.885	1.763.714	60.534	6.367
Porto Velho	13.227.858	1.037.232	47.754	3.745
Governador Valadares	9.828.508	1.560.047	35.482	5.632
Irecê	7.401.302	4.453.379	26.720	16.077

Fonte: Resultados da pesquisa.

Nota: A seleção representa as 26 Regiões Intermediárias que compõem o oitavo decil (80º) em termos de área cultivada.

Tabela 30 - Municípios – percentual de estabelecimentos acima de cada faixa de área, estado, bioma área potencial nas faixas a partir de 50 e 200 hectares

Município	Bioma predominante	Estabelecimentos a partir de 100 hectares (%)	Área total de lavouras com 50 hectares ou mais (em hectares)	Área total de lavouras com 200 hectares ou mais (em hectares)
Patrocínio (MG)	Cerrado	0,191298	17.883	2.235

³⁷ Regiões Intermediárias classificadas de acordo com IBGE (2017).

Boa Esperança (MG)	Mata Atlântica	0,096271	15.444	7.275
Três Pontas (MG)	Mata Atlântica	0,127894	14.679	6.503
Campos Gerais (MG)	Mata Atlântica	0,03796	14.196	5.799
Piumhi (MG)	Cerrado (transição)	0,253776	12.327	8.565
São Sebastião do Paraíso (MG)	Mata Atlântica	0,161481	12.117	5.949
Machado (MG)	Mata Atlântica	0,07485	10.472	3.955
Monte Carmelo (MG)	Cerrado	0,222749	10.256	7.026
Garça (SP)	Mata Atlântica	0,17737		
	(transição com Cerrado)		8.628	5.389
Ibiraci (MG)	Mata Atlântica	0,096401	8.319	2.078
Araguari (MG)	Cerrado	0,138425	7.856	1.609
Linhares (ES)	Mata Atlântica	0,069577	7.839	1.797
Jaguaré (ES)	Mata Atlântica	0,052551	7.032	2.478
Campestre (MG)	Mata Atlântica	0,033478	6.665	3.598
Rio Bananal (ES)	Mata Atlântica	0,02938	5.874	589
São Mateus (ES)	Mata Atlântica	0,031288	5.205	1.644
Manhuaçu (MG)	Mata Atlântica	0,018579	4.928	1.660
Nova Venécia (ES)	Mata Atlântica	0,039268	4.341	803
Carmo do Rio Claro (MG)	Mata Atlântica	0,065217	4.247	-
Vila Valério (ES)	Mata Atlântica	0,0263	4.113	1.904
Santa Margarida (MG)	Mata Atlântica	0,011759	3.780	1.334
Lajinha (MG)	Mata Atlântica	0,029947	3.261	567
Afonso Cláudio (ES)	Mata Atlântica	0,023443	3.215	382
Pancas (ES)	Mata Atlântica	0,040882	3.069	594
Iúna (ES)	Mata Atlântica	0,019231	3.039	903
Simonésia (MG)	Mata Atlântica	0,012567	2.187	-
Castelo (ES)	Mata Atlântica	0,01176	1.903	-
Nova Resende (MG)	Mata Atlântica	0,009188	1.892	-

Fonte: Santos e Nogueira (2025b) e resultados da pesquisa.

Nota: A seleção representa os 28 municípios no quantil 99,5, que juntos somam 0,5% da área total cultivada com café no Brasil.

Tabela 31 - Municípios – quantidade redução de GEE e faturamento de créditos potenciais por faixas de área a partir de 50 e 200 hectares

Município	Receita de lavouras a partir de 50 hectares (em R\$)	Receita de lavouras a partir de 200 hectares (em R\$)	Redução de GEE em lavouras a partir de 50 hectares (em ton de CO₂ eq)	Redução de GEE em lavouras a partir de 200 hectares (em ton de CO₂ eq)
Patrocínio (MG)	37.548.220	4.692.740	135.553	16.941
Boa Esperança (MG)	32.427.150	15.275.026	117.066	55.145
Três Pontas (MG)	30.820.910	13.654.089	111.267	49.293
Campos Gerais (MG)	29.806.774	12.175.928	107.606	43.956
Piumhi (MG)	25.882.508	17.983.588	93.439	64.923
São Sebastião do Paraíso (MG)	25.441.580	12.490.877	91.847	45.093
Machado (MG)	21.987.640	8.304.156	79.378	29.979
Monte Carmelo (MG)	21.534.112	14.752.211	77.740	53.257
Garça (SP)	18.115.866	11.315.068	65.400	40.849
Ibiraci (MG)	17.467.072	4.363.094	63.058	15.751
Araguari (MG)	16.494.929	3.378.353	59.548	12.196
Linhares (ES)	16.459.235	3.773.089	59.420	13.621
Jaguaré (ES)	14.764.809	5.202.958	53.303	18.783

Campestre (MG)	13.994.234	7.554.577	50.521	27.273
Rio Bananal (ES)	12.333.403	1.236.700	44.525	4.465
São Mateus (ES)	10.928.730	3.451.841	39.454	12.462
Manhuaçu (MG)	10.347.124	3.485.436	37.354	12.583
Nova Venécia (ES)	9.114.624	1.686.027	32.905	6.087
Carmo do Rio Claro (MG)	8.917.256	-	32.192	-
Vila Valério (ES)	8.635.902	3.997.753	31.177	14.432
Santa Margarida (MG)	7.936.715	2.800.947	28.652	10.112
Lajinha (MG)	6.846.992	1.190.507	24.718	4.298
Afonso Cláudio (ES)	6.750.407	802.070	24.370	2.896
Pancas (ES)	6.443.857	1.247.198	23.263	4.503
Iúna (ES)	6.380.867	1.895.993	23.036	6.845
Simonésia (MG)	4.591.957	-	16.577	-
Castelo (ES)	3.995.653	-	14.425	-
Nova Resende (MG)	3.972.557	-	14.341	-

Fonte: Santos e Nogueira (2025b) e resultados da pesquisa.

Nota: A seleção representa os 28 municípios no quantil 99,5, que juntos somam 0,5% da área total cultivada com café no Brasil.

Comparação adicional dos municípios com menos de 30% de grandes propriedades e municípios que têm a partir de 30% de grandes propriedades

Uma terceira comparação quantitativa foi realizada entre o grupo de municípios nos quais as propriedades com 100 hectares representem menos 30% dos estabelecimentos que produzem café e os municípios nos quais as propriedades com 100 hectares ou mais representam pelo menos 30% dos estabelecimentos cafeeiros. Conforme mencionado, essa comparação tem o principal objetivo de testar estatisticamente a diferença de PIB per capita médio entre esses dois grupos de municípios, com propósito de exemplificar, diferenças de faixas da comparação anterior, com maior nível de agregação dos municípios.

Essa comparação tem o principal objetivo de testar estatisticamente a diferença de PIB per capita médio entre dois grupos de municípios, com propósito de exemplificar, diferenças de faixas da comparação (b), com maior nível de agregação dos municípios. Para verificar se estatisticamente as médias de PIB per capita são diferentes entre esses dois grupos, utilizou-se a mesma metodologia de comparação (a) dos grupos de municípios, ou seja, o teste t de Welch e o teste de Mann–Whitney.

A comparação entre municípios com diferentes níveis de concentração de grandes propriedades cafeeiras revelou diferenças estatisticamente significativas no PIB per capita. O teste t de Welch indicou que municípios com menos de 30% de grandes propriedades cafeeiras apresentaram média de R\$ 25.999 (DP = 22.437), enquanto aqueles com 30% ou mais tiveram média de R\$ 32.757 (DP = 27.760), diferença de R\$ 6.757, $t(176,98) = -2,87$; $p = 0,0046$, conforme apresentado na Tabela 32.

Tabela 32 - Comparação do PIB *per capita* entre municípios com menos e mais de 30% de grandes propriedades

Teste	Variável	<30% grandes propriedades (n=1137)	≥30% grandes propriedades (n=151)	Diferença média	Estatística	p-valor
Teste t de Welch	PIB <i>per capita</i>	Média = 25.999	Média = 32.757	-6.757	t = -2,87	0,0046
Teste t de Welch	Log (PIB <i>per capita</i>)	Média = 9,98	Média = 10,16	-0,19	t = -3,34	0,001
Mann–Whitney (Rank Sum)	PIB <i>per capita</i>	Rank sum = 718.555	Rank sum = 111.561	–	z = -3,32	0,0009

Fonte: Resultados da pesquisa com base em dados do IBGE (2019) e IBGE (2022).

