



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ECONOMIA RURAL – PPGER

VITÓRIA MARIA OLIVEIRA ARRUDA

**DESMATAMENTO E CONFORMIDADE AO CÓDIGO FLORESTAL BRASILEIRO:
O IMPACTO DO CADASTRO AMBIENTAL RURAL NAS FRONTEIRAS
AGRÍCOLAS DO CENTRO-OESTE E DO MATOPIBA**

FORTALEZA

2025

VITÓRIA MARIA OLIVEIRA ARRUDA

DESMATAMENTO E CONFORMIDADE AO CÓDIGO FLORESTAL BRASILEIRO: O
IMPACTO DO CADASTRO AMBIENTAL RURAL NAS FRONTEIRAS AGRÍCOLAS
DO CENTRO-OESTE E DO MATOPIBA

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Economia Rural da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre.

Área de concentração: Políticas Públicas e Desenvolvimento Rural.

Orientador: Prof. Dr. Edward Martins Costa

Coorientadora: Prof.a Dra. Lilian Lopes Ribeiro

Coorientador: Prod. Dr. Guilherme Irffi

FORTALEZA

2025

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Sistema de Bibliotecas

Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

- A819d Arruda, Vitória Maria Oliveira.
Desmatamento e conformidade ao código florestal brasileiro: : O impacto do Cadastro Ambiental Rural nas fronteiras agrícolas do Centro-Oeste e do Matopiba / Vitória Maria Oliveira Arruda. – 2025.
66 f. : il. color.
- Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Ciências Agrárias, Programa de Pós-Graduação em Economia Rural, Fortaleza, 2025.
Orientação: Prof. Dr. Edward Martins Costa.
Coorientação: Prof. Dr. Lilian Lopes Ribeiro e Prof. Dr. Guilherme Irffi.
1. Fronteira agrícola. 2. Matopiba. 3. Centro-Oeste. 4. Imóveis rurais. 5. Cadastro Ambiental Rural. I. Título.

CDD 338.1

VITÓRIA MARIA OLIVEIRA ARRUDA

DESMATAMENTO E CONFORMIDADE AO CÓDIGO FLORESTAL BRASILEIRO: O
IMPACTO DO CADASTRO AMBIENTAL RURAL NAS FRONTEIRAS AGRÍCOLAS
DO CENTRO-OESTE E DO MATOPIBA

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Economia Rural da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre.

Orientador: Prof. Dr. Edward Martins Costa
Coorientadora: Prof.a Dra. Lilian Lopes Ribeiro
Coorientador: Prof. Dr. Guilherme Irffi

Aprovada em: 29/01/2025

BANCA EXAMINADORA

Dr. Edward Martins Costa (Presidente)
Universidade Federal do Ceará (PPGER/UFC)

Dr. Cícero Francisco de Lima (membro interno)
Universidade Federal do Ceará (PPGER/UFC)

Dra. Lilian Lopes Ribeiro (membro externo)
Universidade Federal do Ceará (*Campus* Sobral)

Dr. Guilherme Irffi (membro externo)
Universidade Federal do Ceará (CAEN/UFC)

Dr. Ricardo Dislich (membro externo)
Ministério do Planejamento e Orçamento (MPO)

AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador, Prof. Dr. Edward Martins Costa, pela confiança, parceria e gentileza durante toda nossa trajetória, que remonta à graduação. Tenho profundo respeito e admiração pelo seu trabalho como docente e pesquisador. Aos meus coorientadores, Prof.a Dra. Lilian Lopes Ribeiro e Prof. Dr. Guilherme Irffi, por aceitarem participar da feitura desta dissertação, com suas recomendações e críticas pertinentes.

Ao corpo docente do Programa de Pós-Graduação em Economia Rural (PPGER), na pessoa do coordenador, Prof. Dr. Kilmer Coelho Campos, pela rica experiência acadêmica. Sou também, grata, em especial, ao Prof. Dr. José de Jesus Sousa Lemos, pela motivação e pelos trabalhos desenvolvidos em conjunto.

Aos membros da banca de defesa da dissertação de Mestrado, Prof. Dr. Cícero Francisco de Lima e Dr. Ricardo Dislich, pela disponibilidade em enriquecer este trabalho com sugestões valiosas.

À minha amiga e colega de Mestrado, Vitória Biana, com quem compartilho essa trajetória desde o curso preparatório. Foi uma honra dividir cada momento dessa caminhada, trocando dúvidas, conhecimentos, almoços e risadas. Agradeço por continuar ao meu lado na próxima etapa.

Ao meu amigo e colega de turma, Mauro Uchôa, por quem guardo grande respeito e admiração. Obrigada pela troca de experiências, conversas, caronas, e pela leveza no cotidiano. A sala de estudos não teria a mesma graça sem você.

À minha amiga e colega de turma, Ana Cristina, a quem admiro. Obrigada por esclarecer todas as minhas dúvidas e por suas sugestões e críticas construtivas em todos os meus projetos.

Aos meus amigos Fernando Marciano e Ramon Vasconcelos. Obrigada por compartilharem seu conhecimento comigo em diversos momentos, além de proporcionarem momentos divertidos. Ao meu amigo Marcelo Parahyba Apesar de não dividirmos mais as salas de aula, seguimos compartilhando bons momentos fora delas.

Aos meus amigos Tiago Linhares, Vanessa Vaz, Leonardo Braga e Sandhy Oliveira. Obrigada pelo apoio em cada um dos meus projetos, seja me ouvindo falar incessantemente ou me motivando. A confiança de vocês é fundamental.

Aos meus familiares, especialmente à minha mãe, Fernanda, por todo o suporte, companheirismo e motivação. Ao meu irmão, Vitor Teodósio, a quem admiro incondicionalmente, pela parceria, amizade e apoio constante.

Ao meu amor, Rianne Lopes, por compartilhar seu tempo comigo, ouvindo cada detalhe deste trabalho, oferecendo apoio, motivação e troca de conhecimentos. É uma honra ser acadêmica ao seu lado. Obrigada.

A todos os colegas com quem tive o privilégio de interagir durante o curso.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (Capes) pela concessão da Bolsa de Mestrado, fundamental para a realização deste trabalho.

RESUMO

O desmatamento é uma das principais atividades humanas com efeitos negativos no meio ambiente, contribuindo para a perda de biodiversidade e as mudanças climáticas. No Brasil, a expansão das fronteiras agrícolas foi impulsionada por avanços na pesquisa agropecuária e pelo crédito rural, consolidando o País como um dos maiores exportadores de *commodities*, como milho e soja. Esse crescimento econômico, no entanto, ocorreu a um custo ambiental, especialmente nos biomas Amazônia e Cerrado. Esses biomas abrigam duas importantes fronteiras agrícolas: o Centro-Oeste e o Matopiba, regiões nas quais extensas áreas são destinadas à pastagem e à produção de grãos. O avanço do desmatamento ensejou grandes preocupações na sociedade, culminando na criação do Código Florestal Brasileiro (CF), hoje vigente, que estabeleceu medidas para a preservação das áreas de vegetação nativa. Entre essas medidas, destacam-se a exigência de manutenção de um percentual de Reserva Legal em imóveis rurais, além do estabelecimento do Cadastro Ambiental Rural (CAR), implementado em 2014, que se tornou obrigatório para todos os imóveis rurais. Nesse cenário, esta dissertação teve como objetivos avaliar o impacto do CAR sobre o desmatamento e a conformidade ao Código Florestal em imóveis rurais localizados nas fronteiras agrícolas do Centro-Oeste e do Matopiba, considerando o período de desmatamento de 2008 a 2023. Foram analisados imóveis cadastrados de 2014 a 2021, utilizando o método de Diferenças em Diferenças, proposto por Callaway e Sant'Anna (2021), uma vez que o cadastro no CAR ocorreu em momentos distintos para os imóveis. Os resultados indicaram uma redução no desmatamento em imóveis rurais cadastrados nos anos iniciais da implementação do CAR, mas um aumento nos anos subsequentes. Na fronteira agrícola do Centro-Oeste e do Matopiba, observou-se uma redução no desmatamento para imóveis pequenos cadastrados em 2016, estimada em 2,27% e 2,48%, respectivamente. Em contrapartida, houve aumento de 3,40% para imóveis pequenos e 36,77% para imóveis grandes, ambos cadastrados em 2020, na fronteira do Matopiba. Na fronteira do Centro-Oeste, os imóveis pequenos cadastrados em 2021 também aumentaram o desmatamento, em 8,42%. No estudo de eventos balanceados, observou-se que, quanto maior o tempo de exposição ao tratamento, maior a redução no desmatamento, exceto em imóveis médios no Matopiba. Em relação à conformidade ao CF, verificou-se uma redução na probabilidade de conformidade em imóveis pequenos e médios, em ambas as fronteiras agrícolas. Os resultados evidenciam a necessidade de revisar as estratégias das políticas públicas direcionadas ao cadastro e à regularização ambiental de imóveis rurais. O atraso na análise dos cadastros compromete a credibilidade do CAR, permitindo que o desmatamento, mesmo sob monitoramento, continue ocorrendo. Para conter esse aumento, é preciso fortalecer a articulação entre os entes federativos e investir na ampliação das equipes responsáveis pelas análises, acelerando o processo. Quanto ao âmbito da regularização ambiental, o ICCF pode auxiliar na definição de imóveis prioritários para o Programa de Regularização Ambiental.

Palavras-chave: fronteira agrícola; Matopiba; Centro-Oeste; imóveis rurais; cadastro ambiental rural.

Código JEL: C54. O13. Q58.

ABSTRACT

Deforestation is one of the primary human activities with detrimental effects on the environment, contributing to biodiversity loss and climate change. In Brazil, the expansion of agricultural frontiers has been driven by advancements in agricultural research and rural credit, positioning the country as one of the leading exporters of commodities such as corn and soybeans. However, this economic growth has come at an environmental cost, particularly in the Amazon and Cerrado biomes. These biomes encompass two major agricultural frontiers: the Central-West and Matopiba regions, where extensive areas are allocated for pasture and grain production. The acceleration of deforestation has raised significant societal concerns, leading to the establishment of the Brazilian Forest Code (CF), which introduced measures to preserve native vegetation areas. Among these measures, the requirement for maintaining a percentage of Legal Reserve within rural properties and the implementation of the Rural Environmental Registry (CAR) in 2014 stand out, with CAR registration becoming mandatory for all rural properties. In this context, this dissertation aims to assess the impact of CAR on deforestation and compliance with the Forest Code in rural properties located within the agricultural frontiers of the Central-West and Matopiba, considering deforestation data from 2008 to 2023. The study analyzes properties registered between 2014 and 2021 using the Difference-in-Differences method proposed by Callaway and Sant'Anna (2021), given that CAR registration occurred at different times for different properties. The findings indicate a reduction in deforestation in rural properties registered in the early years of CAR implementation but an increase in subsequent years. In the agricultural frontiers of the Central-West and Matopiba, a reduction in deforestation was observed for small properties registered in 2016, estimated at 2.27% and 2.48%, respectively. Conversely, there was an increase of 3.40% for small properties and 36.77% for large properties registered in 2020 in the Matopiba frontier. In the Central-West frontier, small properties registered in 2021 also experienced an increase in deforestation by 8.42%. In the balanced event study, the results suggest that the longer the exposure to the treatment, the greater the reduction in deforestation, except for medium-sized properties in Matopiba. Regarding compliance with the Forest Code, a decrease in the probability of compliance was observed for small and medium-sized properties in both agricultural frontiers. These findings underscore the need to revise public policy strategies aimed at the registration and environmental regularization of rural properties. The delay in processing CAR registrations undermines its credibility, allowing deforestation to persist despite monitoring efforts. To mitigate this trend, it is essential to strengthen coordination among federal entities and invest in expanding the teams responsible for reviewing registrations, thereby expediting the process. Regarding environmental regularization, the ICCF can assist in identifying priority properties for the Environmental Regularization Program.

Keywords: agricultural frontier; Matopiba; Central-West; rural properties; rural environmental registry.

Jel Code: C54. O13. Q58.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 -	Processo de identificação e extração das sobreposições dos <i>shapefile</i> de imóveis rurais.....	25
Figura 2 -	Processo de interseção dos <i>shapefiles</i> de imóveis com os do desmatamento.....	26
Figura A.1 -	Mapa da fronteira agrícola do Centro-Oeste.....	50
Figura A. 2 -	Mapa da fronteira agrícola do Matopiba.....	50
Figura B. 1 -	Estudo de eventos para imóveis pequenos.....	51
Figura B. 2 -	Estudo de eventos para imóveis médios.....	51
Figura B. 3 -	Estudo de eventos para imóveis grandes.....	52
Figura C. 1 -	Estudo de eventos para imóveis pequenos.....	53
Figura C. 2 -	Estudo de eventos para imóveis médios.....	53
Figura C. 3 -	Estudo de eventos para imóveis grandes.....	54
Figura D. 1 -	Estudo de eventos para a conformidade dos imóveis pequenos.....	55
Figura D. 2 -	Estudo de eventos para a conformidade dos imóveis médios.....	55
Figura D. 3 -	Estudo de eventos para a conformidade dos imóveis grandes.....	56
Figura E. 1 -	Estudo de eventos para a conformidade dos imóveis pequenos.....	57
Figura E. 2 -	Estudo de eventos para a conformidade dos imóveis médios.....	57
Figura E. 3 -	Estudo de eventos para a conformidade dos imóveis grandes.....	58

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 -	Teste-T para a diferença de média do desmatamento antes e depois do tratamento.....	32
Tabela 2 - .	Estimativas dos efeitos heterogêneos de grupos do CAR sobre o desmatamento.....	34
Tabela 3 -	Estimativas do estudo de eventos balanceados para imóveis pequenos.....	35
Tabela 4 -	Estimativas do estudo de eventos balanceados para imóveis médios.....	36
Tabela 5 -	Estimativas do estudo de eventos balanceados para imóveis grandes.....	36
Tabela 6 -	Estimativas dos efeitos heterogêneos de grupos do CAR sobre a conformidade ao Código Florestal.....	37
Tabela 7 -	Estimativas do estudo de eventos balanceados para imóveis pequenos.....	38
Tabela 8 -	Estimativas do estudo de eventos balanceados para imóveis médios.....	39
Tabela F. 1 -	Efeitos heterogêneos do CAR sobre o desmatamento na fronteira do Centro-Oeste.....	59
Tabela F. 2 -	Estimativas do estudo de eventos balanceados na fronteira do Centro-Oeste.....	59
Tabela G. 1 -	Efeitos heterogêneos do CAR sobre o desmatamento na fronteira do Matopiba.....	60
Tabela G. 2 -	Estudo de eventos balanceados para imóveis pequenos na fronteira do Matopiba.....	60
Tabela G. 3 -	Estudo de eventos balanceados para imóveis médios na fronteira do Matopiba.....	61
Tabela G. 4 -	Estudo de eventos balanceados para imóveis grandes na fronteira do Matopiba.....	61
Tabela H. 1 -	Efeitos heterogêneos do CAR sobre a conformidade na fronteira do Centro-Oeste.....	62
Tabela H. 2 -	Estudo de eventos pequenos na fronteira do Centro-Oeste.....	62
Tabela H. 3 -	Estudo de eventos balanceados para imóveis médios na fronteira do Centro-Oeste.....	63

Tabela I. 1 -	Efeitos heterogêneos do CAR sobre a conformidade na fronteira do Matopiba.....	64
Tabela I. 2 -	Estudo de eventos balanceados para imóveis pequenos na fronteira do Matopiba.....	64
Tabela I. 3 -	Estudo de eventos balanceados para imóveis médios na fronteira do Matopiba.....	65

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	14
2 CÓDIGO FLORESTAL BRASILEIRO E O CADASTRO AMBIENTAL RURAL ...	18
3 ASPECTOS METODOLÓGICOS	22
3.1 Mecanismos de Transmissão	22
3.2 Extração e processamento dos dados.....	23
3.2.1 Construção do indicador 1: Evolução do desmatamento nos Imóveis Rurais	23
3.2.2 Construção do indicador 2: Conformidade ao Código Florestal	26
3.3 Estratégia empírica.....	27
3.3.1 Variáveis utilizadas	27
3.3.2 Diferenças em Diferenças (DiD) com múltiplos períodos.....	28
4 RESULTADOS	32
4.1 Efeitos sobre o desmatamento nos imóveis rurais	32
4.2 Efeitos sobre a Conformidade ao Código Florestal.....	37
4.3 Discussão dos resultados	40
4.4 Implicações para potencializar os resultados.....	42
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	44
REFERÊNCIAS	46
APÊNDICE A – DELIMITAÇÃO DAS FRONTEIRAS AGRÍCOLAS	50
APÊNDICE B – ESTUDO DE EVENTOS PARA OS IMÓVEIS RURAIS DO CENTRO-OESTE.....	51
APÊNDICE C – ESTUDO DE EVENTOS PARA OS IMÓVEIS RURAIS DO MATOPIBA	53
APÊNDICE D – ESTUDO DE EVENTOS PARA A CONFORMIDADE DOS IMÓVEIS RURAIS DO CENTRO-OESTE	55
APÊNDICE E – ESTUDO DE EVENTOS PARA A CONFORMIDADE DOS IMÓVEIS RURAIS DO MATOPIBA.....	57
APÊNDICE F – ESTIMATIVAS COMPLETAS DO IMPACTO DO CAR SOBRE O DESMATAMENTO EM IMÓVEIS RURAIS NA FRONTEIRA AGRÍCOLA DO CENTRO-OESTE	59
APÊNDICE G – ESTIMATIVAS COMPLETAS DO IMPACTO DO CAR SOBRE O DESMATAMENTO EM IMÓVEIS RURAIS NA FRONTEIRA AGRÍCOLA DO MATOPIBA	60

APÊNDICE H – ESTIMATIVAS COMPLETAS DO IMPACTO DO CAR SOBRE A CONFORMIDADE AO CÓDIGO FLORESTAL EM IMÓVEIS RURAIS NA FRONTEIRA AGRÍCOLA DO CENTRO-OESTE	62
APÊNDICE I – ESTIMATIVAS COMPLETAS DO IMPACTO DO CAR SOBRE A CONFORMIDADE AO CÓDIGO FLORESTAL EM IMÓVEIS RURAIS NA FRONTEIRA AGRÍCOLA DO MATOPIBA	64
APÊNDICE J – PROCEDIMENTO PARA CONSTRUÇÃO DOS INDICADORES	66

1 INTRODUÇÃO

A modernização do setor agropecuário no Brasil, iniciada em meados de 1960, foi viabilizada por ferramentas como crédito subsidiado, financiamento de capital, extensão rural e pesquisa agropecuária, esta última liderada pela Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA) (Contini *et al.*, 2010). O avanço da tecnologia proporcionou um aumento na área cultivada e na produtividade de culturas diversas, utilizando máquinas e implementos agrícolas, sementes melhoradas, corretivos de solo e agroquímicos. Além disso, a atuação do Estado, por meio de incentivos e infraestrutura, incluindo sistemas de transporte, contribuiu para a expansão das fronteiras agrícolas brasileiras, como as do Centro-Oeste e do Matopiba (Vieira Filho, 2016a; Castanho; Teixeira, 2017).