Nota: O código para replicação dos testes está disponível no Apêndice 5.

O teste de Mann–Whitney corroborou esse resultado, apontando diferenças significativas nas distribuições do PIB *per capita* entre os grupos ($z = -3,32$; $p = 0,0009$). A análise com o logaritmo do PIB *per capita* também confirmou a robustez do achado: municípios com $\geq 30\%$ de grandes propriedades apresentaram valor médio superior ($M = 10,16$; $DP = 0,66$) em relação aos demais ($M = 9,98$; $DP = 0,58$), diferença de $-0,19$, $t(181,68) = -3,34$; $p = 0,001$.

REFERÊNCIAS

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Divisão regional do Brasil em regiões geográficas imediatas e regiões geográficas intermediárias: 2017**. Rio de Janeiro: IBGE, 2017. Disponível em: <https://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/livros/liv100600.pdf>. Acesso em: 2 jul. 2025.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Censo Agro 2017: resultados definitivos**. Rio de Janeiro, 2019. Disponível em: <https://sidra.ibge.gov.br/tabela/6956>. Acesso em: 19 julho 2023.

SANTOS, Jamilsen de Freitas; NOGUEIRA, Jorge Madeira. O Potencial da Agricultura Brasileira para a Redução de Gases de Efeito Estufa: Uma Análise da Cafeicultura. RP3 - **Revista de Pesquisa em Políticas Públicas**, [S. l.], v. 1, n. 3, 2025b (publicação em andamento).

APÊNDICE 5 – REPLICAÇÃO DOS RESULTADOS DO CAPÍTULO 5

1. Replicação dos Mapas (Cartogramas Temáticos)

Os mapas temáticos utilizados no artigo foram produzidos com base em dados públicos disponibilizados pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). Os cartogramas foram gerados utilizando a plataforma EstatGeo, que integra estatísticas oficiais às malhas digitais de referência. Abaixo seguem os links para reprodução dos mapas apresentados no Capítulo 5 desta tese.

Figura 4 - Cartograma dos municípios em concentrações urbanas classificados por PIB a preços correntes (Mil Reais), ano-base 2020. Link:

<https://estatgeo.ibge.gov.br/EstatGeo2020/mapa/index.html?nivt=6&anomalha=2009&versao=2023-12-15T09:46:33&metodo=3&qtdfaixas=5&cor1=%23ffcfe7&cor2=%23ffb2ce&cor3=%23ef70a5&cor4=%23de4984&cor5=%23c60063&colgeocodigo=D1C&colgeonome=D1N&colvalor=V&columidademedida=MN&colvariavel=D2N&colperiodo=D3N&urldados=https://apisidra.ibge.gov.br/values/k/150084255&font=IBGE%20-%20Produto%20Interno%20Bruto%20dos%20Munic%C3%ADpios>

Figura 5 - Cartograma dos municípios com área de lavouras de café no Brasil com 50 pés e mais, ano-base 2017. Link:

<https://estatgeo.ibge.gov.br/EstatGeo2020/mapa/index.html?nivt=6&anomalha=2009&versao=2021-04-08T12:09:21&metodo=3&qtdfaixas=1&cor1=%23a6939&colgeocodigo=D1C&colgeonome=D1N&colvalor=V&columidademedida=MN&colvariavel=D2N&colperiodo=D3N&urldados=https://apisidra.ibge.gov.br/values/t/6956/n6/all/v/9504/p/2017/c829/46302/c227/111647%20111648/c220/40645%2041139%20111555%20111556%20111557%20111558/f/u/x/d20210408&font=IBGE%20-%20Censo%20Agropecu%C3%A1rio>

Figura 6 - Cartograma dos municípios com lavouras de café no Brasil, classificados por número de propriedade com 100 hectares ou mais, ano-base 2017. Link:

<https://estatgeo.ibge.gov.br/EstatGeo2020/mapa/index.html?nivt=6&anomalha=2009&versao=2021-04-08T12:09:21&metodo=3&qtdfaixas=5&cor1=%23f7fdf9&cor2=%23d9f2e4&cor3=%23b0e5c9&cor4=%237dd6a7&cor5=%23004d29&colgeocodigo=D1C&colgeonome=D1N&colvalor=V&columidademedida=MN&colvariavel=D2N&colperiodo=D3N&urldados=https://apisidra.ibge.gov.br/values/t/6956/n6/all/v/9504/p/2017/c829/46302/c227/111647>

<https://sidra.ibge.gov.br/tabela/6956#/n6/all/v/9504/p/all/c829/46302/c227/111647,111648/c220/all/l/v,p+c829+c220+c227,t/cfg/cod>

2. Código de Replicação dos Resultados Estatísticos

As análises estatísticas foram conduzidas utilizando o software Stata (versão 17).

3. Base de Dados Utilizada

As informações utilizadas neste estudo são provenientes de bases públicas oficiais do IBGE, listadas a seguir:

- Censo Agropecuário 2017 (IBGE, 2019) – Tabela 6956 - Estabelecimentos, disponível em:

<https://sidra.ibge.gov.br/tabela/6956#/n6/all/v/9504/p/all/c829/46302/c227/111647,111648/c220/all/l/v,p+c829+c220+c227,t/cfg/cod>,

- Censo Agropecuário 2017 (IBGE, 2019) – Tabela 6956 - Área, disponível em: <https://sidra.ibge.gov.br/geratabela?format=xlsx&name=tabela6956.xlsx&terr=NC&rank=-&query=t/6956/n6/all/v/10079/p/all/c829/46302/c227/111647,111648/c220/110085/d/v10079%200/l/v,p%2Bc829%2Bc220%2Bc227,t>

- Produto Interno Bruto dos Municípios 2020 (IBGE, 2022) – Documento base_de_dados_2010_2020_xls.zip, disponível em: <https://www.ibge.gov.br/estatisticas/economicas/contas-nacionais/9088-produto-interno-bruto-dos-municipios.html?=&t=downloads>

4. Código de Replicação

```
*=====
* CÓDIGO DE REPLICAÇÃO - Cafés do Brasil no Mercado de Carbono – efeitos sobre as
disparidades regionais
* Autor: Jamilsen de Freitas Santos e Jorge Madeira Nogueira
* Data: 13-9-2025
* Stata 17
*=====

// OBJETIVOS
// Separar grupos de municipios e verificar diferenciais de PIB
// - separar municipios por faixas de 10% para verificar diferenças de PIB_munPC
// - verificar PIB municipios com cafe
// - comparar diferencas dos PIB de municipios com cafe e de concentracoes urbanas.
```

```
cls
clear
```

```
* Definir o diretorio de trabalho (AJUSTAR ESTE CAMINHO)
* cd "C:\Definir\Pasta\Dados"
```

```
*****
```

```
* Separar municipios por faixas percentuais de propriedades a partir de 100 hectares
```

```
import excel "tabela6956 estabelecimentos cafe por faixas de area.xlsx", sheet("Tabela")
cellrange(A8:AP5496)
describe
rename A Cod_mun
rename B Municipio
cd "C:\Users\jamil\Documents\DOCTORADO\Para Tese\Artigo Regional (copia)\Dados
producao cafe municipios"
drop AO AP C D
// destring C D, replace ignore("-" "X")
destring E F G H I J K L M N O P Q R S T U V W X Y Z AA AB AC AD AE AF AG AH AI
AJ AK AL AM AN, replace ignore("-" "X")
egen estab_total = rowtotal(E-AN)
drop E F G H I J K L M N O P Q R S T U V W X Y Z
egen estab_min100ha = rowtotal(AC-AN)
drop AA AB AC AD AE AF AG AH AI AJ AK AL AM AN
// Para contar municipios nos quais estabelecimentos com 100ha ou mais
// representam pelo menos 30% dos estabelecimentos totais
gen percentual_min100ha = estab_min100ha / estab_total
gen latif_30perc = cond(missing(percentual_min100ha), 0, percentual_min100ha >= 0.3)
gen latif_10perc = cond(missing(percentual_min100ha), 0, percentual_min100ha >= 0.1)
gen latif_20perc = cond(missing(percentual_min100ha), 0, percentual_min100ha >= 0.2)
gen latif_40perc = cond(missing(percentual_min100ha), 0, percentual_min100ha >= 0.4)
gen latif_50perc = cond(missing(percentual_min100ha), 0, percentual_min100ha >= 0.5)
gen latif_60perc = cond(missing(percentual_min100ha), 0, percentual_min100ha >= 0.6)
gen latif_70perc = cond(missing(percentual_min100ha), 0, percentual_min100ha >= 0.7)
gen latif_80perc = cond(missing(percentual_min100ha), 0, percentual_min100ha >= 0.8)
gen latif_90perc = cond(missing(percentual_min100ha), 0, percentual_min100ha >= 0.9)
gen latif_100perc = cond(missing(percentual_min100ha), 0, percentual_min100ha >= 1)
total latif_10perc
total latif_20perc
total latif_30perc
total latif_40perc
total latif_50perc
total latif_60perc
total latif_70perc
total latif_80perc
total latif_90perc
total latif_100perc
gen faixa_perc_latif = latif_10perc + latif_20perc + latif_30perc + latif_40perc + latif_50perc
+ latif_60perc + latif_70perc + latif_80perc + latif_90perc + latif_100perc
// municipios estao a condicao 30perc, conforme planilha de excel
```

```
save estab_cafe_area.dta, replace
clear
```

```
*****
```

```
* COMPARACAO (b) DO ARTIGO – TABELA ANOVA – 10 GRUPOS DE MUNICÍPIOS
```

```
import excel "PIB dos Municípios - base de dados 2010-2021.xlsx", sheet("PIB dos
Municípios") firstrow
describe
keep if Ano == 2020
drop CódigodaGrandeRegião NomedaGrandeRegião CódigodaUnidadedaFederação
SigladaUnidadedaFederação NomedaUnidadedaFederação RegiãoMetropolitana
CódigodaMesorregião NomedaMesorregião CódigodaMicrorregião NomedaMicrorregião
CódigodaRegiãoGeográficaImed NomedaRegiãoGeográficaImedia
MunicípiodaRegiãoGeográficaI CódigodaRegiãoGeográficaInte
NomedaRegiãoGeográficaInter S CódigoConcentraçãoUrbana NomeConcentraçãoUrbana
TipoConcentraçãoUrbana CódigoArranjoPopulacional NomeArranjoPopulacional
HierarquiaUrbana HierarquiaUrbanaprincipaisca CódigodaRegiãoRural NomedaRegiãoRural
Regiãoruralsegundoclassifica AmazôniaLegal Semiárido CidadeRegiãodeSãoPaulo
ValoradicionadobrutodaAgrope ValoradicionadobrutodaIndúst ValoradicionadobrutodosServi
ValoradicionadobrutodaAdmini Valoradicionadobrutototala Impostoslíquidosdesubsídios
ProdutoInternoBrutoapreços Atividadecommaiorvaloradicio Atividadecomsegundomaiorvalo
Atividadecomterceiromaioerval
tostring CódigodoMunicípio, generate(Cod_mun) format(%07.0f)
drop CódigodoMunicípio
rename ProdutoInternoBrutopercapita PIB_munPC
merge 1:1 Cod_mun using estab_cafe_area.dta
summarize
tab latif_30perc
drop _merge Ano NomedoMunicípio
// drop latif_10perc latif_20perc latif_30perc latif_40perc latif_50perc latif_60perc
latif_70perc latif_80perc latif_90perc latif_100perc
summarize PIB_munPC, meanonly
scalar media = r(mean)
display media
```

```
///// ANOVA diferenciacao da media em diferentes faixas percentuais de latifundios
oneway PIB_munPC faixa_perc_latif, tabulate bonferroni
// oneway PIB_munPC faixa_perc_latif, tabulate welch
robvar PIB_munPC, by(faixa_perc_latif)
// ssc install pwmc
pwmc PIB_munPC, over(faixa_perc_latif) // sem diferencas estatist entre faixas
pwmc PIB_munPC, over(faixa_perc_latif) pval
/*
```

embora exista uma tendência geral de variação no PIB per capita associada às faixas de percentual de latifúndios (como provado pelo robvar), as diferenças entre quaisquer duas faixas específicas não são suficientemente nítidas para serem estatisticamente significativas após as devidas correções. O efeito parece ser mais um contínuo ou uma tendência geral do que uma diferença abrupta entre categorias específicas.

```
*/
```

```

***** Checagem por faixa
///// PIB municipal percapita
display "PIB municipal percapita"
display media
save munic_PIB_cafe.dta, replace
tab latif_30perc
///// PIB percapita municipios com pelo menos 10% de propr a partir de 100 ha
keep if latif_10perc == 1
summarize
summarize PIB_munPC, meanonly
scalar media = r(mean)
display "PIB percapita de municipios com pelo menos 10% de propr a partir de 100 ha"
display media // 30771
clear

```

```

///// PIB percapita municipios com pelo menos 20% de propr a partir de 100 ha
use munic_PIB_cafe.dta
keep if latif_20perc == 1
summarize
summarize PIB_munPC, meanonly
scalar media = r(mean)
display "PIB percapita de municipios com pelo menos 20% de propr a partir de 100 ha"
display media // 32760
clear

```

```

///// PIB percapita municipios com pelo menos 30% de propr a partir de 100 ha
use munic_PIB_cafe.dta
keep if latif_30perc == 1
summarize
summarize PIB_munPC, meanonly
scalar media = r(mean)
display "PIB percapita de municipios com pelo menos 30% de propr a partir de 100 ha"
display media // 33970
clear

```

```

///// PIB percapita municipios com pelo menos 40% de propr a partir de 100 ha
use munic_PIB_cafe.dta
keep if latif_40perc == 1
summarize
summarize PIB_munPC, meanonly
scalar media = r(mean)
display "PIB percapita de municipios com pelo menos 40% de propr a partir de 100 ha"
display media // 34894
clear

```

```

///// PIB percapita municipios com pelo menos 50% de propr a partir de 100 ha
use munic_PIB_cafe.dta
keep if latif_50perc == 1
summarize

```

```

summarize PIB_munPC, meanonly
scalar media = r(mean)
display "PIB percapita de municipios com pelo menos 50% de propr a partir de 100 ha"
display media    // 36129
clear

```

```

///// PIB percapita municipios com pelo menos 60% de propr a partir de 100 ha
use munic_PIB_cafe.dta
keep if latif_60perc == 1
summarize
summarize PIB_munPC, meanonly
scalar media = r(mean)
display "PIB percapita de municipios com pelo menos 60% de propr a partir de 100 ha"
display media    // 37548
clear

```

```

///// PIB percapita municipios com pelo menos 70% de propr a partir de 100 ha
use munic_PIB_cafe.dta
keep if latif_70perc == 1
summarize
summarize PIB_munPC, meanonly
scalar media = r(mean)
display "PIB percapita de municipios com pelo menos 70% de propr a partir de 100 ha"
display media    // 37607
clear

```

```

///// PIB percapita municipios com pelo menos 80% de propr a partir de 100 ha
use munic_PIB_cafe.dta
keep if latif_80perc == 1
summarize
summarize PIB_munPC, meanonly
scalar media = r(mean)
display "PIB percapita de municipios com pelo menos 80% de propr a partir de 100 ha"
display media    // 38315
clear

```

```

///// PIB percapita municipios com pelo menos 90% de propr a partir de 100 ha
use munic_PIB_cafe.dta
keep if latif_90perc == 1
summarize
summarize PIB_munPC, meanonly
scalar media = r(mean)
display "PIB percapita de municipios com pelo menos 90% de propr a partir de 100 ha"
display media    //
clear

```

```

///// PIB percapita municipios com 100% de propr a partir de 100 ha
use munic_PIB_cafe.dta
keep if latif_100perc == 1
summarize

```

```

summarize PIB_munPC, meanonly
scalar media = r(mean)
display "PIB percapita de municipios com pelo menos 30% de propr a partir de 100 ha"
display media // 38024
clear