A expansão acelerada das fronteiras agrícolas, então definidas como áreas territoriais onde ocorrem atividades agropecuárias e que estão em constante crescimento, acompanha o aumento da demanda por alimentos e *commodities*. Para Garcia e Vieira Filho (2017), essa expansão é passível de envolver o desmatamento de áreas florestais, impulsionada pela escassez de recursos ou pelo uso inadequado das práticas de manejo, levando à degradação ambiental.

O Centro-Oeste está inserido predominantemente no Cerrado¹, um bioma² que, apesar de abrigar 5% da biodiversidade da Terra, é também um dos mais ameaçados (Ferraz *et al.*, 2019). Os avanços em pesquisas com foco em adaptação, fertilidade e produtividade, além do aumento da demanda por produtos agrícolas, incorporaram áreas desse bioma na produção agropecuária (Dorneles, 2024; Boaventura; Silva; Dutra e Silva, 2023). Desse modo, com o crescimento da produção intensiva de soja, ocorreu um deslocamento de conglomerados industriais para o Centro-Oeste, juntamente com a absorção de migrantes de outras partes do País (Gallo, 2009). Por essa razão, entende-se que essa região, como um todo, comporta uma fronteira agrícola, que foi denominada neste estudo como a fronteira agrícola do Centro-Oeste.

A expansão da fronteira supracitada constitui um motor importante do crescimento econômico e da mudança no uso da terra, caracterizada pela adoção de técnicas de produção de grãos modernas, de alto rendimento e fortemente mecanizadas, resultando em um aumento significativo nas áreas cultivadas (Silva; Barbosa, 2020). Assim, tornou-se uma das mais relevantes fronteiras do setor agropecuário brasileiro, sendo responsável pela produção

¹ Delimitado de acordo com os critérios estabelecidos pelo IBGE.

² Denominação adotada de acordo com o IBGE.

expressiva de culturas destinadas ao mercado de *commodities*, como algodão, milho, cana-de-açúcar e soja (Brito, 2002; Santos Junior; Tesser; Barcellos, 2009; Vieira Filho, 2016b).

Acompanhando esse processo, a fronteira agrícola do Matopiba experimentou um crescimento econômico considerável nas últimas décadas, impulsionado pela produção de grãos em larga escala e pelo uso de tecnologias apropriadas, a com início na década de 1980 (Pereira; Porcionato; Castro, 2018a; 2018b). A produção agropecuária desempenha um papel central no desenvolvimento econômico da região, enquanto as políticas agrícolas estão habilitadas a reduzir desigualdades e promover a gestão sustentável dos recursos, orientando decisões públicas e privadas em prol do desenvolvimento regional (Buainain; Garcia; Vieira Filho, 2018).

Enquanto a fronteira Centro-Oeste é composta por todos os municípios dos estados que compõem a região homônima, a área fronteira do Matopiba envolve 337 municípios, distribuídos pelos estados que formam o acrônimo (Maranhão, Tocantins, Piauí e Bahia). A inclusão desses municípios considerou suas características naturais, perfil da agropecuária, infraestrutura e condições socioeconômicas locais (Miranda; Magalhães; Carvalho, 2014). A expansão agrícola está concentrada em municípios do bioma Cerrado, que têm aumentos significativos na produção agrícola, no PIB *per capita* e no acesso a bens duráveis e eletricidade em comparação com outros municípios fora da fronteira. (Bragança, 2018).

Apesar dos avanços tecnológicos, a expansão das fronteiras agrícolas e a intensificação do uso de capital e tecnologia resultaram em desafios à sustentabilidade ambiental, como a preservação e o uso sustentável dos recursos naturais e a recuperação de áreas degradadas (Garcia; Romeiro, 2021).

A agricultura que não utiliza práticas conservacionistas, como a rotação de culturas, o plantio direto e a otimização de recursos biológicos, é capaz de causar danos aos serviços ecossistêmicos e à sua produtividade. O desmatamento é um dos principais fatores responsáveis por afetar negativamente o meio ambiente, emitindo gases de efeito estufa, reduzindo a quantidade de água disponível e aumentando a compactação e a erosão do solo, além de levar à perda de espécies e à redução da diversidade biológica (Faria *et al.*, 2023). Em razão disso, enfatiza-se a importância do monitoramento e da regularização ambiental, especialmente para a preservação de áreas nativas (Buainain; Favareto; Junior Ruiz; Vieira Junior, 2018).

Nesse cenário, a produção agrícola e a mitigação do desmatamento devem ser viabilizadas de maneira concomitante, por meio da adoção de estratégias que promovam a intensificação da produtividade em áreas já desmatadas e combatam a ocupação ilegal de terras protegidas. Dentre essas estratégias, destacam-se a demarcação de florestas públicas, o combate

à apropriação ilegal de terras, o investimento em pesquisa, tecnologia e práticas sustentáveis, bem como a implementação efetiva da Lei nº 12.651, de 25 de maio de 2012, conhecida como novo Código Florestal Brasileiro (CF), incluindo o uso de Pagamentos por Serviços Ambientais (PSA) (Stabile *et al.*, 2020).

Para garantir a efetiva conservação dos recursos naturais, as ferramentas de proteção da vegetação nativa precisam ser complementadas por políticas públicas de incentivo econômico e social. Assim, o novo CF introduziu instrumentos importantes para efetivar suas normas e alcançar seus objetivos. Entre esses instrumentos, destaca-se o Cadastro Ambiental Rural (CAR), um cadastro eletrônico obrigatório para todos os imóveis rurais³ no plano nacional, implementado em 2014. Esse sistema integra informações de imóveis rurais, com o objetivo de evitar o aumento do desmatamento, atestar a veracidade dos cadastros, impor regras contra a perda de vegetação nativa, fiscalizar a regularidade das propriedades e implementar o Programa de Regularização Ambiental (PRA) (Ministério, 2022); (Sistema, 2023).

Esclarecidos os objetivos do CAR, torna-se necessário avaliá-lo na condição de política pública, dado que se trata de uma intervenção também orientada à mitigação do desmatamento. Para isso, são conduzidas avaliações *ex-post*, especialmente as de impacto, que mensuram os efeitos da política na redução do problema. Essas avaliações dão oportunidade a que se verifiquem sua eficácia e sejam identificados possíveis e necessários ajustes (Brasil, 2018).

Com base no exposto, este estudo tem como objetivos avaliar o impacto do CAR sobre o desmatamento e a conformidade ao Código Florestal em imóveis rurais localizados nas fronteiras agrícolas⁴ do Centro-Oeste e do Matopiba, no período de 2008 a 2023. Para isso, foram utilizados o cálculo do Índice de Conformidade ao Código Florestal (ICCF), conforme a abordagem do Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA) (Ministério, 2023), e o método de Diferenças em Diferenças, proposto por Callaway e Sant'Anna (2021), por meio do qual se consideram múltiplos períodos, uma vez que os imóveis são cadastrados no CAR em momentos distintos.

Diferentemente das avaliações de impacto do CAR realizadas por Souza *et al.* (2022) e pelo Ministério (2023), que adotaram um recorte por bioma (Amazônia e Cerrado), este estudo analisa os efeitos do CAR com base nas fronteiras agrícolas, áreas estratégicas para o desenvolvimento das atividades agropecuárias e importantes para a economia brasileira. Com

³ Nomenclatura adotada pela Lei nº 12.651, de 25 de maio de 2012.

⁴ A delimitação das fronteiras agrícolas aqui estudadas está no APÊNDICE A.

essa abordagem, espera-se contribuir para o aprimoramento do gerenciamento da política pública, proporcionando uma compreensão mais detalhada da heterogeneidade dos efeitos do CAR e possibilitando ajustes que tornem sua implementação mais eficaz.

Esta Dissertação de Mestrado está estruturada em seis seções. A primeira conforma a introdução. A segunda aborda os aspectos do CF e do CAR, além de estudos empíricos da política sobre o desmatamento. A terceira seção descreve os aspectos metodológicos, incluindo a formulação dos indicadores, as variáveis utilizadas e o método empregado. A quarta dedica-se à exposição dos resultados das avaliações para ambas as fronteiras. Na quinta, são discutidos os resultados, ao passo que a sexta seção exprime as considerações finais.

2 CÓDIGO FLORESTAL BRASILEIRO E O CADASTRO AMBIENTAL RURAL

A importância da manutenção de ambientes naturais para a vida humana e suas atividades produtivas é cada vez mais reconhecida (Cardinale *et al.*, 2012). Em consequência, a proteção e uso adequados dos ecossistemas tornaram-se pauta nas discussões socioeconômicas e políticas, culminando na criação dos códigos florestais.

O Decreto nº 23.793/1934 estabeleceu o primeiro Código Florestal, com o objetivo de normatizar a utilização das florestas por meio de sua classificação e da atribuição de finalidades. Um destaque significativo foi a definição de uma área mínima (25%) em todas as propriedades, que deveria ser mantida como reserva florestal. Com a promulgação da lei federal nº 4771/1965, que modificou o código anterior, surgiram os conceitos "áreas de preservação permanente" e "Reserva Legal". Em termos gerais, a elaboração desse novo código concentrou-se na preservação dos recursos hídricos e em áreas de riscos (Santos Filho *et al.*, 2015).

O novo CF, instituído pela Lei nº 12.651/2012, aborda a proteção da vegetação nativa, os conceitos de Áreas de Preservação Permanente (APP) e Reserva Legal, assim como a exploração florestal, ao prever instrumentos econômicos e financeiros para alcançar seus objetivos. Essa lei reitera o compromisso do País com a preservação de suas áreas como um todo, com especial atenção à conservação da biodiversidade, que é prioritária em algumas regiões. Ademais, destaca a responsabilidade compartilhada das esferas governamentais na formulação de políticas que atendam a esses objetivos (Brasil, 2012).

A normalização de medidas que assegurem o uso sustentável dos ecossistemas nacionais é crucial para assegurar o bem-estar das gerações atuais e futuras. É importante ressaltar que a aplicação do CF é passível de assegurar os direitos territoriais das comunidades tradicionais, ao mesmo tempo em que facilita uma governança mais eficaz no uso da terra. A obrigatoriedade de reservar uma porcentagem da área é de alta importância para preservar a vegetação nativa e reduzir os impactos na biodiversidade causados por atividades exploratórias, como a agropecuária (Instituto, 2021).

Assim, o CAR surgiu como um instrumento regulatório com o propósito de implementar as diretrizes do CF, sendo regulamentado pelos Decretos nº 7830/2012 e nº 8235/2014, além da Instrução Normativa nº 2/2014, do Ministério do Meio Ambiente (MMA). O público-alvo do CAR é composto pelos proprietários e possuidores de imóveis rurais, enquanto a sociedade como um todo é beneficiária da regulamentação (Ministério, 2022); (Sistema, 2023).

A regularidade ambiental do imóvel inicia com o cadastro no Sistema Nacional de Cadastro Ambiental Rural (SICAR), demandando informações como dados do proprietário, possuidor rural ou responsável direto, documentos de comprovação de propriedade ou posse, bem como informações georreferenciadas. Essas englobam o perímetro do imóvel, áreas de interesse social ou utilidade pública, localização da vegetação nativa, Áreas de Proteção Permanente (APP), uso restrito, áreas consolidadas e Reserva Legal (RL) (Sistema, 2023).

O CAR emergiu como instrumento importante para a conformidade ambiental, empregando tecnologias modernas para criar uma base de dados essencial para o controle, monitoramento, planejamento ambiental e econômico, bem como o combate ao desmatamento, com base nas informações das propriedades rurais. Os proprietários ou possuidores têm a chance de realizar o cadastro de seus imóveis pela internet, aguardando aprovação após a análise feita por órgãos estaduais ou municipais.

Os resultados esperados incluem simplificação do processo de adequação ambiental, melhorias na gestão e fornecimento de informações para o planejamento econômico e ambiental em todo o País. Ou seja, essa iniciativa objetiva gerar um banco de dados nacional com informações detalhadas sobre o uso e a cobertura da terra, possibilitando uma avaliação precisa da sustentabilidade, inclusive da atividade agropecuária (Sambuichi, 2014).

Entre os desafios a serem mitigados pelo CAR, está a redução da perda de vegetação nativa nos imóveis rurais. Assim, torna-se essencial questionar a efetividade dessa política no combate ao desmatamento, verificar se houve diminuição dessa prática e se as áreas mínimas requeridas para APP ou RL são mantidas. O descumprimento das diretrizes resulta no aumento das emissões de carbono e em alterações climáticas, impactando toda a vida na Terra.

Dessa forma, o CAR assume um papel importante para compreender o histórico de ocupação e utilização das terras, sendo uma peça-chave na quantificação da preservação da vegetação nativa. Haja vista a relevância das informações obtidas por meio do CAR, tem-se a possibilidade de investigar a caracterização do desmatamento no Brasil, analisando se esse desmatamento tem origem em imóveis rurais ou não.

Alguns estudos se destacam nesse contexto, como o de L’Roe *et al.* (2016), que analisaram o impacto do CAR na dinâmica do desmatamento em curto prazo no estado do Pará, considerando distintas categorias de imóveis. Para isso, utilizaram uma regressão de efeitos fixos para dados em painel. Os resultados indicaram pouco impacto geral, exceto uma redução significativa nos imóveis pequenos, com área de 100 a 300 hectares.

De modo semelhante, Azevedo *et al.* (2017) investigaram o efeito do CAR sobre o desmatamento nos estados do Mato Grosso e Pará. O estudo comparou as taxas anuais de

desmatamento entre imóveis cadastrados e não cadastrados, estratificando-os pelo tamanho e utilizando um método de probabilidade de desmatamento. Os resultados mostraram que imóveis pequenos (menores do que 400 hectares) apontaram uma redução inicial no desmatamento logo após o cadastro no CAR, porém esse efeito diminuiu com o tempo, desaparecendo, após 2012, no Pará.

Em outro estudo, Costa *et al.* (2018) adaptaram métodos estatísticos quase-experimentais, comuns em epidemiologia, para avaliar o impacto do CAR sobre o desmatamento na Amazônia (utilizando dados dos estados do Mato Grosso e Pará). O objetivo foi comparar as taxas de desmatamento antes e depois da implementação do CAR, utilizando abordagens não paramétricas, como simulações de Monte Carlo e *Bootstrap*, em decorrência da inadequação de distribuições estatísticas formais aos dados. Os resultados revelaram que a redução do desmatamento em imóveis pequenos foi mais significativa nos primeiros anos após a implementação, mas essa tendência enfraqueceu progressivamente à proporção do tempo.

Alix-Garcia *et al.*, (2018) também analisaram o impacto do cadastro no CAR sobre o desmatamento no Mato Grosso e Pará. O estudo estimou o desmatamento evitado de 2005 a 2014, considerando que os imóveis se cadastraram de 2006 a 2013. Nesses estados, o programa foi precursor do SICAR, sendo introduzido em 2008 no Mato Grosso e em 2009 no Pará. Para a análise, os autores utilizaram dados do PRODES/INPE e um modelo de probabilidade linear com efeitos fixos, comparando imóveis que se cadastraram mais cedo com aqueles que se cadastraram posteriormente. Os resultados indicaram que o cadastro no CAR reduziu, em média, o desmatamento em 0,5 ponto percentual, com um impacto mais significativo para aqueles que se cadastraram mais cedo.

Mais recentemente, Souza *et al.* (2022) avaliaram o impacto do CAR na redução do desmatamento em imóveis rurais nos biomas Amazônia e Cerrado, estratificando por categoria de imóveis. Para isso, utilizaram dados georreferenciados do desmatamento do PRODES/INPE, dos imóveis rurais do SICAR, e aplicaram o método de Diferenças em Diferenças, proposto por Callaway e Sant'Anna (2021). Os resultados indicaram que o CAR levou a uma redução significativa do desmatamento em imóveis pequenos no Cerrado, com início no segundo ano de implementação, e, na Amazônia, desde o quarto ano. No caso da Amazônia, no entanto, imóveis grandes expressaram um aumento no desmatamento tanto no momento do cadastro quanto no período subsequente.

A segunda parte do Relatório de Avaliação *ex-post* (Ministério, 2023) também analisou o impacto do CAR na redução do desmatamento, com foco nos biomas Amazônia e Cerrado e levando em consideração a categoria do imóvel. Os dados utilizados e o método

aplicado foram semelhantes aos de Souza *et al.* (2022). Os resultados indicaram reduções no desmatamento entre os grupos que se cadastraram nos primeiros anos após a implementação do CAR.

Em geral, são poucos os estudos que avaliam o impacto do CAR considerando sua implementação nacional em 2014, sendo os trabalhos de Souza *et al.* (2022) e do Ministério (2023) referências pioneiras nessa temática. Em dadas circunstâncias, o estudo sob relato se propõe a estimar o impacto do CAR sobre o desmatamento, também utilizando o método de Diferenças em Diferenças, de Callaway e Sant'Anna (2021), porém com um recorte específico para as fronteiras agrícolas.

3 ASPECTOS METODOLÓGICOS

Nesta seção, abordam-se os mecanismos de transmissão do CAR, a elaboração da base de dados dos indicadores ambientais com amparo do processamento no *software* Qgis e a aplicação do método de quase-experimento Diferenças em Diferenças, proposto por Callaway e Sant'Anna (2021).

3.1 Mecanismos de Transmissão

O cadastro no CAR integra, detalhadamente, informações sobre as propriedades rurais, compondo uma base de dados para controle, monitoramento, planejamento ambiental e econômico e combate ao desmatamento. Em complemento, o cadastro dos imóveis rurais configura o primeiro passo para a regularização ambiental por intermédio do Programa de Regularização Ambiental (PRA).