```

```

///// PIB percapita de municipios com mais de 13 propr a partir de 100 ha
use munic_PIB_cafe.dta
keep if estab_min100ha > 13
summarize
summarize PIB_munPC, meanonly
scalar media = r(mean)
display "PIB percapita de municipios com mais de 13 propr a partir de 100 ha"
display media // 25839

```

```

///// PIB percapita municipios com cafe
clear
use munic_PIB_cafe.dta
keep if estab_total >= 1
tab latif_30perc
summarize
summarize PIB_munPC, meanonly
scalar media = r(mean)
display "PIB percapita de municipios com pelo menos um estabelecimento cafe"
display media // 28315
drop estab_total estab_min100ha percentual_min100ha latif_30perc

```

```

save munic_PIB.dta, replace
import excel "tabela6956 area munip original.xlsx", sheet("Tabela") cellrange(A8:D5496)
clear
rename A Cod_mun
destring C D, replace ignore("-" "X")
egen cafe_area = rowtotal(C-D)
drop C D
merge 1:1 Cod_mun using munic_PIB_cafe.dta

```

```

*****

```

* COMPARACAO (c) DO ARTIGO – MUNICIPIOS COM MENOS DE 30% E APARTIR DE 30% DE PROPRIEDADES GRANDES (ACIMA DE 100 HECTARES)

```

keep if cafe_area > 0
summarize
summarize PIB_munPC, meanonly
scalar media = r(mean)
display "PIB percapita de municipios com pelo menos um HECTARE de cafe"
display media // 27046
ttest PIB_munPC, by(latif_30perc) unequal
ranksum PIB_munPC, by(latif_30perc) // verificar
tab latif_30perc
gen log_PIB = log(PIB_munPC)

```

```
ttest log_PIB, by(latif_30perc) unequal
```

// os testes anteriores das faixas de area nao consideraram o filtro de area de cafe > 0 - a seguir estao os resultados corretos

// quando aplicado o filtro de area de cafe > 0 e considerando apenas municipios com 30% ou mais de propriedades a partir de 100 hectares foram filtrados 151 municipios de 1288 com pelo menos um hectare de cafe.

```
drop _merge
merge 1:1 Cod_mun using estab_cafe_area.dta
keep if _merge==3
drop _merge
summarize
summarize PIB_munPC, meanonly
scalar media = r(mean)
display media // 26791
// PIB per capita médio dos 1.288 municípios com lavouras cafeeiras
///// ANOVA diferenciacao da media em diferentes faixas percentuais de latifundios
oneway PIB_munPC faixa_perc_latif, tabulate bonferroni
// oneway PIB_munPC faixa_perc_latif, tabulate welch
robvar PIB_munPC, by(faixa_perc_latif)
// ssc install pwmc
pwmc PIB_munPC, over(faixa_perc_latif) pval
regress PIB_munPC faixa_perc_latif
// Concluida: Análise da Disparidade Econômica entre Grupos de Municípios
save munic_PIB_cafe.dta, replace
```

```
*****
```

* COMPARACAO (a) DO ARTIGO – COMPARACAO MUNICIPIOS COM CAFE E CONCENTRACOES URBANAS

```
drop latif_10perc latif_20perc latif_30perc latif_40perc latif_50perc latif_60perc latif_70perc
latif_80perc latif_90perc latif_100perc
summarize cafe_area
summarize estab_total
drop B cafe_area estab_total estab_min100ha percentual_min100ha faixa_perc_latif
gen mun_com_cafe = 1
save munic_PIB_cafe.dta, replace
clear
import excel "PIB dos Municípios - base de dados 2010-2021.xlsx", sheet("PIB dos
Municípios") cellrange(A2:AN66826)
rename A Ano
keep if Ano==2020
drop B C D E F I J K L M N O P Q R S U V W X Y Z AA AB AC AD AE AF AG AH AI AJ
AK AL AM
keep if T!=. // mantem apenas municipios em concentracao urbana
summarize
gen urbano = 1
drop T
```

```

rename AN PIB_munPC
rename G Cod_mun
rename H Munic
summarize
tostring Cod_mun, replace format(%07.0f)
merge 1:1 Cod_mun using munic_PIB_cafe.dta
replace urbano = 0 if urbano == .
keep if _merge!=3
drop _merge
ttest PIB_munPC, by(urbano) unequal

```

```
/*
```

O teste t de Welch indicou diferença significativa no PIB per capita entre municípios urbanos (M = R\$ 40.856, DP = 41.916) e não urbanos (M = R\$ 25.728, DP = 22.839), $t(666,83) = -7,75$; $p < 0,001$. A diferença média foi de R\$ 15.127 (IC95% [-18.961; -11.293]), evidenciando que municípios urbanos apresentam PIB per capita superior.

```
*/
```

```

histogram PIB_munPC, normal
swilk PIB_munPC if urbano==0
swilk PIB_munPC if urbano==1
ranksum PIB_munPC, by(urbano)

```

```

drop log_PIB
gen log_PIB = log(PIB_munPC)
ttest log_PIB, by(urbano) unequal

```

***** FIM DO CODIGO DE REPLICACAO

APÊNDICE 6 – REPLICAÇÃO DOS RESULTADOS DO CAPÍTULO 7

Este apêndice apresenta os procedimentos computacionais e as respectivas saídas utilizadas para a replicação dos resultados empíricos reportados no Capítulo 7 desta tese. As rotinas foram implementadas no *software* Stata, contemplando todas as etapas do desenho empírico: estimação do modelo de escore de propensão, pareamento (*matching*), testes de balanceamento, estimação do efeito médio do tratamento sobre os tratados (ATT), análise de sensibilidade e estimação por diferenças-em-diferenças (DiD).

A estratégia empírica segue três etapas principais:

1. Estimação do escore de propensão via modelo logit;
2. Aplicação do método de pareamento (*Propensity Score Matching* – PSM);
3. Avaliação de robustez por meio de testes de balanceamento, análise de sensibilidade (*sensatt*) e modelo de diferenças-em-diferenças (DiD).

O código apresentado abaixo permite a replicação completa dos resultados do Capítulo 7, como segue.

Stata

```
*****
* APÊNDICE DE REPLICAÇÃO - CAPÍTULO 7
* Tese de Doutorado
* Tópico: A Dinâmica do Prêmio Verde
*****
```

```
clear all
set more off
set maxvar 10000
```

```
* =====
* FASE I: PREPARAÇÃO DOS DADOS E CONSTRUÇÃO DO PAINEL
* =====
```

```
* -----
* 1. DEFINIÇÃO DE DIRETÓRIOS
* -----
```

```
// Substitua os caminhos abaixo pelos diretórios locais do seu computador
global raw_data "C:\seu_diretorio"
global stata_dir " C:\seu_diretorio "
```

```
cd "$stata_dir"
```

```
* -----
* 2. CARREGAMENTO E TRATAMENTO - CENSO 2017
* -----
```

```
// ---> Número de Estabelecimentos
import excel "$raw_data\tabela6956 - estab.xlsx", sheet("Número de estabelecimentos a...")
cellrange(A8:D5497) clear
rename A Cod_mun
rename B Municipio
rename C Estab_arabica
rename D Estab_conilon
reshape long Estab_, i(Cod_mun) j(Especie) string
gen Arabica = (Especie == "arabica")
drop Especie
save estab_cafe.dta, replace
```

```
// ---> Área da Lavoura e Área Média
import excel "$raw_data\tabela6956 - estab.xlsx", sheet("Área total existente na data...")
cellrange(A8:D5497) clear
rename A Cod_mun
drop B
rename C Arealavoura_arabica
rename D Arealavoura_conilon
reshape long Arealavoura_, i(Cod_mun) j(Especie) string
gen Arabica = (Especie == "arabica")
drop Especie
merge 1:1 Cod_mun Arabica using estab_cafe.dta
destring Arealavoura_, replace ignore("-" "X")
destring Estab_, replace ignore("-" "X")
generate Areamedia_cafe = Arealavoura_ / Estab_
erase estab_cafe.dta
drop Arealavoura_ Estab__merge
drop in 10980
drop in 10979
save areamedia_cafe.dta, replace
```

```
// ---> Quantidade Vendida
import excel "$raw_data\tabela6956 - estab.xlsx", sheet("Quantidade vendida das lavou...")
cellrange(A8:D5497) clear
rename A Cod_mun
drop B
rename C Quantvend_arabica
rename D Quantvend_conilon
save quantvend_cafe.dta, replace
```

```
// ---> Valor de Venda e Faturamento Médio
import excel "$raw_data\tabela6956 - estab.xlsx", sheet("Valor da venda das lavouras ...")
cellrange(A8:D5497) clear
rename A Cod_mun
drop B
rename C Valorvend_arabica
rename D Valorvend_conilon
merge 1:1 Cod_mun using quantvend_cafe.dta
```

```

destring Valorvend_arabica Valorvend_conilon Quantvend_arabica Quantvend_conilon,
replace ignore("-" "X")
generate Faturmedio_arabica = Valorvend_arabica / Quantvend_arabica
generate Faturmedio_conilon = Valorvend_conilon / Quantvend_conilon
erase quantvend_cafe.dta
drop Valorvend_arabica Valorvend_conilon Quantvend_arabica Quantvend_conilon _merge
reshape long Faturmedio_, i(Cod_mun) j(Especie) string
gen Arabica = (Especie == "arabica")
drop Especie
gen log_faturmedio = log(Faturmedio_ + 1)
save faturmedio_cafe.dta, replace

```

```

// ---> Produção Orgânica (Agro do Município)
import excel "$raw_data\tabela6854 - organica.xlsx", sheet("Tabela") cellrange(A8:J5571)
clear
rename A Cod_mun
drop B C D
rename E estabelecimentos
rename F organicos
rename G organic_vegetal
rename H organic_animal
rename I organic_vegetal_animal
rename J nao_organico
drop in 5564
destring organicos organic_vegetal organic_animal organic_vegetal_animal nao_organico,
replace ignore("-")
replace organic_vegetal = 0 if missing(organic_vegetal)
replace organic_vegetal_animal = 0 if missing(organic_vegetal_animal)
replace estabelecimentos = 0 if missing(estabelecimentos)
generate share_organica = (organic_vegetal + organic_vegetal_animal) / estabelecimentos
gen algum_organico = 0
replace algum_organico = 1 if organic_vegetal > 0
replace algum_organico = 1 if organic_vegetal_animal > 0
drop estabelecimentos organicos organic_vegetal organic_animal organic_vegetal_animal
nao_organico
save share_organicos.dta, replace

```

```

// ---> Total de Estabelecimentos do Município
import excel "$raw_data\tabela6874 - maquinas.xlsx", sheet("Número de estabelecimentos
a...") cellrange(A7:E5570) clear
rename A Cod_mun
drop B C D
rename E estab_municipio
drop in 5564
save estab_municipio.dta, replace

```

```

// ---> Irrigação
import excel "$raw_data\tabela6859 - irriga.xlsx", sheet("Tabela") cellrange(A7:E5482) clear
rename A Cod_mun
drop B C D

```

```

rename E estab_irriga
drop in 5476
merge 1:1 Cod_mun using estab_municipio.dta
keep if _merge == 3
generate irriga_share = estab_irriga / estab_municipio
drop _merge estab_irriga estab_municipio
save irriga_share.dta, replace

// ---> Armazéns
import excel "$raw_data\tabela6868 - armazen.xlsx", sheet("Número de estabelecimentos
a...") cellrange(A7:E4743) clear
rename A Cod_mun
drop B C D
rename E estab_armaz
merge 1:1 Cod_mun using estab_municipio.dta
keep if _merge == 3
generate armazen_share = estab_armaz / estab_municipio
drop _merge estab_armaz estab_municipio
save armazen_share.dta, replace

// ---> Máquinas e Tratores
import excel "$raw_data\tabela6874 - maquinas.xlsx", sheet("Número de tratores,
implemen...") cellrange(A7:E5569) clear
rename A Cod_mun
drop B C D
rename E estab_maquinas
merge 1:1 Cod_mun using estab_municipio.dta
keep if _merge == 3
destring estab_maquinas, replace ignore("-" "X")
generate maquina_share = estab_maquinas / estab_municipio
drop _merge estab_maquinas estab_municipio
erase estab_municipio.dta
save maquina_share.dta, replace

// ---> Escolaridade
import excel "$raw_data\tabela6779 - escola.xlsx", sheet("Tabela") cellrange(A9:S5571) clear
rename A Cod_mun
drop B C D
destring F G H I J K L M N O P Q R S, replace ignore("-")
rename E totalresp
egen nao_escola = rowtotal(F S)
drop F S
egen alfabetizado = rowtotal(G H)
drop G H
egen fundamental = rowtotal(I J K L)
drop I J K L
egen medio = rowtotal(M N O P)
drop M N O P
generate superior = Q
generate posgrad = R

```

```

drop Q R
replace nao_escola = 0 if missing(nao_escola)
replace alfabetizado = 0 if missing(alfabetizado)
replace fundamental = 0 if missing(fundamental)
replace medio = 0 if missing(medio)
replace superior = 0 if missing(superior)
replace posgrad = 0 if missing(posgrad)
generate indice_escolar = (alfabetizado * 2 + fundamental * 9 + medio * 12 + superior * 16 +
posgrad * 18) / totalresp
drop totalresp nao_escola alfabetizado fundamental medio superior posgrad
save estab_estudoindex.dta, replace

// ---> Orientação Técnica
import excel "$raw_data\tabela6779 - orienta.xlsx", sheet("Tabela") cellrange(A9:G5571)
clear
rename A Cod_mun
destring F, replace ignore("-")
replace F = 0 if missing(F)
generate share_orienta = F / E
drop B C D E F G
save estab_orienta.dta, replace

// ---> CONSOLIDAÇÃO CENSO 2017
clear
use share_organicos.dta
merge 1:1 Cod_mun using irriga_share.dta
keep if _merge == 3
drop _merge
merge 1:1 Cod_mun using armazen_share.dta
keep if _merge == 3
drop _merge
merge 1:1 Cod_mun using maquina_share.dta
keep if _merge == 3
drop _merge
merge 1:1 Cod_mun using estab_orienta.dta
keep if _merge == 3
drop _merge
merge 1:1 Cod_mun using estab_estudoindex.dta
keep if _merge == 3
drop _merge
save variaveis_agro.dta, replace

clear
use faturmedio_cafe.dta
drop if missing(Faturmedio_)
merge 1:1 Cod_mun Arabica using areamedia_cafe.dta
keep if _merge == 3
drop _merge
merge m:1 Cod_mun using variaveis_agro.dta
keep if _merge == 3