Entende-se a perda de vegetação nativa como o problema central a ser mitigado pelo CAR. Para a identificação dessa dificuldade, foi construída uma árvore de problemas pelo Ministério (2022) e, dentre as causas descritas, está a conversão de áreas nativas para plantio, pastos etc., realizadas por produtores rurais. Portanto, com o monitoramento contínuo do CAR, essas ações passam a ser desestimuladas, ante o risco de sanções. O mecanismo para alcançar o objetivo de reduzir o desmatamento dentro dos imóveis rurais é compreensível pelo modelo lógico proposto pelo grupo de avaliadores do MAPA, no primeiro volume do Relatório Final de Avaliação *ex-post* do CAR (2022). Esse modelo lógico configura um desenho detalhado e estruturado de um programa que visa a demonstrar o modo como os insumos e ações geram produtos, resultados e seus respectivos impactos (Brasil, 2018).

Com relação ao CAR, os insumos utilizados incluem a infraestrutura de tecnologia de informação (TI), a integração entre órgãos da União e o pessoal técnico, o orçamento da União, estados e municípios, a cooperação financeira e técnica internacional, a assistência técnica, os produtores rurais e suas entidades representativas. A utilização desses insumos viabiliza as ações de recepção dos cadastros e integração dos dados dos estados no Sistema, dando ensejo à realização de análises.

Tais ações geram como produtos o número de cadastros no CAR para produtores rurais e dados do SICAR públicos e acessíveis à sociedade (exceto dados pessoais). Assim, há à disposição um conjunto de indicadores a serem analisados sob diversas temáticas, inclusive

quanto à preservação ambiental. Nesse sentido, o mecanismo de realizar o cadastro dos imóveis rurais no CAR é capaz de exercer causalidade no indicador do desmatamento e conformidade ao Código Florestal.

3.2 Extração e processamento dos dados

Nesta subseção, têm curso os procedimentos necessários para a elaboração da base de dados utilizada nas análises, bem como os indicadores fundamentais para atender à proposta da pesquisa. Os dados foram obtidos com suporte em distintas fontes públicas.

As informações geoespaciais dos imóveis rurais foram extraídas do portal oficial do CAR, por meio da funcionalidade de consulta pública e base de *downloads* dos perímetros dos imóveis cadastrados. Também foi utilizado o *shapefile*⁵ da malha municipal, disponível no *site* do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), para realizar a associação espacial dos imóveis às suas respectivas jurisdições municipais. Os dados sobre incremento anual do desmatamento nos biomas Amazônia e Cerrado foram obtidos na plataforma *Terra Brasilis* do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), na seção de *downloads*, provenientes do Projeto de Monitoramento do Desmatamento na Amazônia Legal por Satélite (PRODES).

3.2.1 Construção do indicador 1: Evolução do desmatamento nos Imóveis Rurais

Os dados geoespaciais dos imóveis rurais armazenados em arquivos do tipo *shapefile* foram processados utilizando o *software* QGIS 3.36.2. O procedimento inicial incluiu a *reprojeção* dos arquivos para o sistema de coordenadas geodésicas Sirgas 2000 (EPSG: 5880), adotado oficialmente pelo Brasil e utilizado para posicionamento preciso na América Latina e no Caribe. Esse processo assegurou que todos os dados estivessem no mesmo sistema de referência, evitando erros de interpretação e análise.

As áreas de imóveis rurais e de desmatamento são representadas pelo tipo geométrico "polígono", suscetíveis de exibir erros topológicos na construção dos dados espaciais, como, vértices que se tocam ou duplicados. Para garantir a integridade dos dados, as

⁵ *Shapefile* é um formato de arquivo geoespacial usado para armazenar dados vetoriais, como pontos, linhas e polígonos, amplamente utilizado em Sistemas de Informação Geográfica (SIG).

geometrias foram corrigidas⁶, e aquelas duplicadas foram excluídas, evitando contagens inflacionadas na análise. Esse procedimento foi aplicado a todas as bases de dados.

No processo intermediário, para evitar erros de localização dos imóveis rurais nos estados, o *shapefile* dos imóveis foi associado à malha municipal do IBGE, utilizando o método 'interseccionam'. Desse modo, todos os imóveis da região de interesse foram corretamente retornados. Em seguida, foram classificados quanto ao tamanho.

A Lei nº 8.629/1993, atualizada pela Lei nº 13.465/2017, classifica os imóveis rurais de acordo com o tamanho de sua área, e essa classificação foi adaptada da seguinte forma:

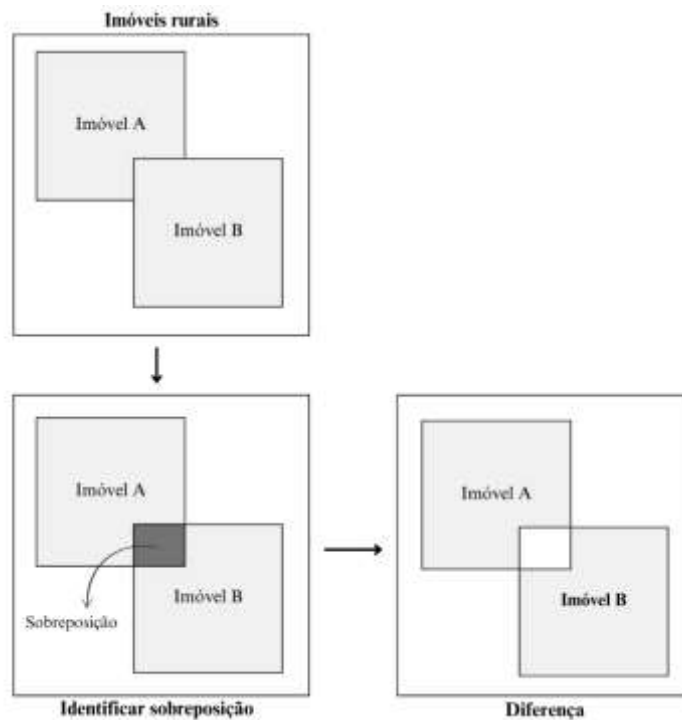
- a) Pequeno: imóvel rural com área até 4 módulos fiscais⁷.
- b) Médio: imóvel rural de área superior a 4 e até 15 módulos fiscais.
- c) Grande: imóvel rural de área superior a 15 módulos fiscais.

Posteriormente, utilizou-se a extensão *DSG Tools* para identificar as sobreposições. Com base nessa identificação, foi aplicado o método de 'diferença' para excluir as áreas sobrepostas do *shapefile* dos imóveis. A principal justificativa para adotar esse procedimento foi evitar a superestimação do desmatamento dentro dos imóveis rurais. A Figura 1 expressa esquematicamente o processo.

⁶ 'Corrigir geometrias' é uma ferramenta do *software* QGIS que identifica e corrige erros em dados espaciais, como vértices duplicados, vértices de polígonos que se tocam etc.

⁷ Módulo fiscal é uma medida de área em hectares, fixada pelo Instituto Nacional de Colonização e Reforma Agrária (INCRA) para cada município.

Figura 1 - Processo de identificação e extração das sobreposições dos shapefile de imóveis rurais.



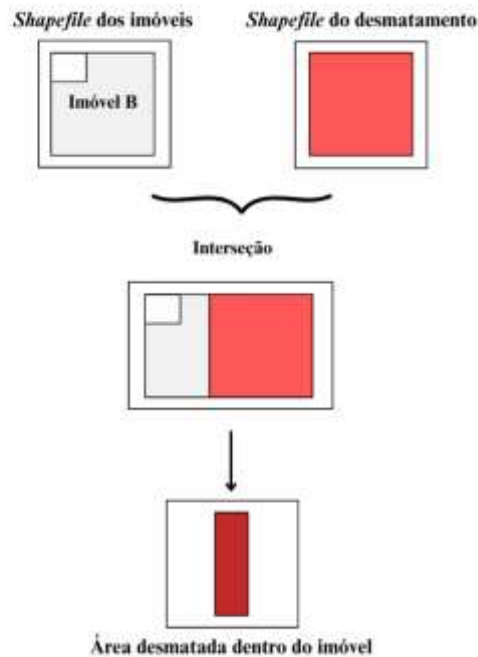
Fonte: elaborada pela autora.

A área dos imóveis rurais foi novamente calculada (em hectares), e uma nova classificação foi realizada de acordo com o tamanho. Os imóveis que se descaracterizaram, ou seja, mudaram de categoria, foram excluídos da base de dados, conforme sugerido por Matias *et al.* (2024).

O último processo consistiu em realizar a interseção do *shapefile* anterior com os *shapefiles* de incremento anual⁸ no desmatamento da Amazônia e do Cerrado, disponibilizados pelo INPE. Com procedência nessa interseção, foram extraídas as áreas sobrepostas, correspondendo ao desmatamento, em hectares, dentro dos imóveis rurais, como se observa pela figura 2.

⁸ Na base de incremento anual do Cerrado, os valores de desmatamento ocorridos em 2009 e 2011 foram contabilizados em 2010 e 2012, respectivamente. Para ajustar isso, a estratégia adotada foi dividir igualmente os valores de 2010 com o ano de 2009, conforme descrito por Souza *et al.* (2022). O valor de desmatamento observado em 2012 também foi dividido igualmente, sendo metade atribuído ao ano de 2011.

Figura 2 - Processo de interseção dos *shapefiles* de imóveis com o do desmatamento.



Fonte: elaborada pela autora.

Para o tratamento da base final de dados, utilizou-se a linguagem de programação *Python* 3.11.1 para limpeza de variáveis, a classificação dos imóveis e o agrupamento do desmatamento por imóvel, com a biblioteca *Pandas*. Por fim, na análise econométrica realizada no *software* RStudio 4.4.0, com o pacote *did*, foram considerados apenas os imóveis cujo *status* do cadastro estava ativo ou pendente, desconsiderando aqueles com *status* suspenso ou cancelado⁹.

3.2.2 Construção do indicador 2: Conformidade ao Código Florestal

O Indicador de Conformidade ao Código Florestal (ICCF) tem como objetivo identificar se os imóveis rurais estão respeitando o percentual mínimo de área de vegetação nativa que deve ser mantida como Reserva Legal (RL). De acordo com o CF (Brasil, 2012), a RL consiste em uma área localizada no interior de uma propriedade rural, que tem como uma de suas funções a promoção da conservação da biodiversidade.

⁹ Esses *status* resumem a condição do cadastro, que pode ter sido cancelado por duplicidade ou por decisão administrativa.

O período analisado neste estudo (2008 a 2023) compreendeu dois códigos florestais (1965 e 2012), entretanto, o percentual de RL estipulado se manteve o mesmo em ambos, variando apenas quanto à localização geográfica do imóvel rural nos biomas. Assim, o percentual a ser reservado é de 80% para imóveis inseridos em áreas de floresta e 35% para os inseridos em áreas de Cerrado dentro da Amazônia Legal, e 20% nas demais regiões do País (Brasil, 2012).

O indicador utilizado segue o modelo proposto pelo Ministério (2023):

$$ICCF = \frac{d}{b * c} \quad (1)$$

em que b é a área do imóvel rural; c é a proporção da área do imóvel rural que deveria ser mantida como RL; d é a área de vegetação nativa no interior da RL do imóvel rural.

Na formulação da base de dados necessária para o cálculo deste indicador, foram utilizados os *shapefiles* de RL provenientes do SICAR e os de incremento anual de desmatamento disponibilizados pelo INPE. O tratamento dos dados seguiu o mesmo procedimento adotado anteriormente para o indicador 1, abrangendo a *reprojeção*, a correção de geometrias inválidas, a identificação de sobreposições e sua remoção.

Em seguida, a base de dados processada no QGIS foi tratada com o uso da linguagem *Python*, integrando as novas variáveis aqui indicadas à base de imóveis rurais por meio do método '*merge*'. É importante evidenciar que nem todos os imóveis rurais possuíam área de reserva legal correspondente na base do SICAR, e, portanto, foram excluídos das análises. Assim, para ambas as avaliações de impacto, os imóveis rurais estudados são os mesmos ($n = 83.700$ para o Centro-Oeste e $n = 88.760$).

3.3 Estratégia empírica

Nesta seção, encontram-se detalhadas as variáveis utilizadas nas análises, bem como a abordagem econométrica adotada para a identificação dos efeitos causais.

3.3.1 Variáveis utilizadas

Nas análises, considerou-se grupo de tratamento os imóveis rurais cadastrados no CAR entre 2014 e 2021. O grupo de controle foi composto pelos imóveis que ainda não haviam sido cadastrados em determinado período. Um imóvel rural foi considerado tratado desde o

momento de seu cadastro no CAR. Para ambos os grupos, a base de dados incluiu informações de desmatamento anteriores à implementação da política, abrangendo o período de 2008 a 2023.

O Quadro 1 expressa a descrição das variáveis utilizadas nas avaliações de impacto do CAR sobre o desmatamento e a conformidade ao Código Florestal.

Quadro 1 – Variáveis utilizadas e sua descrição.

Variável	Descrição
<i>Log</i> Desmatamento do imóvel	Logaritmo da área desmatada em hectares
<i>Dummy</i> do Índice de Conformidade ao Código Florestal (ICCF)	Assume 0 se o ICCF for menor que um e 1 caso contrário
Ano do Desmatamento	Ano em que ocorre o desmatamento
Ano CAR	Ano em que ocorre o primeiro tratamento (cadastro no CAR)
GO, MS, MT	<i>Dummy</i> de estado. Assume 1 se o imóvel pertencer a um dos estados do Centro-Oeste e 0 caso contrário (covariáveis para as avaliações na fronteira do Centro-Oeste)
MA, TO, BA	<i>Dummy</i> de estado. Assume 1 se o imóvel pertencer a um dos estados do Matopiba e 0 caso contrário (covariáveis para as avaliações na fronteira do Matopiba)
Bioma	<i>Dummy</i> de bioma. Assume 1 se o imóvel rural pertencer ao Cerrado e 0 caso contrário (covariável)
<i>Status</i>	<i>Dummy</i> da situação do imóvel. Assume 1 se o cadastro tiver sido analisado e 0 caso contrário (covariável)

Fonte: elaborado pela autora.

Nota: As *dummies* DF e PI não foram utilizadas como covariáveis nas avaliações de impacto para o Centro-Oeste e Matopiba, respectivamente. Isso foi necessário para evitar problemas de multicolinearidade.

Neste estudo, as análises foram realizadas separadamente, por tamanho dos imóveis rurais: primeiro, para pequenos, seguidos pelos médios e grandes. Essa abordagem justifica-se pelas diferenças proporcionais no desmatamento e pelos possíveis impactos distintos do CAR em cada categoria de tamanho.

3.3.2 Diferenças em Diferenças (DiD) com múltiplos períodos

Sabendo que a adesão ao cadastro de imóveis rurais no CAR ocorre em momentos distintos, foi utilizado o método de Diferenças em Diferenças (DiD), proposto por Callaway e Sant’Anna (2021). O Efeito Médio do Tratamento sobre os Tratados (ATT) estimado por este método incorpora: i) múltiplos períodos, com vistas a avaliar o impacto de uma intervenção ao longo do tempo; ii) variação no tempo de tratamento; e iii) suposição de tendências paralelas entre os grupos de tratamento e controle após o condicionamento das covariáveis observadas.

A análise se baseia em três etapas distintas, incluindo a identificação de parâmetros causais desagregados relevantes, a agregação desses parâmetros para formar efeitos de medidas sumárias e a estimativa e inferência sobre variados parâmetros-alvo. Callaway e Sant’Anna (2021) discutem distintos estimadores para os parâmetros causais de interesse, incluindo a regressão de resultados (OR), a ponderação pela probabilidade inversa (IPW) e os duplamente robustos (DR).

Os estimadores DR constituem a combinação dos estimadores OR e IPW, e são robustos a erros de especificação no modelo de regressão e de probabilidade de tratamento, melhorando a precisão das estimativas. A IPW ajusta os pesos das observações com base na probabilidade de tratamento, corrigindo o viés de seleção, ao atribuir mais peso às unidades que são menos representadas no grupo de tratamento.

Matematicamente, a IPW é dada pela seguinte equação:

$$P_g X = P(G_g = 1 | X, G_g + (1 - D_t)(1 - G_g) = 1) \quad (2)$$

em que G_g é definido como uma variável binária que assume valor 1 se a unidade for tratada no período g ; X é vetor de variáveis observáveis; e, $[(1 - D_t)(1 - G_g) = 1]$ denota também uma variável binária que assume valor 1 se a unidade pertencer ao grupo controle “ainda não tratado”.

É importante salientar que, uma vez tratados, os imóveis rurais analisados permanecem tratados em períodos subsequentes. Portanto, nessa análise, a estimativa do ATT é realizada para o grupo “ g ” no tempo “ t ”, verificando como esse efeito varia de acordo com as covariáveis observadas, o período de tratamento e a evolução dos efeitos à medida do tempo.

Sob esse entendimento, os imóveis rurais foram agrupados de acordo com o período em que foram cadastrados. Os grupos foram definidos como: $g = 2014, 2015, 2016, \dots, 2021$. O efeito médio do tratamento para o grupo-tempo é considerado *semiparamétrico*, pois oferece flexibilidade para capturar padrões complexos nos dados, e a estimação é passível de ser conduzida quando existe um grupo controle “nunca-tratado” ou “ainda-não-tratado”.

Neste estudo, a estimação foi realizada considerando imóveis rurais ainda-não-tratados como grupo de controle. Assim, o estimador é identificado por:

$$ATT_{dr}^{ny}(g, t) = E \left[\left(\frac{G_g}{E[G_g]} - \frac{\frac{p_{g,t}(X)(1-D_t)(1-G_g)}{1-p_{g,t}(X)}}{E \left[\frac{p_{g,t}(X)(1-D_t)(1-G_g)}{1-p_{g,t}(X)} \right]} \right) (Y_t - Y_{g-1} - m_{g,t}^{ny}(X)) \right] \quad (3)$$

em que $m_{g,t}^{ny}(X) = E[Y_t - Y_{g-1} | X, D_t = 0, G_g = 0]$, e representa os resultados populacionais

para o grupo ainda-não-tratado. Os elementos $w_g^G = \frac{G_g}{E[G_g]}$ e $w_g^C = \frac{\frac{p_{g,t}(X)(1-D_t)(1-G_g)}{1-p_{g,t}(X)}}{E\left[\frac{p_{g,t}(X)(1-D_t)(1-G_g)}{1-p_{g,t}(X)}\right]}$

correspondem aos escores de propensão atribuídos aos grupos de tratamento e controle, respectivamente, tornando-os devidamente comparáveis.

A metodologia de Callaway e Sant'Anna (2021) propõe, também, diversificados esquemas de agregação do efeito do tratamento. Uma ideia é observar os efeitos médios para cada grupo, ou seja, em vez de analisar como o tratamento afeta cada grupo em variados períodos, calcula-se apenas um efeito médio do tratamento para cada grupo, agregando os efeitos ao longo de todos os períodos.

Inicialmente, para obter o efeito médio para cada grupo, separadamente, a fim de compreender a heterogeneidade no efeito de participar do tratamento, tem-se a seguinte equação:

$$\theta_{sel}(\tilde{g}) = \frac{1}{\tau + \tilde{g} - 1} \sum_{t=\tilde{g}}^{\tau} ATT(\tilde{g}, t) \quad (4)$$

$\theta_{sel}(\tilde{g})$ corresponde ao efeito médio de participar do tratamento entre as unidades no grupo \tilde{g} , ao largo de todos os seus períodos de pós tratamento. Em seguida, calcula-se a média desses efeitos para resumir o efeito médio geral do tratamento.

Logo, o efeito médio de participar do tratamento, experimentado por todas as unidades participantes do tratamento, é dado por:

$$\theta_{sel}^0 = \sum_{g \in G} \theta_{sel}(g) P(G = g | G \leq \tau) \quad (5)$$

Para destacar a dinâmica de como os efeitos médios do tratamento mudam no tempo, conforme a fase de exposição ao tratamento, definem-se os parâmetros de efeito de tratamento geral calculando os efeitos médios do tratamento em todos os eventos, dado por:

$$\theta_{es}(e) = \sum_{g \in G} 1\{g + e \leq \tau\} P(G = g | G = e \leq \tau) ATT(g, g + e) \quad (6)$$

em que $e = t - g$ denota o tempo decorrido desde que o tratamento foi adotado. Assim, a equação (6) representa o efeito médio de participar do tratamento após e períodos desde sua adoção. Em outros termos, esse método de agregação captura a heterogeneidade dos efeitos do tratamento ao largo do tempo.

É comum a utilização de regressões de estudo de eventos e plotar β_e em diferentes valores de e , interpretando as diferenças como decorrentes da dinâmica do efeito do tratamento. Há, no entanto, algumas limitações capazes de incluir mudanças composicionais que dificultam

a interpretação desses parâmetros. Para contornar essa situação, tem-se a alternativa de “equilibrar” os grupos com relação ao tempo do evento, utilizando a seguinte equação:

$$\theta_{es}^{bal}(e; e') = \sum_{g \in G} 1\{g + e' \leq \tau\} ATT(g, g + e) P(G = g | G + e' \leq \tau) \quad (7)$$

Assim, os $ATT_{(g,t)}$'s são agrupados para um conjunto fixo de grupos que estão expostos ao tratamento por pelo menos algum número específico de períodos.

4 RESULTADOS

Nesta seção, exprimem-se os principais resultados obtidos com amparo nas estimativas de impacto do CAR sobre o desmatamento e sobre a conformidade ao Código Florestal em imóveis rurais, nas fronteiras agrícolas do Centro-Oeste e do Matopiba.

4.1 Efeitos sobre o desmatamento nos imóveis rurais

A Tabela 1 expressa as médias da variável desmatamento antes e depois da implementação do CAR. Foram considerados dois períodos: 2013, ano anterior à intervenção, quando nenhum imóvel estava cadastrado, e 2023, último ano da análise, quando todos os imóveis estavam cadastrados. Para avaliar a diferença entre os períodos, foi realizado o teste-t para cada categoria de tamanho de imóvel, sob a hipótese alternativa de que as médias de desmatamento são estatisticamente diferentes.

No Centro-Oeste, os resultados indicaram que, em 2023, as médias de desmatamento foram menores para todos os imóveis em relação a 2013; no entanto, a diferença foi significativa apenas para os imóveis pequenos e médios. No Matopiba, as médias de desmatamento em 2023 foram maiores, exceto para os imóveis pequenos, e a diferença foi significativa apenas para os imóveis médios.

Tabela 1 - Teste-T para a diferença de média do desmatamento antes e depois do tratamento.

Continua

Fronteira Agrícola do Centro-Oeste				
Imóveis	Antes do tratamento (A)	Depois do tratamento (D)	Diferença (A – D)	Teste-T
	2013	2023		
Pequeno	0,83 (4,61)	0,43 (4,33)	0,40	14,09 *
Médio	2,64 (14,95)	2,07 (19,95)	0,57	3,30 *
Grande	8,20 (70,93)	6,74 (64,73)	1,46	1,83

				conclusão
Fronteira Agrícola do Matopiba				
Pequeno	0,72 (4,77)	0,69 (5,32)	0,03	1,27
Médio	7,58 (37,41)	9,31 (46,09)	-1,73	-3,00 *
Grande	45,35 (234,65)	51,71 (302,25)	-6,36	-1,12

Fonte: elaborada pela autora.

Nota: * p-valor < 0,05. Os valores entre parênteses se referem ao desvio-padrão.

Embora a comparação das médias de desmatamento ofereça uma visão inicial dos possíveis efeitos da política, foi necessário um método mais robusto para identificar causalidade, como o DiD. Nesse método, a suposição de pré tendências paralelas deve ser verificada, pois sua validade é essencial para a estimação do modelo, uma vez que sua ausência compromete a identificação causal. Conforme sugerido por Callaway e Sant'Anna (2021)¹⁰, utiliza-se o estudo de eventos para sua verificação. Nesse sentido, as pré tendências paralelas dos modelos estimados são mostradas graficamente no APÊNDICE B (para a fronteira agrícola do Centro-Oeste) e no APÊNDICE C (para a fronteira agrícola do Matopiba), onde é possível verificar a dinâmica do impacto do CAR sobre o desmatamento nos períodos anteriores e posteriores à sua implementação.

No Centro-Oeste, para imóveis pequenos, o pressuposto é atendido em todos os períodos, com exceção do segundo ano e do quinto, antes da intervenção. Nos imóveis médios, a suposição é válida para todos os períodos, exceto para o ano imediatamente anterior ao CAR. Para os imóveis grandes, apenas o quinto ano anterior à intervenção não atende à suposição de tendências paralelas.

O desmatamento em imóveis rurais é uma variável fortemente influenciada por fatores externos, como crédito rural e condições econômicas, capazes de elevar o preço dos alimentos e fomentar a expansão agrícola. Em adição, uma vez que o desmatamento ocorra em um ano para atender a essa demanda, a necessidade de novos desmatamentos nos anos subsequentes é suscetível de ser reduzida, alterando as tendências esperadas. Esses fatores externos, portanto, vão afetar, possivelmente e de maneira diferenciada, os grupos de tratamento e controle, o que explica a violação da suposição de pré tendências paralelas em alguns períodos.

¹⁰ Ver: <https://bcallaway11.github.io/posts/event-study-universal-v-varying-base-period>.

No Matopiba, as estimativas de pré tendências paralelas foram validadas para todos os grupos. Isso é evidenciado pelo intervalo (em vermelho) que inclui o valor zero com início no sexto período anterior à implementação do CAR, momento que marca o início da série temporal da análise.

A Tabela 2 contém as estimativas do impacto causal do CAR sobre o desmatamento em imóveis rurais, por grupo de tratamento. Para imóveis pequenos, houve redução no desmatamento para o grupo cadastrado em 2016, com uma estimativa de 2,27% no Centro-Oeste e 2,48% no Matopiba. Aumentos significativos, no entanto, foram observados em determinados anos. Para os grupos cadastrados em 2017 e 2020 no Matopiba, os aumentos foram de 2,88% e 3,40%, respectivamente. Já no Centro-Oeste, o grupo cadastrado em 2021 revelou um aumento de 8,42%.

Com relação aos imóveis médios, foram verificados uma redução de 5,22% para os cadastrados em 2015 no Centro-Oeste, e um aumento de 11,48% para os cadastrados em 2017 no Matopiba. Para os imóveis grandes, os efeitos foram observados apenas no Matopiba, com uma redução de 35,20% para os cadastrados em 2014 e um aumento de 36,77% para os cadastrados em 2020.

Tabela 2 - Estimativas dos efeitos heterogêneos de grupos do CAR sobre o desmatamento.

Fronteira Agrícola do Centro-Oeste							
Categorias	Grupos					ATT	
Pequeno			<u>2016</u> -0,0227* (0,0079)			<u>2021</u> 0,0842* (0,0194)	-0,0011 (0,0049)
Médio	<u>2015</u> -0,0522* (0,0179)						-0,0397* (0,0141)
Fronteira Agrícola do Matopiba							
Pequeno			<u>2016</u> -0,0248* (0,0067)	<u>2017</u> 0,0288* (0,0067)	<u>2020</u> 0,0340* (0,0083)		-0,0034 (0,0039)
Médio				<u>2017</u> 0,1148* (0,0398)			0,0359 (0,0210)
Grande	<u>2014</u> -0,3520* (0,1035)				<u>2020</u> 0,3677* (0,1239)		0,0082 (0,0470)

Fonte: elaborada pela autora.

Nota: * p-valor < 0,05. Os valores entre parênteses se referem ao desvio-padrão.

A Tabela 3 mostra os resultados do estudo de eventos balanceados para imóveis pequenos. Para essa análise, foram definidos tempos de exposição (e) ao tratamento, estabelecendo um tempo mínimo de cadastro dos imóveis rurais no CAR, a fim de avaliar o impacto da política à medida do tempo. No Centro-Oeste, os grupos cadastrados com $e=5$ (2014-2016) apontaram redução no desmatamento no quarto e quinto períodos após o início da exposição ao CAR, com efeitos estimados em 2,35% e 2,95%, respectivamente.

No Matopiba, também, foram observadas reduções para $e=5$, estimadas em 2,40% e 3,14% nos mesmos períodos. Em adição, os grupos cadastrados com $e=6$ (2014-2015) apresentaram um aumento de 2,65% no primeiro período pós tratamento, seguido por uma redução de 4,35% no sexto período.

Tabela 3 - Estimativas do estudo de eventos balanceados para imóveis pequenos.

Fronteira Agrícola do Centro-Oeste					
Exposição	Efeito dinâmico de tempo				ATT
$e=5$ (2014-2016)		4 -0,0235 (0,0078)	5 -0,0295 (0,0103)		-0,0102* (0,0052)
Fronteira Agrícola do Matopiba					
$e=5$ (2014-2016)		4 -0,0240* (0,0077)	5 -0,0314* (0,0093)		-0,0147* (0,0050)
$e=6$ (2014-2015)	1 0,0265* (0,008)			6 -0,0435* (0,0142)	-0,0058 (0,0068)

Fonte: elaborada pela autora.

Nota: * p-valor < 0,05. Os valores entre parênteses se referem ao desvio-padrão.

A Tabela 4 detém as estimativas para os imóveis médios. Na fronteira agrícola do Centro-Oeste, os grupos cadastrados com $e=6$ (2014-2015) mostraram uma redução de 15,02% no desmatamento no sexto período após o cadastro no CAR. Já na fronteira do Matopiba, os grupos cadastrados com $e=4$ (2014-2017) expressaram aumento do desmatamento em 9,02% e 8,62%, no primeiro e segundo períodos pós tratamento, respectivamente. Ainda, foi observado aumento de 11,11% e 13,32% no desmatamento para os grupos cadastrados com $e=6$, também nos primeiros dois períodos pós tratamento.

Tabela 4 - Estimativas do estudo de eventos balanceados para imóveis médios.

Fronteira Agrícola do Centro-Oeste				
Exposição	Efeito dinâmico de tempo			ATT
e=6 (2014-2015)			6 -0,1502 (0,0407)	-0,0391* (0,0176)
Fronteira Agrícola do Matopiba				
e=4 (2014-2017)	1 0,0902* (0,0224)	2 0,0862* (0,0242)		0,0330 (0,0206)
e=6 (2014-2015)	1 0,1111* (0,0320)	2 0,1332* (0,0355)		0,0221* (0,0283)

Fonte: elaborada pela autora.

Nota: * p-valor < 0,05. Os valores entre parênteses se referem ao desvio-padrão.

Na Tabela 5, estão as estimativas para imóveis grandes. Especificamente para essa categoria, foram encontrados efeitos significativos apenas para a fronteira agrícola do Matopiba. De acordo com os resultados, os grupos cadastrados com $e=6$ (2014-2015) expressaram uma redução de 24,17% no desmatamento no quarto período pós tratamento. Aqueles com $e=7$ (apenas o grupo de 2014) apresentaram uma redução instantânea de 33,66%, ou seja, já no ano de cadastro, e alcançaram reduções maiores desde o quarto período, chegando a 48,76% no sexto.

Tabela 5 - Estimativas do estudo de eventos balanceados para imóveis grandes.

Fronteira Agrícola do Matopiba					
Exposição	Efeito dinâmico de tempo				ATT
e=6 (2014-2015)		4 -0,2417* (0,0819)			-0,1173 * (0,0551)
e=7 (2014)	0 -0,3366* (0,0996)	4 -0,4678* (0,1264)	5 -0,4274* (0,1312)	6 -0,4876* (0,1475)	-0,3520 (0,0933)

Fonte: elaborada pela autora.

Nota: * p-valor < 0,05. Os valores entre parênteses se referem ao desvio-padrão.

Os principais resultados do efeito do CAR sobre o desmatamento foram mostrados anteriormente, considerando distintas categorias de imóveis. Os resultados completos,

incluindo todas as estimativas significativas encontradas, estão disponíveis nos APÊNDICES F (fronteira agrícola do Centro-Oeste) e G (fronteira agrícola do Matopiba).

4.2 Efeitos sobre a Conformidade ao Código Florestal

Nesta avaliação, foi utilizada uma variável *dummy* como resposta para indicar se os imóveis estavam ou não em conformidade com a legislação; os valores estimados representam mudanças na probabilidade de conformidade após o cadastro no CAR. As análises das tendências pré tratamento para a fronteira agrícola do Centro-Oeste (APÊNDICE D) e para a fronteira agrícola do Matopiba (APÊNDICE E) confirmaram a validade da suposição de pré tendências paralelas para todas as categorias de imóveis.

Os resultados da Tabela 6 indicam que o cadastro no CAR resultou, em média, em uma redução geral de 0,82% na probabilidade de conformidade dos imóveis rurais pequenos no Centro-Oeste e de 1,01% no Matopiba. Por exemplo, supondo uma probabilidade inicial de conformidade ao Código Florestal (CF) de 10%, após o cadastro no CAR, essa probabilidade cairia para 9,18% no Centro-Oeste e para 8,99% no Matopiba.

Quanto aos efeitos heterogêneos de grupos, a conformidade diminuiu em 1,67%, 1,04% e 0,6% para os grupos cadastrados em 2014, 2015 e 2016, respectivamente, no Centro-Oeste. No Matopiba, a redução também foi observada para os mesmos grupos, com percentuais mais elevados: 3,63%, 1,03% e 1,02%.

Com relação aos imóveis médios, os resultados foram observados apenas na fronteira do Matopiba, indicando uma redução média geral na probabilidade de conformidade, estimada em 1,91%. Os efeitos heterogêneos variaram de 2% a 3% para todos os grupos, exceto os de 2016, 2020 e 2021. Para os imóveis grandes, identificou-se apenas um efeito médio geral de redução no Centro-Oeste, estimado em 0,69%.

Tabela 6 - Estimativas dos efeitos heterogêneos de grupos do CAR sobre a conformidade ao Código Florestal. continua

Fronteira Agrícola do Centro-Oeste							
Categoria	Grupos						ATT
Pequeno	<u>2014</u> -0,0167* (0,0024)	<u>2015</u> -0,0104* (0,0025)	<u>2016</u> -0,0066* (0,0023)				-0,0082 * (0,0015)
Grande							-0,0069 * (0,0035)

Fronteira Agrícola do Matopiba								
Pequeno	<u>2014</u> -0,0363* (0,0080)	<u>2015</u> -0,0103* (0,0028)	<u>2016</u> -0,0102* (0,0021)	<u>2017</u> -0,0173* (0,0026)	<u>2018</u> -0,0136* (0,0028)		<u>2021</u> -0,0081* (0,0028)	-0,0101 * (0,0014)
Médio	<u>2014</u> -0,0290* (0,0101)	<u>2015</u> -0,0216* (0,0067)		<u>2017</u> -0,0271* (0,0068)	<u>2018</u> -0,0204* (0,0064)	<u>2019</u> -0,0206* (0,0067)		-0,0191 * (0,0036)

Fonte: elaborada pela autora.

Nota: * p-valor < 0,05. Os valores entre parênteses se referem ao desvio-padrão.

A partir do estudo de eventos balanceados para imóveis pequenos (Tabela 7), observou-se que, à medida que aumenta o tempo de exposição ao tratamento, diminui a probabilidade de conformidade. Na fronteira do Centro-Oeste, para $e=2$, que abrange os cadastrados de 2014 a 2019, essa redução foi de 0,59% no primeiro período após o tratamento. Para $e=5$ (2014-2016), a diminuição da probabilidade ocorre no primeiro período após o cadastro, com uma redução de 0,61%, atingindo 1,26 % no quinto período.

Para a fronteira do Matopiba, observou-se um resultado semelhante: a probabilidade de conformidade diminui ao longo do tempo. Nos grupos cadastrados com $e=2$ (2014-2019), a redução média estimada foi de 0,66% no primeiro período pós tratamento e de 1,09% no segundo período. Já para os grupos com $e=5$ (2014-2016), a redução atingiu 1,76% no quinto período após o cadastro. Isso significa que, supondo uma probabilidade de conformidade inicial de 10%, grupos expostos ao tratamento por, pelo menos, cinco anos reduziram sua probabilidade para 8,24%.