```

```
drop _merge
erase areamedia_cafe.dta
save varcenso2017.dta, replace
```

```
* -----
* 3. CARREGAMENTO E TRATAMENTO - CENSO 2006
* -----
```

```
// ---> Estabelecimentos e Área
clear
import excel "$raw_data\2006-tabela1821.xlsx", sheet("Número de estabelecimentos a...")
cellrange(A6:E5375) clear
rename A Cod_mun
rename B Municipio
drop C
rename D Estab_arabica
rename E Estab_conilon
reshape long Estab_, i(Cod_mun) j(Especie) string
gen Arabica = (Especie == "arabica")
drop Especie
save estab_cafe.dta, replace
```

```
import excel "$raw_data\2006-tabela1821.xlsx", sheet("Área plantada nos estabelec...")
cellrange(A6:E5375) clear
rename A Cod_mun
drop B C
rename D Arealavoura_arabica
rename E Arealavoura_conilon
reshape long Arealavoura_, i(Cod_mun) j(Especie) string
gen Arabica = (Especie == "arabica")
drop Especie
merge 1:1 Cod_mun Arabica using estab_cafe.dta
destring Arealavoura_, replace ignore("-" "X")
destring Estab_, replace ignore("-" "X")
generate Areamedia_cafe = Arealavoura_ / Estab_
erase estab_cafe.dta
drop Arealavoura_ Estab_ _merge
save areamedia_cafe.dta, replace
```

```
// ---> Quantidade e Valor de Venda (Faturamento 2006)
import excel "$raw_data\2006-tabela1821.xlsx", sheet("Quantidade vendida nos estab...")
cellrange(A6:E5375) clear
rename A Cod_mun
drop B C
rename D Quantvend_arabica
rename E Quantvend_conilon
save quantvend_cafe.dta, replace
```

```
import excel "$raw_data\2006-tabela1821.xlsx", sheet("Valor das vendas dos estabel...")
cellrange(A6:E5375) clear
```

```

rename A Cod_mun
drop B C
rename D Valorvend_arabica
rename E Valorvend_conilon
merge 1:1 Cod_mun using quantvend_cafe.dta
destring Valorvend_arabica Valorvend_conilon Quantvend_arabica Quantvend_conilon,
replace ignore("-" "X")
generate Faturmedio_arabica = Valorvend_arabica / Quantvend_arabica
generate Faturmedio_conilon = Valorvend_conilon / Quantvend_conilon
erase quantvend_cafe.dta
drop Valorvend_arabica Valorvend_conilon Quantvend_arabica Quantvend_conilon _merge
reshape long Faturmedio_, i(Cod_mun) j(Especie) string
gen Arabica = (Especie == "arabica")
drop Especie
drop if missing(Faturmedio_)
merge 1:1 Cod_mun Arabica using areamedia_cafe.dta
keep if _merge == 3
drop _merge
gen log_faturmedio = log(Faturmedio_ + 1)
save 2006fatur_area_media_cafe.dta, replace

// ---> Orgânicos 2006
import excel "$raw_data\2006_tabela853_organicos.xlsx", sheet("Tabela")
cellrange(A7:I5554) clear
rename A Cod_mun
drop B C D G H I
destring E F, replace ignore("-")
generate share_organica = F / E
replace F = 0 if missing(F)
gen algum_organico = 0
replace algum_organico = 1 if F > 0
drop E F
save share_organicos.dta, replace

// ---> Orientação Técnica 2006
import excel "$raw_data\2006_tabela3373_orientacao.xlsx", sheet("Tabela")
cellrange(A11:K5380) clear
rename A Cod_mun
drop B C G K
destring D E F H I J, replace ignore("-")
replace D = 0 if missing(D)
replace E = 0 if missing(E)
replace F = 0 if missing(F)
replace H = 0 if missing(H)
replace I = 0 if missing(I)
replace J = 0 if missing(J)
generate share_orienta_arabica = (F + E) / D
generate share_orienta_conilon = (I + J) / H
drop D E F H I J
reshape long share_orienta_, i(Cod_mun) j(Especie) string

```

```

gen Arabica = (Especie == "arabica")
drop Especie
rename share_orienta_ share_orienta
drop if missing(share_orienta)
save share_orienta.dta, replace

// ---> Escolaridade 2006
import excel "$raw_data\2006_tabela3373_escolaridade.xlsx", sheet("Tabela")
cellrange(A10:AC5379) clear
rename A Cod_mun
drop B C
destring D E F G H I J K L M N O P Q R S T U V W X Y Z AA AB AC, replace ignore("-")

// Arabica
rename D totalresp
rename P nao_escola
egen alfabetizado = rowtotal(E O)
drop E O
egen fundamental = rowtotal(G F)
drop G F
egen medio = rowtotal(I H)
drop I H
egen superior = rowtotal(J K L M N)
drop J K L M N
replace totalresp = 0 if missing(totalresp)
replace nao_escola = 0 if missing(nao_escola)
replace alfabetizado = 0 if missing(alfabetizado)
replace fundamental = 0 if missing(fundamental)
replace medio = 0 if missing(medio)
replace superior = 0 if missing(superior)
generate indice_escolar_arabica = (alfabetizado * 2 + fundamental * 9 + medio * 12 +
superior * 16) / totalresp
drop totalresp nao_escola alfabetizado fundamental medio superior

// Conilon
rename Q totalresp
rename AC nao_escola
egen alfabetizado = rowtotal(R AB)
drop R AB
egen fundamental = rowtotal(S T)
drop S T
egen medio = rowtotal(U V)
drop U V
egen superior = rowtotal(W X Y Z AA)
drop W X Y Z AA
replace totalresp = 0 if missing(totalresp)
replace nao_escola = 0 if missing(nao_escola)
replace alfabetizado = 0 if missing(alfabetizado)
replace fundamental = 0 if missing(fundamental)
replace medio = 0 if missing(medio)

```

```

replace superior = 0 if missing(superior)
generate indice_escolar_conilon = (alfabetizado * 2 + fundamental * 9 + medio * 12 +
superior * 16) / totalresp
drop totalresp nao_escola alfabetizado fundamental medio superior

```

```

reshape long indice_escolar_, i(Cod_mun) j(Especie) string
gen Arabica = (Especie == "arabica")
drop Especie
drop if missing(indice_escolar_)
rename indice_escolar_ indice_escolar
save estab_estudoindex.dta, replace

```

```

// ---> Irrigação 2006
import excel "$raw_data\2006_tabela1179_irrigacao.xlsx", sheet("Tabela")
cellrange(A8:J5377) clear
rename A Cod_mun
drop B C D G J
destring F E H I, replace ignore("-")
replace E = 0 if missing(E)
replace F = 0 if missing(F)
replace H = 0 if missing(H)
replace I = 0 if missing(I)
generate irriga_share_arabica = F / E
generate irriga_share_conilon = I / H
drop E F I H
reshape long irriga_share_, i(Cod_mun) j(Especie) string
rename irriga_share_ irriga_share
gen Arabica = (Especie == "arabica")
drop Especie
drop if missing(irriga_share)
save irriga_share.dta, replace

```

```

// ---> Máquinas 2006
import excel "$raw_data\2006_tabela861_maquinas.xlsx", sheet("Tabela 1")
cellrange(A8:G5555) clear
rename A Cod_mun
drop B C D
destring E F, replace ignore("-" "X")
generate maquina_share = F / E
drop E F G
save maquina_share.dta, replace

```

```

// ---> Armazéns 2006
import excel "$raw_data\2006_tabela857_silos.xlsx", sheet("Número de estabelecimentos
a...") cellrange(A7:E5554) clear
rename A Cod_mun
drop B C D
rename E estab_lav_perm
destring estab_lav_perm, replace ignore("-" "X")
save estab_lavoura.dta, replace

```

```

import excel "$raw_data\2006_tabela857_silos.xlsx", sheet("Número de estabelecimentos
c...") cellrange(A7:E5554) clear
rename A Cod_mun
drop B C D
rename E estab_armaz
destring estab_armaz, replace ignore("-" "X")
merge 1:1 Cod_mun using estab_lavoura.dta
keep if _merge == 3
generate armazen_share = estab_armaz / estab_lav_perm
drop _merge estab_armaz estab_lav_perm
save armazen_share.dta, replace

```

```

// ---> CONSOLIDAÇÃO CENSO 2006
clear
use 2006fatur_area_media_cafe.dta
merge m:1 Cod_mun using share_organicos.dta
keep if _merge == 3
drop _merge
merge 1:1 Cod_mun Arabica using irriga_share.dta
keep if _merge == 3
drop _merge
merge m:1 Cod_mun using armazen_share.dta
keep if _merge == 3
drop _merge
merge m:1 Cod_mun using maquina_share.dta
keep if _merge == 3
drop _merge
merge 1:1 Cod_mun Arabica using share_orienta.dta
keep if _merge == 3
drop _merge
merge 1:1 Cod_mun Arabica using estab_estudoindex.dta
keep if _merge == 3
drop _merge
generate censo2017 = 0
destring Cod_mun, replace
save varcenso2006.dta, replace

```

```

* -----
* 4. CONSOLIDAÇÃO DO PAINEL DE DADOS COMPLETO
* -----

```

```

clear
use varcenso2017.dta
generate censo2017 = 1
destring Cod_mun, replace
append using varcenso2006.dta
save data_frame_completo.dta, replace

```

```

* =====
* FASE II: ANÁLISES ECONOMETRICAS (CAPÍTULO 7)
* =====

// log using "saidas_replicacao_capitulo7.txt", text replace

use data_frame_completo.dta, clear

// Criando a variável de interação para o DiD (Tratamento x Tempo)
gen interacao2 = censo2017 * algum_organico

// Identificação do Pannel: combinando Município e Espécie (Arábica/Conilon)
egen id = group(Cod_mun Arabica)
xtset id censo2017

* -----
* ESTATÍSTICAS DESCRITIVAS: TRANSIÇÃO DE STATUS (SWITCHERS)
* -----
bysort Cod_mun: gen switch = (algum_organico[_n] != algum_organico[_n-1]) if _n>1
tab switch

* -----
* PROPENSITY SCORE MATCHING (PSM) - TABELAS 10 E 11
* -----
set seed 12345

// Tabela 10: Modelo Logit para estimação do Escore de Propensão (com Kernel)
psmatch2 algum_organico Arabica irriga_share Areamedia_cafe maquina_share ///
    share_orienta indice_escolar, out(log_faturmedio) logit kernel

// Tabela 11: Verificação do balanceamento das covariáveis
pstest Arabica irriga_share Areamedia_cafe maquina_share share_orienta indice_escolar, both

* -----
* TESTES DE ROBUSTEZ E SENSIBILIDADE DO PSM
* -----
// Robustez: Inclusão de termos quadráticos e interações
psmatch2 algum_organico c.Arabica##i.Arabica irriga_share ///
    c.Areamedia_cafe##c.Areamedia_cafe maquina_share ///
    share_orienta indice_escolar, out(log_faturmedio) logit

// Tabela 13: Análise de Sensibilidade
// Requer: ssc install sensatt
sensatt log_faturmedio algum_organico, pscore(_pscore)

* -----
* MODELO DE DIFERENÇAS EM DIFERENÇAS (DiD) - TABELA 14
* -----
// Requer: ssc install reghdfe
reghdfe log_faturmedio interacao2 i.censo2017 ///

```

```

    irriga_share Areamedia_cafe ///
    armazen_share maquina_share ///
    share_orienta indice_escolar, ///
    absorb(id) ///
    vce(cluster Cod_mun)

estimates store did_base

* -----
* TESTES DE ROBUSTEZ DO DiD
* -----
// Teste de Placebo in-space
// Requer: ssc install didplacebo
set seed 123
didplacebo did_base, treatvar(interacao2) pbounit repeat(500)

// Wild Cluster Bootstrap (Tabela 14 - p-valor robusto)
// Requer: ssc install boottest
estimates restore did_base

set seed 123
boottest interacao2, cluster(Cod_mun) reps(9999)

*** FIM DO CÓDIGO DE REPLICAÇÃO ***

```

APÊNDICE 7 – DETALHAMENTO METODOLÓGICO DO CAPÍTULO 8

Este apêndice detalha os procedimentos empíricos adotados no estudo, desde a preparação da base de dados até a estimação do modelo final de Propensity Score Matching (PSM), com base nos resultados gerados pelo software Stata.

A7.1. Processo de Extração e Consolidação dos Dados

A base de dados utilizada neste estudo foi construída a partir de um processo sistemático de extração e consolidação de dados brutos obtidos do Banco Central do Brasil. O processo seguiu as seguintes etapas:

1. **Obtenção dos Dados Brutos:** Foram baixados os arquivos anuais de microdados do SICOR para o período de 2013 a 2023, totalizando 11 arquivos no formato CSV compactados (.gz).
2. **Extração e Filtragem por Ano:** Para cada ano, os dados foram importados para o Stata e filtrados para reter apenas as operações relacionadas à cafeicultura, utilizando os códigos de empreendimento específicos para café Arábica e Conilon.
3. **Consolidação Anual:** Os dados filtrados de cada ano foram salvos em arquivos individuais no formato .dta.
4. **Append dos Arquivos Anuais:** Todos os arquivos anuais foram consolidados em uma única base de dados compreendendo o período de 2013 a 2023.
5. **Exclusão de 2013:** Conforme justificado na seção 3.1, os dados de 2013 foram excluídos da amostra final devido a problemas de consistência.
6. **Tratamento Final:** Foram aplicados tratamentos adicionais nas variáveis e criadas as variáveis analíticas necessárias para o estudo.

Todo o processo foi documentado em registros de obtenção de dados e implementado por meio de scripts em Stata (disponíveis no Apêndice 8).

A7.2. Preparação da Base de Dados e Construção das Variáveis

Assim, a análise utiliza microdados de financiamentos do Crédito Rural e Proagro, disponibilizados pelo Banco Central do Brasil, para o período de 2014 a 2023. O dataset inicial continha 665.986 registros.

As principais variáveis foram construídas da seguinte forma:

- Variável de Tratamento (organica): Uma variável binária que assume valor 1 se o financiamento foi classificado como "Orgânico" (código 8) ou "Agroecológico/Sintrópico" (código 9). Foram identificados 280 financiamentos no grupo de tratamento.
- Variável de Resultado (LOGreceitaPORTonelada): O logaritmo natural da receita por tonelada, calculado como $\log(\text{vl_receita_bruta_esperada} / \text{vl_prev_prod})$.
- Covariáveis:
 - especie: Variável binária (1 para café Arábica, 0 para Conilon).
 - vl_area_informada: Área em hectares, como proxy para o porte do produtor.
 - irriga: Variável binária (1 se utiliza irrigação, 0 caso contrário).
 - ano: Variáveis indicadoras para cada ano da amostra.

A7.3. Estimação via Propensity Score Matching (PSM)

Para isolar o efeito, foi aplicado o PSM. O modelo final escolhido (denominado PSM_AEI no relatório de análise) foi o que apresentou o melhor balanceamento das covariáveis.

Passo 1: Estimação do Escore de Propensão (Modelo Logit). A probabilidade de receber o tratamento (organica=1) foi estimada com um modelo logístico. A Tabela 33 apresenta os resultados desta estimação.

Tabela 33 - Resultados do modelo logit para o escore de propensão

Variável	Coefficiente	Erro Padrão	z	P> z
especie	1,0161	0,2703	3,76	0,000
vl_area_informada	0,0001	0,0015	0,08	0,935
irriga	1,1226	0,2496	4,50	0,000
ano	0,0587	0,0200	2,94	0,003
_cons	-127,3586	40,3476	-3,16	0,002
Observações	658.057			
Pseudo R ²	0,0058			

Fonte: elaboração própria com base nos microdados do Banco Central do Brasil (2025).

Passo 2: Pareamento e Estimação do Efeito Médio do Tratamento sobre os Tratados (ATT). Após o pareamento, o ATT foi estimado, conforme Tabela 17, apresentada no capítulo 8.

Passo 3: Verificação do Balanceamento das Covariáveis. A validade do PSM depende do balanceamento das covariáveis após o pareamento. A Tabela 16, do capítulo 8, baseada no comando pstest, demonstra a eficácia do procedimento.

Após o pareamento, o viés padronizado de todas as covariáveis foi reduzido para níveis muito baixos, e as diferenças de médias se tornaram estatisticamente não significativas, atestando a qualidade do pareamento. O Pseudo R^2 do modelo logit caiu para 0.000, e o teste qui-quadrado da razão de verossimilhança tornou-se não significativo ($p=0,999$), confirmando o balanceamento.

A7.4. Análise de Dados em Painel

Para a análise de dados em painel, a estrutura dos dados foi configurada definindo-se o produtor (ref_bacen) como unidade de corte transversal e uma variável de tempo única (time_id) criada a partir do ano e da ocorrência da operação.

A escolha do modelo seguiu os seguintes passos de diagnóstico:

1. Teste de Hausman: Comparou-se o modelo de Efeitos Aleatórios (Random Effects) com o de Efeitos Fixos (Fixed Effects). O teste resultou em um $\chi^2 = 419,43$ ($p < 0,0000$), rejeitando a hipótese nula e indicando a preferência pelo modelo de Efeitos Fixos.
2. Tratamento de Singletons: A tentativa de estimar um modelo com efeitos fixos duplos (produtor e ano) resultou na perda de 649.725 observações (singletons — produtores que aparecem apenas uma vez na amostra ou não apresentam variabilidade temporal suficiente), restando apenas 8.335 observações. Devido à drástica redução amostral, este modelo foi descartado.
3. Modelo Final: Optou-se pelo estimador de efeitos fixos de ano (absorb(ano)) com erros padrão robustos clusterizados no nível do produtor. Este modelo preservou a amostra completa ($N=658.060$) e controlou para choques temporais comuns. Os resultados da regressão de dados em painel foram apresentados na Tabela 18, do capítulo 8.