Tabela 7 – Estimativas do estudo de eventos balanceados para imóveis pequenos.

continua

Fronteira Agrícola do Centro-Oeste						
Exposição	Efeito dinâmico de tempo					ATT
e=2 (2014-2019)	1	2				-0,0054 * (0,0009)
	-0,0059* (0,0010)	-0,0092* (0,0015)				
e=3 (2014-2018)	1	2	3			-0,0067 * (0,0012)
	-0,0057* (0,0010)	-0,0090* (0,0014)	-0,0111* (0,0020)			
e=4 (2014-2017)	1	2	3	4		-0,0082 * (0,0014)
	-0,0060* (0,0011)	-0,0096* (0,0015)	-0,0118* (0,0019)	-0,0122* (0,0026)		
e=5 (2014-2016)	1	2	3	4	5	-0,0092 * (0,0016)
	-0,0061* (0,0012)	-0,0102* (0,0014)	-0,0121* (0,0019)	-0,0134* (0,0025)	-0,0126* (0,0039)	

Fronteira Agrícola do Matopiba						
e=2 (2014-2019)	1 -0,0066* (0,0010)	2 -0,0109* (0,0015)				-0,0044 * (0,0007)
e=3 (2014-2018)	1 -0,0075* (0,0011)	2 -0,0126* (0,0015)	3 -0,0174* (0,0021)			-0,0101 * (0,0012)
e=4 (2014-2017)	1 -0,0072* (0,0012)	2 -0,0118* (0,0015)	3 -0,0162* (0,0021)	4 -0,0199* (0,0031)		-0,0115 * (0,0015)
e=5 (2014-2016)	1 -0,0072* (0,0013)	2 -0,0100* (0,0016)	3 -0,0126* (0,0023)	4 -0,0159* (0,0028)	5 -0,0176* (0,0039)	-0,0110 * (0,0016)

Fonte: elaborada pela autora.

Nota: * p-valor < 0,05. Os valores entre parênteses se referem ao desvio-padrão.

A Tabela 8 mostra os resultados do estudo de eventos balanceados para imóveis médios. Essa categoria tem resultado similar aos imóveis pequenos, em que a probabilidade de conformidade diminui com o aumento da exposição ao tratamento. Na fronteira do Centro-Oeste, para $e=4$ (2014-2017), a redução média estimada foi de 0,68% no primeiro período pós tratamento e de 1,23% no terceiro. Já na fronteira do Matopiba, considerando $e=4$, a redução na probabilidade atingiu 2,79% no quarto período pós tratamento. Não foram encontrados efeitos significativos para imóveis grandes.

Tabela 8 – Estimativas do estudo de eventos balanceados para imóveis médios.

continua

Fronteira Agrícola do Centro-Oeste					
Exposição	Efeito dinâmico de tempo				ATT
e=2 (2014-2019)	1 -0,0063* (0,0014)	2 -0,0085* (0,0024)			-0,0062 * (0,0014)
e=3 (2014-2018)	1 -0,0074* (0,0016)	2 -0,0112* (0,0021)	3 -0,0109* (0,0030)		-0,0084 * (0,0017)
e=4 (2014-2017)	1 -0,0068* (0,0016)	2 -0,0112* (0,0022)	3 -0,0123* (0,0029)		-0,0087 * (0,0022)

Fronteira Agrícola do Matopiba					
e=2 (2014-2019)	1 -0,0107* (0,0025)	2 -0,0203* (0,0034)			-0,0115 * (0,0024)
e=3 (2014-2018)	1 -0,0094* (0,0026)	2 -0,0188* (0,0036)	3 -0,0263* (0,0048)		-0,0145 * (0,0029)
e=4 (2014-2017)	1 -0,0089* (0,0028)	2 -0,0180* (0,0040)	3 -0,0241* (0,0048)	4 -0,0279* (0,0062)	-0,0164 * (0,0033)

Fonte: elaborada pela autora.

Nota: * p-valor < 0,05. Os valores entre parênteses se referem ao desvio-padrão.

Os principais resultados sobre o efeito do CAR na conformidade ao Código Florestal foram mostrados anteriormente, considerando as categorias de imóveis. Os resultados completos, que incluem todas as estimativas significativas, estão disponíveis nos APÊNDICES H (fronteira agrícola do Centro-Oeste) e I (fronteira agrícola do Matopiba).

4.3 Discussão dos resultados

Em 2016, o Brasil revelou resultados distintos para o desmatamento nos dois biomas considerados neste estudo. No bioma Amazônia, houve um aumento de 29% na taxa de desmatamento, enquanto no bioma Cerrado ocorreu uma redução de 43%, ambos em comparação a 2015 (Instituto, 2016; MMA, 2018). Já em 2021, a taxa de desmatamento aumentou 20% em todos os biomas em relação a 2020, e 77% da área total desmatada estavam dentro de imóveis cadastrados no CAR, tornando-os passíveis de responsabilização (Mapbiomas, 2021).

Avaliações de impacto do CAR sobre o desmatamento foram realizadas ao nível de bioma. O estudo de Souza *et al.* (2022) identificou a redução no desmatamento em imóveis pequenos localizados no bioma Cerrado e cadastrados no CAR em 2016. Similarmente, o relatório do Ministério (2023) evidenciou que, na Amazônia, também ocorreu uma diminuição do desmatamento para imóveis pequenos pertencentes ao mesmo grupo.

Com base nessa contextualização, em ambas as fronteiras agrícolas aqui examinadas, observou-se que os grupos cadastrados no CAR até 2016 apontaram redução no desmatamento. Após esse período, todavia, a taxa de desmatamento aumentou para os imóveis pequenos cadastrados em 2021 no Centro-Oeste. No Matopiba, enquanto os imóveis pequenos cadastrados em 2020 tiveram um aumento de 3,40% na taxa de desmatamento, os imóveis

grandes expressaram um aumento de 36,77%. Esse aumento é suscetível de estar relacionado ao excedente de vegetação nativa dentro dos imóveis ou ao enfraquecimento de órgãos fiscalizadores, como o Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (IBAMA), resultado da política governamental da época (Rasmussen *et al.*, 2017; Costa; Escada, 2023). De 2018 a 2021, o órgão atuou em apenas 5% da área desmatada, o que correspondeu a menos de 2% dos alertas de desmatamento no País (Oliveira, 2021).

Os resultados corroboram outros estudos, como os de Costa *et al.* (2018), Alix-Garcia *et al.* (2018), Souza *et al.* (2022) e Ministério (2023), nos quais efeitos significativos de redução do desmatamento foram encontrados para os imóveis cadastrados nos primeiros anos após a implementação do CAR. Uma vez monitorados, esses imóveis são passíveis de ter tido seu comportamento de desmatamento coibido (L’Roe *et al.*, 2016), mas a inércia na responsabilização, também, é capaz de haver produzido um efeito contrário nos grupos cadastrados posteriormente.

A durabilidade dos efeitos do cadastro no CAR foi avaliada por meio do estudo de eventos balanceados. Nessa análise, observou-se que as reduções nas taxas de desmatamento tendem a ser maiores com o aumento do tempo de exposição ao programa, exceto para os imóveis médios na fronteira do Matopiba. Segundo Guaraldo (2023), esses imóveis foram responsáveis por 23% dos alertas de desmatamento na região em 2023.

Em relação à conformidade ao Código Florestal, considerando a maneira como o ICCF foi elaborado, seus valores tendem a se manter ou diminuir ao decorrer dos anos. Ao se recorrer a uma *dummy* desse índice, foi possível mensurar a probabilidade de os imóveis cadastrados após o CAR mudarem sua conformidade ao CF. Assim, observou-se uma redução na probabilidade de conformidade nas distintas categorias de imóveis, tanto no Centro-Oeste quanto no Matopiba. O padrão identificado sugere que os grupos que aderiram ao programa primeiro são, possivelmente, os mais inconformes, exibindo a maior redução na probabilidade de conformidade.

Embora esse resultado se mostre como contraintuitivo, já que a análise anterior mostrou que alguns desses grupos reduziram o desmatamento ao longo do tempo, isso não exclui a possibilidade de terem desmatado o suficiente para atingir áreas de Reserva Legal ou que já possuíam maior grau de irregularidade antes do CAR, o qual se manteve posteriormente. Além disso, grupos que se cadastraram tardiamente e aumentaram seu desmatamento também denotaram redução na probabilidade de conformidade, em menor grau, quando comparados aos primeiros.

Considerando o efeito durante o tempo, tanto para imóveis pequenos quanto para os médios em ambas as fronteiras, a redução na probabilidade de conformidade aumenta com o tempo de exposição ao programa. Uma possível justificativa está na falta de informações adicionais para esses imóveis, como, por exemplo, a compensação com áreas externas à propriedade, o que, decerto, influenciaria as decisões de conformidade.

Em complementação, o atraso na análise dos cadastros no CAR é capaz de enfraquecer a eficácia da política, pois, apesar de inicialmente pressionar os produtores a frear o desmatamento em razão do risco de sanções, a falta de responsabilização imediata reduz o incentivo para a conformidade. Desse modo, a sensação de impunidade é bem capaz de desestimular a adesão real ao Código Florestal.

4.4 Implicações para potencializar os resultados

O cadastro no CAR contribui para a redução do desmatamento, uma vez que possibilita o monitoramento dos imóveis rurais e permite avaliar mudanças na probabilidade de conformidade ambiental por parte dos cadastrados. Alguns desafios, todavia, ainda precisam ser superados para que os resultados sejam efetivamente ampliados.

Na avaliação de governança realizada pelo Ministério (2022), que abrange os mecanismos de liderança, estratégia e controle dirigidos à implementação da política, constatou-se uma descentralização de atribuições entre o Governo Federal e os estados, o que demanda maior coordenação dos objetivos e metas a serem alcançados. Verificou-se, porém, falta de clareza quanto à divisão de competências, além de baixa capacidade para fiscalizar e avaliar as informações declaradas, resultando em problemas como sobreposições de áreas de imóveis e atrasos na regularização ambiental.

Conforme descrito no manual de cadastro (Sistema, 2016), a localização do imóvel é realizada manualmente pelo declarante, e o cadastro é submetido para análise junto com a documentação. Existe, contudo, uma demora significativa nesse processo, com imóveis rurais cadastrados em 2014 que ainda não foram analisados, enquanto outros, mais recentes, já passaram pelo exame. Ademais, mesmo entre os imóveis já analisados, ainda se observam sobreposições. Conseqüentemente, o desmatamento que ocorre em áreas sobrepostas, por não poder ser atribuído arbitrariamente a um responsável, precisa ser removido de estudos, o que limita resultados.

Para superar esse desafio, é preciso que haja um esforço entre os estados e o Governo Federal para investir na contratação de pessoal, visando a agilizar a análise dos

cadastros dos imóveis rurais. Adicionalmente, as sobreposições identificadas na base de dados do SICAR devem ser revisadas, concedendo oportunidade à correta atribuição das áreas aos respectivos imóveis. Após esse procedimento, a base de dados, em formato *shapefile*, deve ser atualizada para refletir as correções realizadas. Recomendável, ainda, é a criação de uma ferramenta que detecte sobreposições automaticamente durante novos cadastros, priorizando a análise desses casos para evitar conflitos fundiários e garantir maior eficácia na fiscalização do desmatamento.

Outro ponto importante diz respeito à conformidade dos imóveis; o índice ICCF é disposto a ser utilizado de maneira crescente, de modo que aqueles com menor valor devam ser prioritários para participar de programas de regularização ambiental, como o PRA.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

No Brasil, a expansão das fronteiras agrícolas foi impulsionada por avanços na pesquisa agropecuária e pelo crédito rural, consolidando o País como um dos maiores exportadores de *commodities*, como milho e soja. Esse crescimento econômico, entretanto, ocorreu às custas de compromissos ambientais, especialmente nos biomas Amazônia e Cerrado, os quais abrigam as fronteiras agrícolas do Centro-Oeste e do Matopiba, que destinam extensas áreas à pastagem e à produção de grãos.

Para mitigar o desmatamento e promover a conformidade ambiental em imóveis rurais, foi instituído o Cadastro Ambiental Rural (CAR). Essa política fornece uma base de dados georreferenciada dos imóveis rurais, permitindo o cruzamento de informações com os dados de desmatamento do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. Assim, é possível monitorar o desmatamento dentro desses imóveis e avaliar se eles cumprem as exigências do Código Florestal no que diz respeito às áreas de Reserva Legal. Nesse contexto, esta dissertação avaliou o impacto do CAR sobre o desmatamento e sobre a conformidade ao CF nos imóveis rurais localizados nas fronteiras agrícolas do Centro-Oeste e do Matopiba, utilizando o método de Diferenças em Diferenças com múltiplos períodos, conforme proposto por Callaway e Sant’Anna (2021).

De acordo com os resultados, concluiu-se que o CAR teve impacto na redução do desmatamento em imóveis rurais cadastrados nos primeiros anos de sua implementação, tanto na fronteira do Centro-Oeste quanto na do Matopiba. Para os cadastros realizados mais recentemente, contudo, se observou um aumento no desmatamento. Além disso, verificou-se redução na probabilidade de os imóveis estarem em conformidade com o Código Florestal, em imóveis pequenos e médios, em ambas as fronteiras estudadas.

Esses resultados evidenciam a necessidade de revisar as estratégias das políticas públicas voltadas para o cadastro e regularização ambiental de imóveis rurais. A demora na análise dos cadastros compromete a credibilidade do CAR, deixando que o desmatamento, mesmo sob monitoramento, continue ocorrendo. Para conter esse aumento, é preciso fortalecer a articulação entre os entes federativos e investir na ampliação das equipes responsáveis pelas análises, acelerando o processo. No âmbito da regularização ambiental, o ICCF é capaz de desempenhar um papel importante, ao orientar a definição de imóveis prioritários para o Programa de Regularização Ambiental.

Entre as limitações deste estudo, destaca-se a ausência de covariáveis específicas ao nível do imóvel rural, como acesso ao crédito agrícola, assistência técnica, renda e tecnologias

empregadas, entre outras. Vale ressaltar que os dados do Monitor de Crédito Rural do Mapbiomas, disponibilizados após a conclusão das análises, serão considerados em estudos futuros. Ainda assim, esta pesquisa contribui significativamente para a literatura, dada a escassez de avaliações de impacto do CAR sobre o desmatamento e sobre a conformidade com o CF após sua implementação nacional em 2014, especialmente no contexto das fronteiras agrícolas. Essa lacuna é relevante, pois as regiões analisadas – Centro-Oeste e Matopiba – são responsáveis por uma parcela expressiva da produção de grãos no Brasil, com grande influência na economia nacional, além de estarem predominantemente inseridas em um dos biomas mais biodiversos e ameaçados do País, o Cerrado. Assim, os resultados obtidos fornecem subsídios importantes para o redirecionamento da política pública, possibilitando a formulação de estratégias mais eficazes para o combate e controle do desmatamento em imóveis rurais.

REFERÊNCIAS

- ALIX-GARCIA, J. A. *et al.* Avoided deforestation linked to Environmental Registration of Properties in the Brazilian Amazon. **Conservation Letters**, Washington-DC, v. 11, n. 3, 2018.
- AZEVEDO, A. A. *et al.* Limits of Brazil's Forest Code as a means to end illegal deforestation. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, Washington- DC, v. 114, n. 29, p. 7653-7658, 2017.
- BOAVENTURA, K. D. J.; SILVA, C. M. D.; DUTRA E SILVA, S. Building Soil Fertility: Embrapa and the Agronomic Development for the “Conquest” of the Brazilian Cerrado (1975-95). **História Agraria Revista de agricultura e história rural**, Ciutadella (Menorca), v. 23, n. 89, p. 247-278, abril, 2023.
- BRAGANÇA, A. The economic consequences of the agricultural expansion in Matopiba. **Revista Brasileira de Economia**, Rio de Janeiro - RJ, v. 72, p. 161-185, 2018.
- BRASIL. **Avaliação de políticas públicas: guia prático de análise ex post**. Brasília, 2018. v. 2. 301 p.
- BRASIL. Lei nº 12.651, de 25 de maio de 2012. **Diário Oficial da União**, Brasília, ano 2012. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2011-2014/2012/lei/112651.htm. Acesso em: 26 nov. 2023.
- BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. **Instrução Normativa n. 2**, de 06 de maio de 2014. Brasília. Disponível em: https://www.car.gov.br/leis/IN_CAR.pdf. Acesso em: 15 fev. 2024.
- BRITO, F. Brasil, final do século: a transição para um novo padrão migratório. *In*: CARLEIAL, Adelita (org.). **Transições migratórias**. Fortaleza: Iplance, 2002.
- BUAINAIN, A. M.; GARCIA, J. R.; VIEIRA FILHO, J. E. A economia agropecuária do Matopiba. **Estudos Sociedade e Agricultura**, Rio de Janeiro - RJ, v. 26, n. 2, p. 376-401, 2018.
- BUAINAIN, A. M.; FAVARETO, A.; JUNIOR RUIZ, G.; VIEIRA JUNIOR, P. A. Desafios para uma agricultura sustentável: abordagem baseada nos biomas brasileiros. **Desenvolvimento em Debate**, Rio de Janeiro-RJ, v. 6, n. 2, p. 71-97, 2018.
- CALLAWAY, B.; SANT'ANNA, P. H. C. Difference-in-differences with multiple time periods. **Journal of Econometrics**, v. 225, n. 2, p. 200-230, 2021.
- CARDINALE, B. J. *et al.* Biodiversity loss and its impact on humanity. **Nature**, Reino Unido, v. 486, n. 7401, p. 59-67, 2012.

CASTANHO, R. B; TEIXEIRA, M. E. S. A evolução da agricultura no mundo: da gênese até os dias atuais. **Brazilian Geographical Journal: Geosciences and Humanities research medium**. Ituiutaba, v. 8, n.1, p. 136-146, 2017.

CONTINI, E. *et al.* Dinamismo da agricultura brasileira. **Revista de Política Agrícola**, Brasília, v.19, p. 42-64, jul. 2010. Edição especial.

COSTA, M. A. *et al.* Epidemiologically inspired approaches to land-use policy evaluation: the influence of the rural environmental registry (CAR) on deforestation in the Brazilian Amazon. **Elementa science of the Anthropocene**, California, v. 6, 2018.
DOI: <https://doi.org/10.1525/elementa.260>.

COSTA, L. C. O.; ESCADA, M. I. S. Como os padrões de desmatamento dos imóveis rurais paraense se modificaram de 2015 a 2021? *In*: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 20, 2023, Florianópolis. **Anais eletrônicos...** São José dos Campos, INPE, 2023. p.3055-3058.

DORNELES, T. M. **A expansão do sistema agroindustrial e o modelo de desenvolvimento econômico do Centro-Oeste brasileiro**. 2024. 176 p. Tese (Programa de Pós-Graduação em Economia) – Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2024.

FARIA, D. *et al.* The breakdown of ecosystem functionality driven by deforestation in a global biodiversity hotspot. **Biological Conservation**, v. 283, n. 3, mayo. 2023.
DOI:10.1016/j.biocon.2023.110126.

FERRAZ, R. P. D. *et al.* **Marco referencial em serviços ecossistêmicos**. Brasília: Embrapa, v. 1, 2019. 124 p.

GALLO, F. A fronteira agrícola na região Centro-Oeste brasileira e a integração territorial do país: o papel decisivo da aviação. **Boletim Gaúcho de Geografia**, Porto Alegre, v. 34, p. 11-34, 2009.

GARCIA, J. R.; ROMEIRO, A. R. Agricultura brasileira: desafios frente à restrição ambiental. **Revista Terceira Margem Amazônia**, Manaus, v. 7, n. 17, p. 33-53, 2021. DOI: <http://dx.doi.org/10.36882/2525-4812.2021v7i17.p33-53>.

GARCIA, J. R.; VIEIRA FILHO, J. E. R. **A questão ambiental e a expansão da fronteira agrícola na direção do Matopiba brasileiro**. Rio de Janeiro: Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada. 2017. 70p. Texto para discussão, 2281.
DOI: 10.13140/RG.2.2.26928.97283.

INSTITUTO DE PESQUISA AMBIENTAL DA AMAZÔNIA - (IPAM). **Código Florestal: avaliação 2017-2020**. Disponível em: https://ipam.org.br/wp-content/uploads/2021/12/O-avanco-da-implementacao-do-Codigo-Florestal-no-Brasil-IPAM_V11-1-1.pdf . Acesso em: 14 nov. 2024.

L'ROE, J. *et al.* Mapping properties to monitor forests: Landholder response to a large environmental registration program in the Brazilian Amazon. **Land use Policy**, v. 57, p. 193-203, 2016.

MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, PECUÁRIA E ABASTECIMENTO - (MAPA) **Cadastro Ambiental Rural, relatório final de avaliação *ex post* volume 1**: diagnóstico, desenho, implementação, governança e orçamento. Brasília, v. 1, 2022. 56 p.

MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, PECUÁRIA E ABASTECIMENTO - (MAPA) **Cadastro Ambiental Rural, relatório final de avaliação *ex post* volume 2**: resultados e impacto. Brasília, v. 2, 2023. 54 p.

MAPBIOMAS. **Plataforma MapBiomias uso e cobertura**. São Paulo/SP. Disponível em: <https://brasil.mapbiomas.org/>. Acesso em: 14 nov. 2024.

MATIAS, M. R. *et al.* As geometrias do Cadastro Ambiental Rural (CAR): uma proposta metodológica para análise e remoção da sobreposição de imóveis rurais declarados na base de dados do CAR. **Revista Brasileira de Cartografia**, Uberlândia - MG, v. 76, 2024.

MIRANDA, E. E.; MAGALHÃES, L. A.; CARVALHO, C. A. **Proposta de delimitação territorial do MATOPIBA**. Nota técnica (Embrapa Territorial). Campinas, 2014.

PEREIRA, C. N.; PORCIONATO, G. L.; CASTRO, C. N. Aspectos socioeconômicos da região do Matopiba. **Boletim regional, urbano e ambiental (IPEA)**. Brasília, n. 18 jan./jun. 2018.

PEREIRA, C.N.; DE CASTRO, C.N.; PORCIONATO, G.L. **Dinâmica econômica, infraestrutura e logística no Matopiba**, Brasília, abr. 2018.

RASMUSSEN, L. V. *et al.* Understanding smallholders' intended deforestation behavior in the Brazilian Cerrado following environmental registry. **Environmental Research Letters**, v. 12, n.9, sep. 2017. DOI: 10.1088/1748-9326/aa7ee5.

SAMBUICHI, R. H. R. **Políticas agroambientais e sustentabilidade**: desafios, oportunidades e lições aprendidas. Brasília: IPEA, 2014.

SANTOS FILHO, A. O. *et al.* A evolução do código florestal brasileiro. **Caderno de Graduação - Ciências Humanas e Sociais – UNIT**, Sergipe, v. 2, n. 3, 271–290, 2015. Disponível em: <<https://periodicos.set.edu.br/cadernohumanas/article/view/2019>>. Acesso em: 13 jan. 2024.

SANTOS JUNIOR, S.; TESSER, D. P.; BARCELLOS, J. O. J. O desenvolvimento agrícola e agroindustrial no Centro-Oeste do Brasil: uma investigação à luz do modelo centro periferia. **Colóquio - Revista do Desenvolvimento Regional**, Taquara -RS, v. 14, n. 1, p. 5-25, 2009.

SISTEMA NACIONAL DE CADASTRO AMBIENTAL RURAL - (SICAR). **Manual do Usuário** v2.0. Disponível em: <https://car.gov.br/manuais/ManualCAR.pdf>. Acesso em: 26 nov. 2023.

SILVA, S. D.; BARBOSA, A. S. Paisagens e fronteiras do Cerrado: ciência, biodiversidade e expansão agrícola nos chapadões centrais do Brasil. **Estudos Ibero-Americanos**. Porto Alegre, v. 46, b.1, p. 1-18, 2020.

SOUZA, G. C. *et al.* **Cadastro ambiental rural: impactos sobre o desmatamento e a conformidade ambiental dos imóveis rurais**. Brasília: ENAP, 2022. 42 p.

STABILE, M. C. C. *et al.* Solving Brazil's land use puzzle: Increasing production and slowing Amazon deforestation. **Land use Policy**, v. 96, 6p. July. 2020.

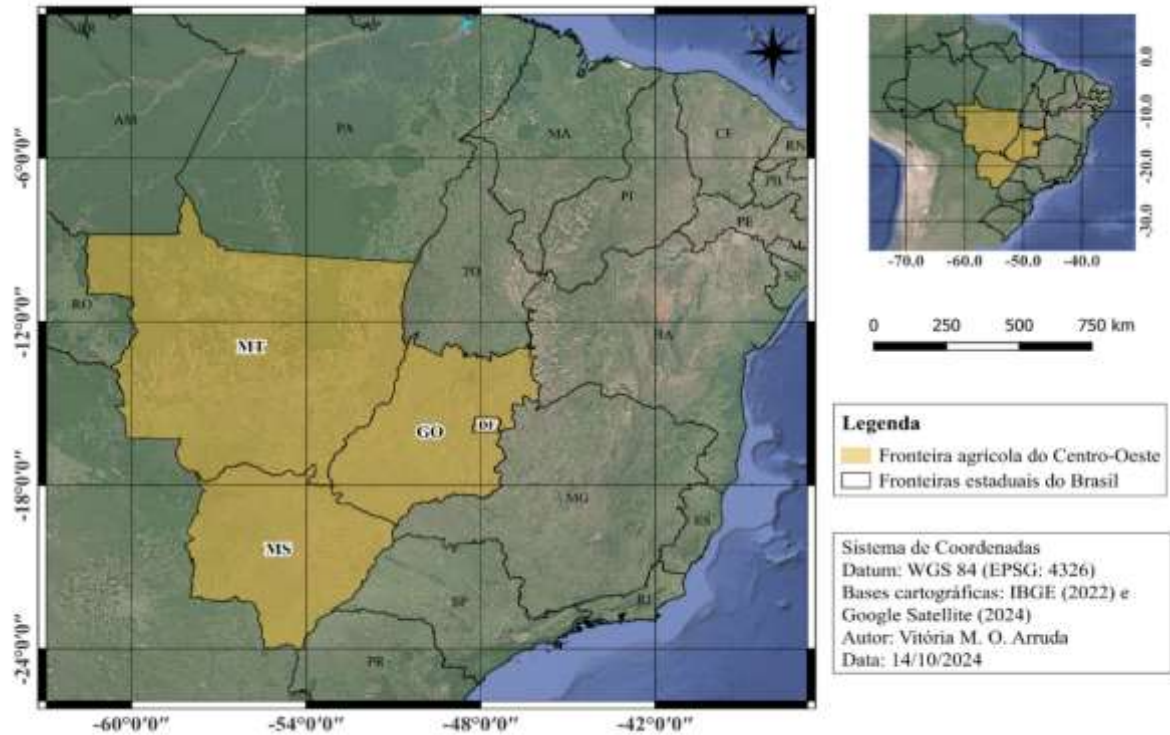
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2019.1043>.

VIEIRA FILHO, J. E. R. **Expansão da fronteira agrícola no Brasil: desafios e perspectivas**. Brasília: IPEA, 2016. Texto para discussão, 2223.

VIEIRA FILHO, J. E. R. A fronteira agropecuária brasileira: redistribuição produtiva, efeito poupa-terra e desafios estruturais logísticos. *In*: VIEIRA FILHO, J. E. R. e GASQUES, J. G. (orgs.). **Agricultura, transformação produtiva e sustentabilidade**. Brasília: IPEA, 2016. cap. 3.

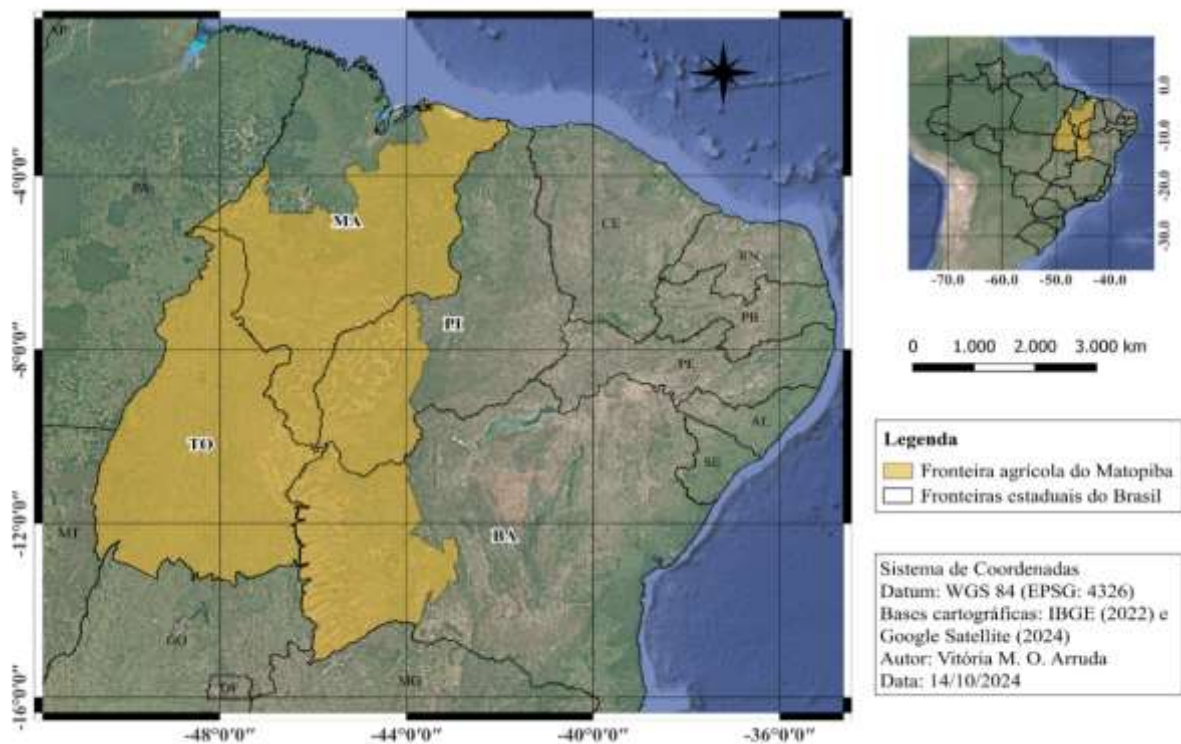
APÊNDICE A – DELIMITAÇÃO DAS FRONTEIRAS AGRÍCOLAS

Figura A. 1 - Mapa da fronteira agrícola do Centro-Oeste.



Fonte: elaborada pela autora.

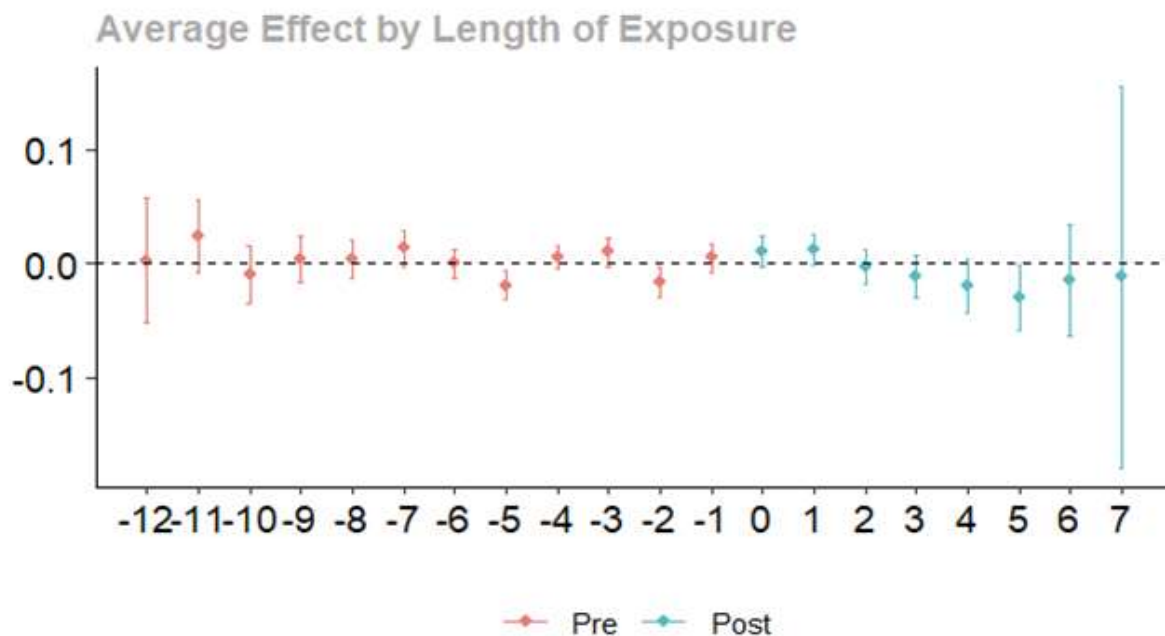
Figura A. 2 - Mapa da fronteira agrícola do Matopiba.



Fonte: elaborada pela autora.

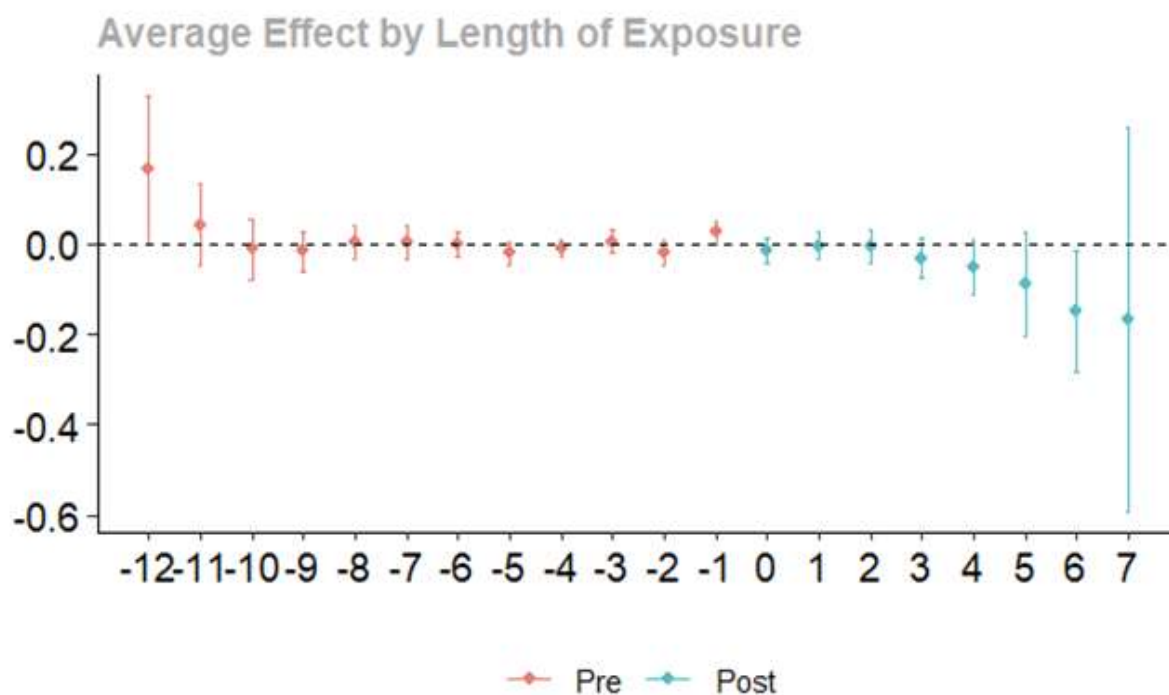
APÊNDICE B – ESTUDO DE EVENTOS PARA OS IMÓVEIS RURAIS DO CENTRO-OESTE

Figura B. 1 - Estudo de eventos para imóveis pequenos.



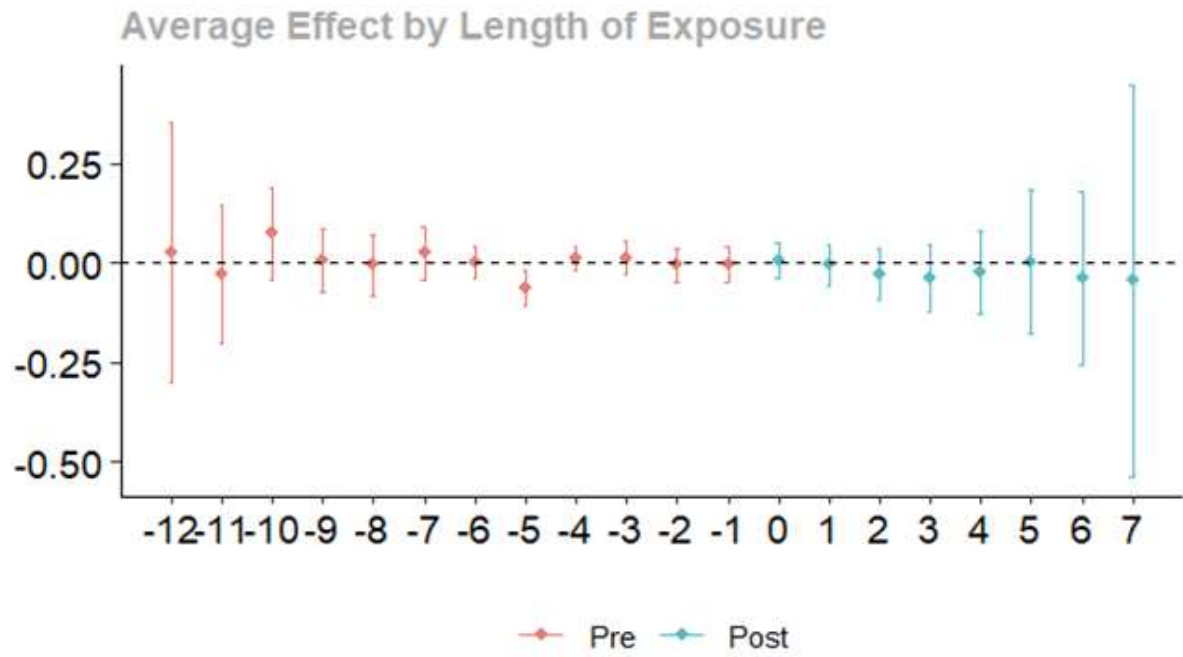
Fonte: elaborada pela autora.