APÊNDICE 8 – REPLICAÇÃO DOS RESULTADOS DO CAPÍTULO 8

O código apresentado abaixo permite a replicação completa dos resultados do Capítulo 8, incluindo:

Extração, filtragem e consolidação dos dados brutos do SICOR/BACEN

Preparação das variáveis analíticas

Estimação do modelo MQO (Tabela 15)

Aplicação do Propensity Score Matching - PSM (Tabelas 16 e 17)

Análise de dados em painel com efeitos fixos de ano (Tabela 18)

Pacotes Stata necessários: `psmatch2` (para PSM) e `reghdfe` (para modelos de efeitos fixos de alta dimensão).

Stata

* APÊNDICE DE REPLICAÇÃO - CAPÍTULO 8

* Tese de Doutorado

* Tópico: Impacto da Rotulagem no Faturamento da Cafeicultura

*** PARTE 1: EXTRAÇÃO, FILTRAGEM E CONSOLIDAÇÃO DOS DADOS BRUTOS

* NOTA: Esta seção assume que o usuário fez o download dos arquivos anuais

* (ex: SICOR_OPERACAO_BASICA_ESTADO_2023.csv) do portal do Banco Central

* e os colocou em um diretório chamado "DADOS BRUTOS - SICOR".

* O usuário deve ajustar os caminhos de diretório ("seu_diretorio") para sua máquina.

clear

// Lista de anos para processar

local anos "2023 2022 2021 2020 2019 2018 2017 2016 2015 2014 2013"

// Loop para processar cada arquivo anual

foreach ano of local anos {

 di "Processando ano: `ano'"

 // Importa o arquivo CSV do ano correspondente

 // ATENÇÃO: Substitua pelo seu caminho local

 import delimited "seu_diretorio\DADOS BRUTOS - SICOR\SICOR_OPERACAO_BASICA_ESTADO_`ano`\SICOR_OPERACAO_BASICA_ESTADO_`ano'.csv", clear

 // Filtra para manter apenas as operações de financiamento de café

 keep if inlist(cd_empreendimento, 12011580048041, 12011580048043, ///

12011580048051, 12011580048042, 12011580048052, 12011580260043, ///

12011580260051, 12011580260042, 12011580260041, 12011580260052)

 // Cria a variável de ano

 generate ano_base = `ano'

```

// Converter para numérico (alguns casos)
destring cd_contrato_stn, replace

// Salva um arquivo temporário para cada ano
save "temp_cafe_`ano'.dta", replace
}

// Consolida todos os arquivos anuais em um único dataset
// Carrega o primeiro ano para iniciar o arquivo consolidado
use "temp_cafe_2013.dta", clear

// Anexa os demais anos
forvalues ano = 2014/2023 {
    append using "temp_cafe_`ano'.dta"
}

// Apaga os arquivos temporários
forvalues ano = 2013/2023 {
    erase "temp_cafe_`ano'.dta"
}

// Renomeia a variável de ano para o nome final
rename ano_base ano

// Salva o dataset consolidado final (opcional, mas boa prática)
save "sikor_cafe_2013_a_2023_consolidado.dta", replace

*****
* PARTE 2: PREPARAÇÃO DA AMOSTRA E ANÁLISE ECONOMETRICA
* NOTA: Esta seção utiliza o dataset consolidado criado na Parte 1.
*****

use "sikor_cafe_2013_a_2023_consolidado.dta", clear

// Remove os dados de 2013, conforme justificado no artigo
drop if ano == 2013

// Cria a variável de tratamento (dummy 'organica')
generate organica = 0
replace organica = 1 if inlist(cd_tipo_agricultura, 8, 9)

// Cria a variável de resultado (log da receita por tonelada)
generate receitaPORtonelada = vl_receita_bruta_esperada / vl_prev_prod
generate LOGreceitaPORtonelada = log(receitaPORtonelada)

// Cria a variável de controle para irrigação (dummy 'irriga')
generate irriga = 0
replace irriga = 1 if inlist(cd_tipo_irrigacao, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11)

// Cria a variável de controle para espécie (dummy 'especie')
generate especie = .
// Códigos para Café Arábica
replace especie = 1 if inlist(cd_empreendimento, 12011580048041, 12011580048043, ///
12011580048051, 12011580048042, 12011580048052)

```

```

// Códigos para Café Conilon
replace especie = 0 if inlist(cd_empreendimento, 12011580260043, 12011580260051, ///
12011580260042, 12011580260041, 12011580260052)

*** ANÁLISE DESCRITIVA E VIÉS PADRONIZADO (BASE PARA TABELA 1)
// O loop abaixo calcula o viés padronizado para as covariáveis na amostra
// não pareada, útil para justificar a necessidade do PSM.
foreach var in especie vl_area_informada irriga ano {
    quietly mean `var' if organica == 1
    local mean_treat = e(b), 1, 1)
    quietly mean `var' if organica == 0
    local mean_control = e(b), 1, 1)
    quietly summarize `var' if organica == 1
    local var_treat = r(Var)
    quietly summarize `var' if organica == 0
    local var_control = r(Var)
    local bias = 100 * (`mean_treat' - `mean_control') / sqrt((`var_treat' + `var_control')/2)

    display "Viés padronizado para `var': " %4.1f `bias' %"
}

*** Estimação do modelo MQO
regress LOGreceitaPORtonelada organica especie vl_area_informada

*** Estimação do modelo PSM_AEI (Replicação dos resultados principais)
// NOTA: Para executar, o pacote psmatch2 deve estar instalado (ssc install psmatch2)
psmatch2 organica especie vl_area_informada irriga ano, out(LOGreceitaPORtonelada) logit

// Verifica o balanceamento das covariáveis após o pareamento
pstest

*** ANÁLISE DE DADOS EM PAINEL - ESTIMAÇÃO E TESTES

// DIAGNÓSTICO INICIAL DA ESTRUTURA DO PAINEL
// Verificar duplicatas de tempo dentro dos painéis
duplicates report ref_bacen ano

// Criar identificador de tempo único para resolver duplicatas
sort ref_bacen ano
by ref_bacen ano: gen subtime = _n
egen time_id = group(ano subtime)

// CONFIGURAÇÃO DA ESTRUTURA DO PAINEL
xtset ref_bacen time_id

// TESTE DE HAUSMAN PARA ESCOLHA ENTRE EFEITOS FIXOS E ALEATÓRIOS

// Modelo de Efeitos Aleatórios (sob H0 do teste de Hausman)
xtreg LOGreceitaPORtonelada organica especie vl_area_informada irriga i.ano, re
estimates store random_effects

// Modelo de Efeitos Fixos (sob H1 do teste de Hausman)
xtreg LOGreceitaPORtonelada organica especie vl_area_informada irriga i.ano, fe
estimates store fixed_effects

```

```
// Teste de Hausman formal
hausman fixed_effects random_effects
```

```
// MODELOS ALTERNATIVOS CONSIDERADOS
```

```
// Modelo 1: Efeitos Fixos com cluster no nível do produtor
xtreg LOGreceitaPORtonelada organica especie vl_area_informada irriga i.ano, fe vce(cluster
ref_bacen)
```

```
// Modelo 2: Efeitos Fixos Duplos (produtor e ano) - reghdfe
// Nota: Este modelo resulta em perda massiva de observações (singletons)
reghdfe LOGreceitaPORtonelada organica especie vl_area_informada irriga, ///
absorb(ref_bacen ano) vce(cluster ref_bacen ano)
```

```
// MODELO FINAL SELECIONADO
```

```
// Justificativa:
```

```
// - Teste de Hausman rejeitou efeitos aleatórios (p = 0.0000)
// - Efeitos fixos duplos perdem muitas observações por singletons
// - Efeitos fixos de ano preservam amostra e fornecem estimativas consistentes
```

```
reghdfe LOGreceitaPORtonelada organica especie vl_area_informada irriga, ///
absorb(ano) vce(cluster ref_bacen)
```

```
// Nota: Coeficientes interpretados como efeito parcial da agricultura orgânica
// sobre o log da receita por tonelada, controlando por fatores anuais comuns
// e características observáveis da produção.
```

```
*** FIM DO CÓDIGO DE REPLICAÇÃO ***
```