Figura B. 2 - Estudo de eventos para imóveis médios.



Fonte: elaborada pela autora.

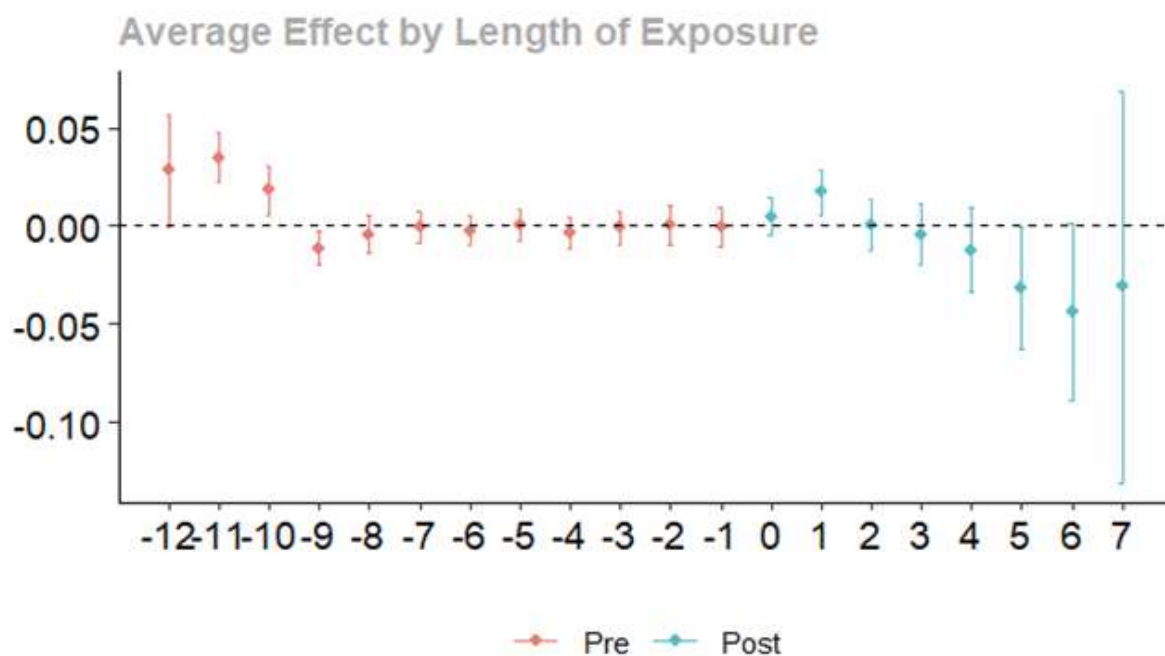
Figura B. 3 - Estudo de eventos para imóveis grandes.



Fonte: elaborada pela autora.

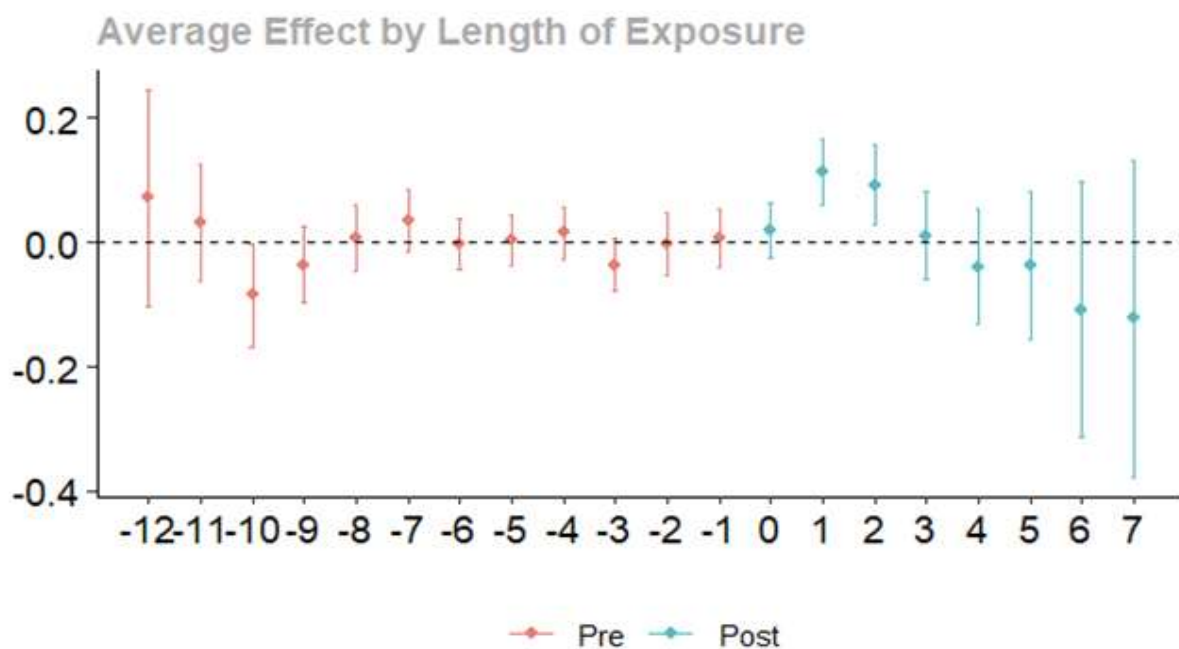
APÊNDICE C – ESTUDO DE EVENTOS PARA OS IMÓVEIS RURAIS DO MATOPIBA

Figura C. 1 - Estudo de eventos para imóveis pequenos.



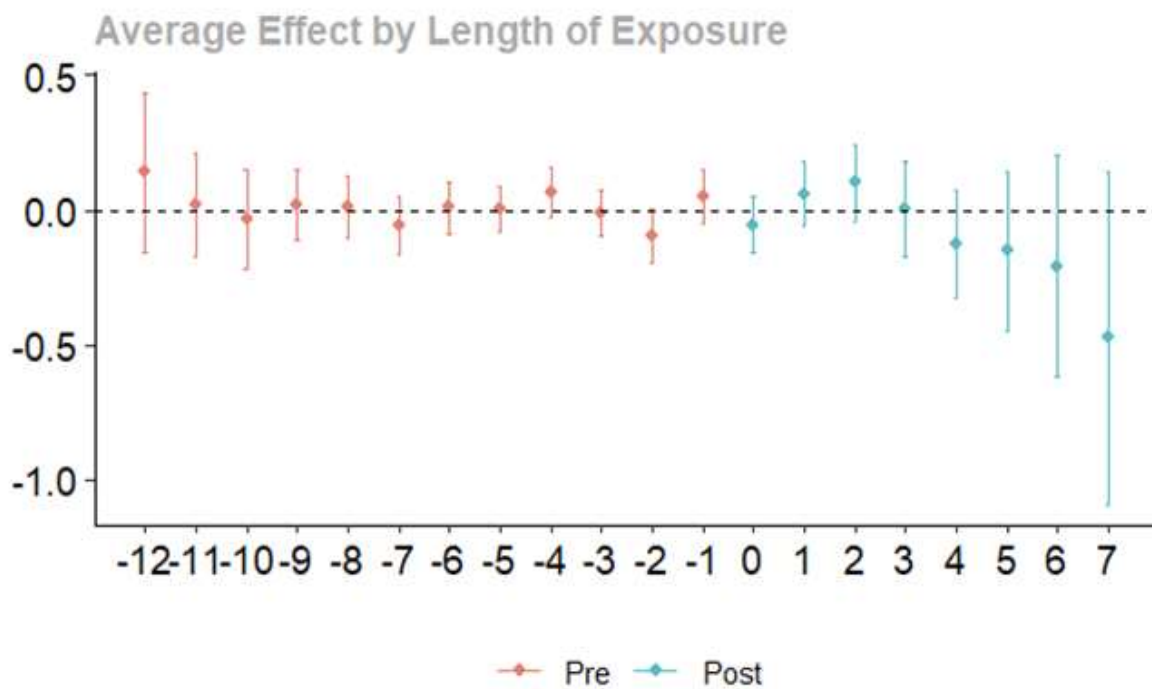
Fonte: elaborada pela autora.

Figura C. 2 - Estudo de eventos para imóveis médios.



Fonte: elaborada pela autora.

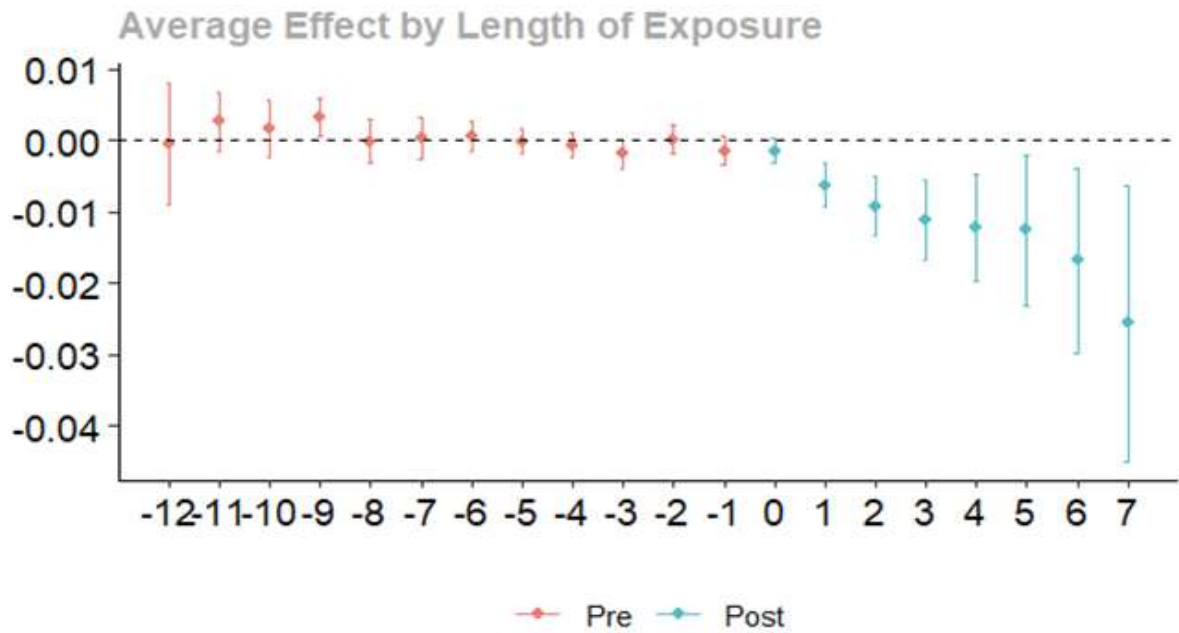
Figura C. 3 - Estudo de eventos para imóveis grandes.



Fonte: elaborada pela autora.

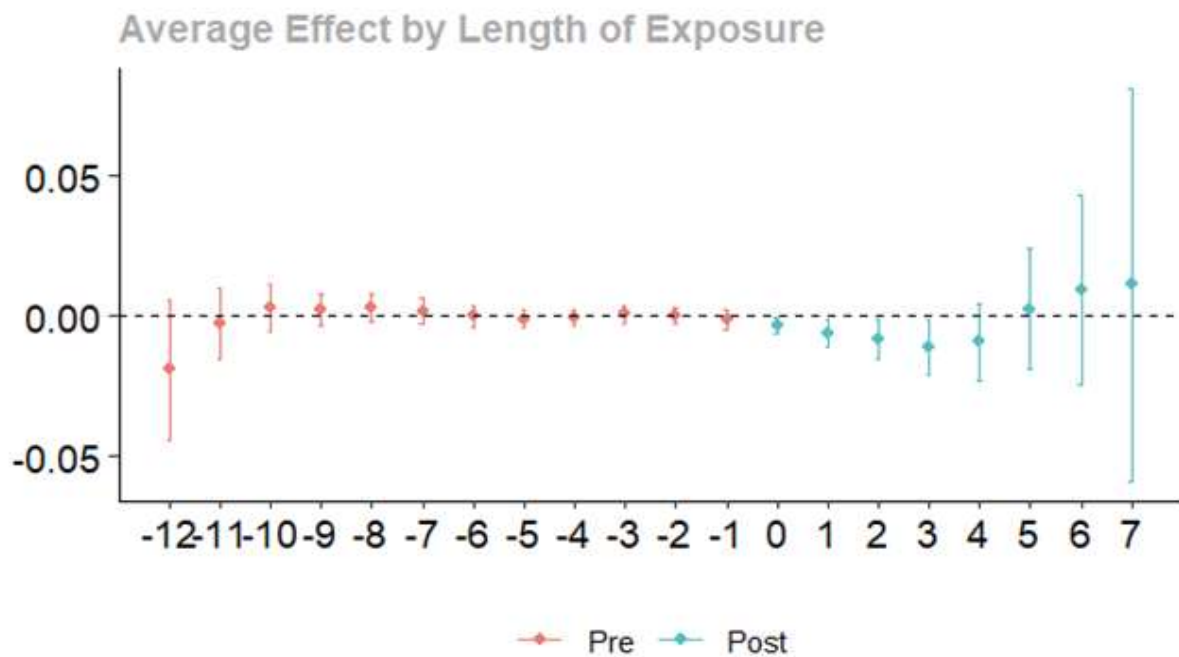
APÊNDICE D – ESTUDO DE EVENTOS PARA A CONFORMIDADE DOS IMÓVEIS RURAIS DO CENTRO-OESTE

Figura D. 1 - Estudo de eventos para a conformidade dos imóveis pequenos.



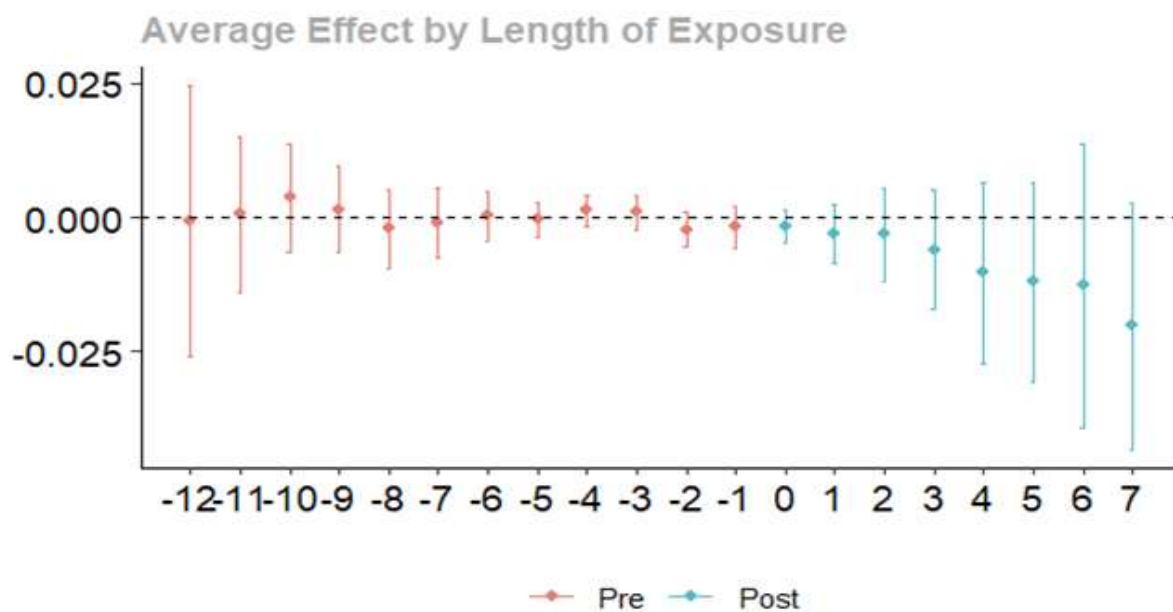
Fonte: elaborada pela autora.

Figura D. 2 - Estudo de eventos para a conformidade dos imóveis médios.



Fonte: elaborada pela autora.

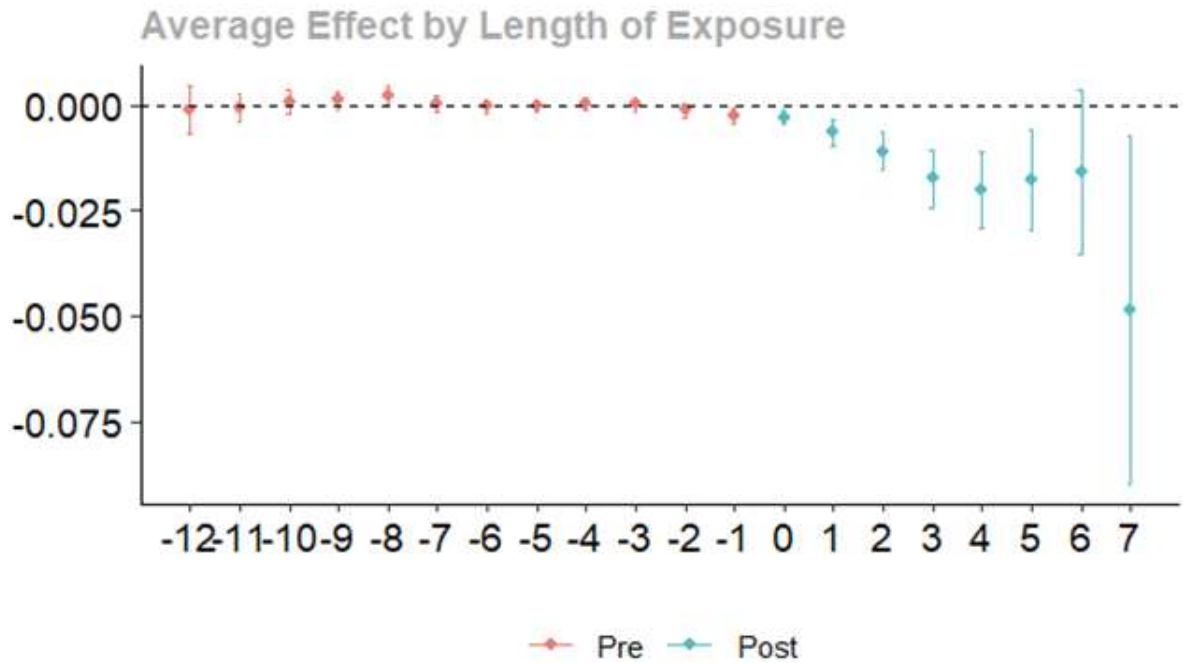
Figura D. 3 - Estudo de eventos para a conformidade dos imóveis grandes.



Fonte: elaborada pela autora.

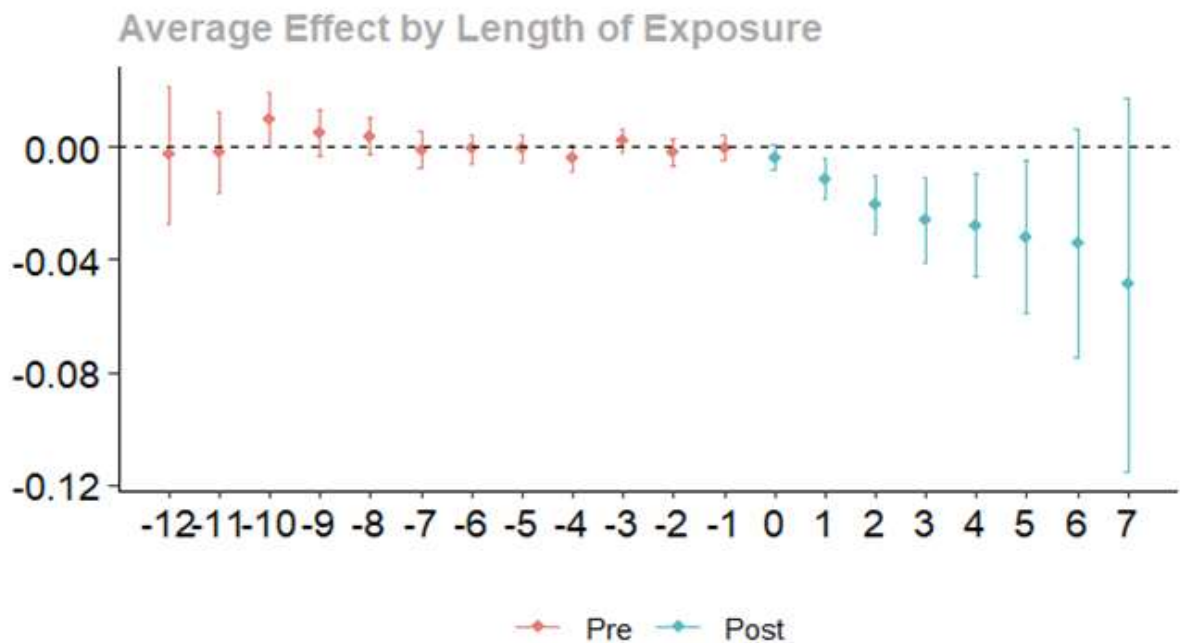
APÊNDICE E – ESTUDO DE EVENTOS PARA A CONFORMIDADE DOS IMÓVEIS RURAIS DO MATOPIBA

Figura E. 1 - Estudo de eventos para a conformidade dos imóveis pequenos.



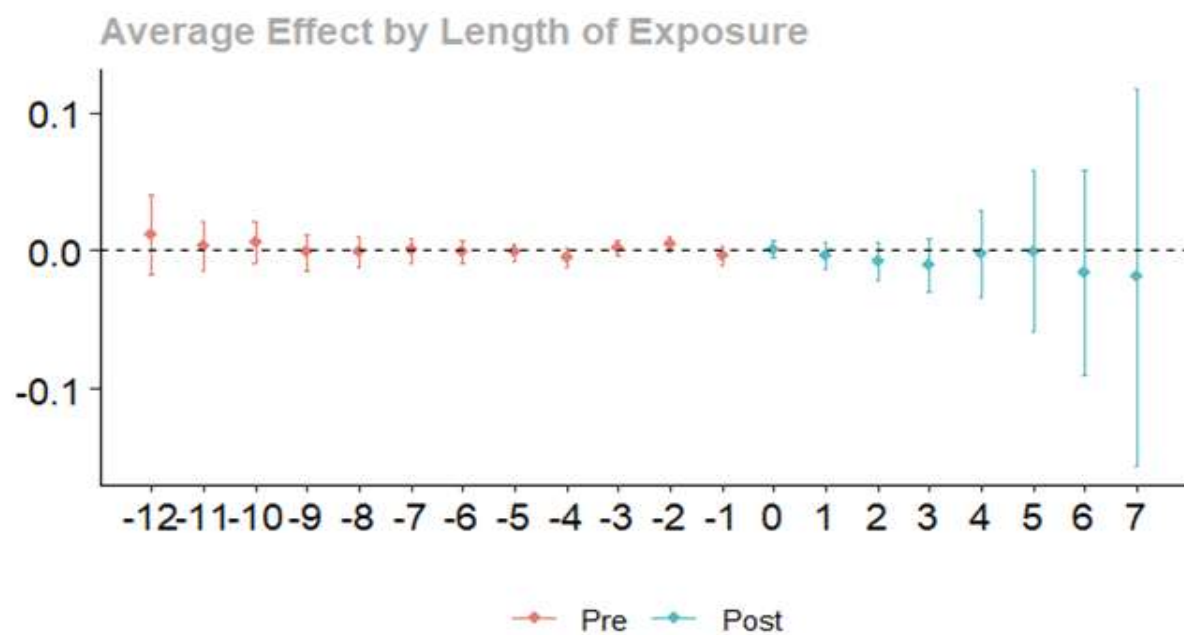
Fonte: elaborada pela autora.

Figura E. 2 - Estudo de eventos para a conformidade dos imóveis médios.



Fonte: elaborada pela autora.

Figura E. 3 - Estudo de eventos para a conformidade dos imóveis grandes.



Fonte: elaborada pela autora.

**APÊNDICE F – ESTIMATIVAS COMPLETAS DO IMPACTO DO CAR SOBRE O
DESMATAMENTO EM IMÓVEIS RURAIS NA FRONTEIRA AGRÍCOLA DO
CENTRO-OESTE**

Tabela F. 1 - Efeitos heterogêneos do CAR sobre o desmatamento na fronteira do Centro-Oeste.

Imóveis	Grupos			ATT
		<u>2016</u>	<u>2021</u>	
Pequeno		-0,0227* (0,0079)	0,0842* (0,0194)	-0,0011 (0,0049)
Médio	<u>2015</u>			-0,0397* (0,0141)
	-0,0522* (0,0179)			

Fonte: elaborada pela autora.

Nota: * p-valor < 0,05.

Tabela F. 2 - Estimativas do estudo de eventos balanceados na fronteira do Centro-Oeste.

Período	Efeito dinâmico de tempo para imóveis pequenos			ATT
	4	5		
e=5 (2014-2016)	-0,0235 (0,0078)	-0,0295 (0,0103)		-0,0102* (0,0052)
Efeito dinâmico de tempo para imóveis médios				
e=6 (2014-2015)			6 -0,1502 (0,0407)	-0,0391* (0,0176)

Fonte: elaborada pela autora.

Nota: * p-valor < 0,05.

**APÊNDICE G – ESTIMATIVAS COMPLETAS DO IMPACTO DO CAR SOBRE O
DESMATAMENTO EM IMÓVEIS RURAIS NA FRONTEIRA AGRÍCOLA DO
MATOPIBA**

Tabela G. 1 - Efeitos heterogêneos do CAR sobre o desmatamento na fronteira do Matopiba.

Imóveis	Grupos			ATT
	2016	2017	2020	
Pequeno	-0,0248* (0,0067)	0,0288* (0,0067)	0,0340* (0,0083)	-0,0034 (0,0039)
Médio		0,1148* (0,0398)		0,0359 (0,0210)
Grande	-0,3520* (0,1035)		0,3677* (0,1239)	0,0082 (0,0470)

Fonte: elaborada pela autora.

Nota:* p-valor < 0,05.

Tabela G. 2 - Estudo de eventos balanceados para imóveis pequenos na fronteira do Matopiba.

Período	Efeito dinâmico de tempo				ATT
e=1 (2014-2020)	1 0,0170* (0,0030)				0,0101* (0,0029)
e=2 (2014-2019)	1 0,0155* (0,0030)				0,0050 (0,0033)
e=3 (2014-2018)	1 0,0131* (0,0040)				0,0029 (0,0039)
e=5 (2014-2016)		4 -0,0240* (0,0077)	5 -0,0314* (0,0093)		-0,0147* (0,0050)
e=6 (2014-2015)	1 0,0265* (0,0080)			6 -0,0435* (0,0142)	-0,0058 (0,0068)
e=7 (2014)	1 0,1338* (0,0330)				0,0200 (0,0219)

Fonte: elaborada pela autora.

Nota:* p-valor < 0,05.

Tabela G. 3 - Estudo de eventos balanceados para imóveis médios na fronteira do Matopiba.

Período	Efeito dinâmico de tempo		ATT
e=1 (2014-2020)	1 0,1127* (0,0189)		0,0673 * (0,0157)
e=2 (2014-2019)	1 0,0980* (0,0186)	2 0,0934* (0,0225)	0,0716 * (0,0170)
e=3 (2014-2018)	1 0,0946* (0,0209)	2 0,0889* (0,0232)	0,0537 * (0,0176)
e=4 (2014-2017)	1 0,0902* (0,0224)	2 0,0862* (0,0242)	0,0330 (0,0206)
e=6 (2014-2015)	1 0,1111* (0,0320)	2 0,1332* (0,0355)	0,0221* (0,0283)

Fonte: elaborada pela autora.

Nota:* p-valor < 0,05.

Tabela G. 4 - Estudo de eventos balanceados para imóveis grandes na fronteira do Matopiba.

Período	Efeito dinâmico de tempo				ATT
e=6 (2014-2015)		4 -0,2417* (0,0819)			-0,1173 * (0,0551)
e=7 (2014)	0 -0,3366* (0,0996)	4 -0,4678* (0,1264)	5 -0,4274* (0,1312)	6 -0,4876* (0,1475)	-0,3520 (0,0933)

Fonte: elaborada pela autora.

Nota:* p-valor < 0,05.

**APÊNDICE H – ESTIMATIVAS COMPLETAS DO IMPACTO DO CAR SOBRE A
CONFORMIDADE AO CÓDIGO FLORESTAL EM IMÓVEIS RURAIS NA
FRONTEIRA AGRÍCOLA DO CENTRO-OESTE**

Tabela H. 1 - Efeitos heterogêneos do CAR sobre a conformidade na fronteira do Centro-Oeste.

Imóveis	Grupos			ATT
	2014	2015	2016	
Pequeno	-0,0167* (0,0024)	-0,0104* (0,0025)	-0,0066* (0,0023)	-0,0082 * (0,0015)
Grandes				-0,0069 * (0,0035)

Fonte: elaborada pela autora.

Nota: * p-valor < 0,05.

Tabela H. 2 - Estudo de eventos balanceados para imóveis pequenos na fronteira do Centro-Oeste.

continua

Período	Efeito dinâmico de tempo						ATT
e=1 (2014-2020)	1 -0,0063* (0,0011)						-0,0037 * (-0,0008)
e=2 (2014-2019)	1 -0,0059* (0,0010)	2 -0,0092* (0,0015)					-0,0054 * (-0,0009)
e=3 (2014-2018)	1 -0,0057* (0,0010)	2 -0,0090* (0,0014)	3 -0,0111* (0,0020)				-0,0067 * (0,0012)
e=4 (2014-2017)	1 -0,0060* (0,0011)	2 -0,0096* (0,0015)	3 -0,0118* (0,0019)	4 -0,0122* (0,0026)			-0,0082 * (0,0014)
e=5 (2014-2016)	1 -0,0061* (0,0012)	2 -0,0102* (0,0014)	3 -0,0121* (0,0019)	4 -0,0134* (0,0025)	5 -0,0126* (0,0039)		-0,0092 * (0,0016)
e=6 (2014-2015)	1 -0,0066* (0,0011)	2 -0,0116* (0,0015)	3 -0,0148* (0,0019)	4 -0,0153* (0,0023)	5 -0,0187* (0,0027)	6 conclusão -0,0169* (0,0019)	-0,0122 * (0,0019)

	(0,0015)	(0,0018)	(0,0021)	(0,0025)	(0,0033)	(0,0044)	
e=7 (2014)	2 -0,0119* (0,0022)	3 -0,0174* (0,0026)	4 -0,0191* (0,0033)	5 -0,0261* (0,0037)	6 -0,0295* (0,0043)	7 -0,0257* (0,0066)	-0,0167 * (0,0024)

Fonte: elaborada pela autora.

Nota:* p-valor < 0,05.

Tabela H. 3 - Estudo de eventos balanceados para imóveis médios na fronteira do Centro-Oeste.

Período	Efeito dinâmico de tempo					ATT
e=0 (2014-2021)	0 -0,0034* (0,0009)					-0,0034 * (0,0009)
e=1 (2014-2020)	0 -0,0035* (0,0010)	1 -0,0059* (0,0015)				-0,0047 * (0,0011)
e=2 (2014-2029)	0 -0,0039* (0,0010)	1 -0,0063* (0,0014)	2 -0,0085* (0,0024)			-0,0062 * (0,0014)
e=3 (2014-2018)	0 -0,0041* (0,0010)	1 -0,0074* (0,0016)	2 -0,0112* (0,0021)	3 -0,0109* (0,0030)		-0,0084 * (0,0017)
e=4 (2014-2017)	0 -0,0041* (0,0011)	1 -0,0068* (0,0016)	2 -0,0112* (0,0022)	3 -0,0123* (0,0029)		-0,0087 * (0,0022)
e=5 (2014-2016)	0 -0,0044* (0,0012)	1 -0,0066* (0,0017)	2 -0,0108* (0,0024)	3 -0,0113* (0,0028)		-0,0073 * (0,0026)
e=6 (2014-2015)	0 -0,0067* (0,0017)	1 -0,0102* (0,0023)	2 -0,0128* (0,0027)	3 -0,0145* (0,0036)	4 -0,0185* (0,0043)	-0,0088 * (0,0034)

Fonte: elaborada pela autora.

Nota:* p-valor < 0,05.

**APÊNDICE I – ESTIMATIVAS COMPLETAS DO IMPACTO DO CAR SOBRE A
CONFORMIDADE AO CÓDIGO FLORESTAL EM IMÓVEIS RURAIS NA
FRONTEIRA AGRÍCOLA DO MATOPIBA**

Tabela I. 1 - Efeitos heterogêneos do CAR sobre a conformidade na fronteira do Matopiba.

Imóveis	Grupos						ATT
	<u>2014</u>	<u>2015</u>	<u>2016</u>	<u>2017</u>	<u>2018</u>	<u>2021</u>	
Pequeno	-0,0363* (0,0080)	-0,0103* (0,0028)	-0,0102* (0,0021)	-0,0173* (0,0026)	-0,0136* (0,0028)	-0,0081* (0,0028)	-0,0101* (0,0014)
Médio	-0,0290* (0,0101)	-0,0216* (0,0067)		-0,0271* (0,0068)	-0,0204* (0,0064)	-0,0206* (0,0067)	-0,0191* (0,0036)

Fonte: elaborada pela autora.

Nota: * p-valor < 0,05.

Tabela I. 2 - Estudo de eventos balanceados para imóveis pequenos na fronteira do Matopiba.
continua

Período	Efeito dinâmico de tempo						ATT
e=0 (2014-2021)	0 -0,0029* (0,0006)						-0,0029* (0,0005)
e=1 (2014-2020)	0 -0,0023* (0,0006)	1 -0,0065* (0,0010)					-0,0044* (0,0007)
e=2 (2014-2019)	0 -0,0023* (0,0006)	1 -0,0066* (0,0010)	2 -0,0109* (0,0015)				-0,0066* (0,0010)
e=3 (2014-2018)	0 -0,0028* (0,0007)	1 -0,0075* (0,0011)	2 -0,0126* (0,0015)	3 -0,0174* (0,0021)			-0,0101* (0,0012)
e=4 (2014-2017)	0 -0,0026* (0,0007)	1 -0,0072* (0,0012)	2 -0,0118* (0,0015)	3 -0,0162* (0,0021)	4 -0,0199* (0,0031)		-0,0115* (0,0015)
e=5 (2014-2016)	0 -0,0027* (0,0008)	1 -0,0072* (0,0013)	2 -0,0100* (0,0016)	3 -0,0126* (0,0023)	4 -0,0159* (0,0028)	5 -0,0176* (0,0039)	-0,0110* (0,0016)

e=6 (2014-2015)								conclusão	
		1	2	3	4	5			-0,0128 * (0,0026)
		-0,0092* (0,0019)	-0,0128* (0,0024)	-0,0138* (0,0030)	-0,0162* (0,0036)	-0,0180* (0,0044)			
e=7 (2014)	1	2	3	4	5	6	7		
	-0,0209* (0,0068)	-0,0338* (0,0088)	-0,0448* (0,0096)	-0,0410* (0,0097)	-0,0438* (0,0103)	-0,0524* (0,0114)	-0,0486* (0,0148)	-0,0363 * (0,0076)	

Fonte: elaborada pela autora.

Nota: * p-valor < 0,05.

Tabela I. 3 - Estudo de eventos balanceados para imóveis médios na fronteira do Matopiba.

Período	Efeito dinâmico de tempo				ATT
e=1 (2014-2020)	1 -0,0115* (0,0025)				-0,0075 * (0,0018)
e=2 (2014-2019)	1 -0,0107* (0,0025)	2 -0,0203* (0,0034)			-0,0115 * (0,0024)
e=3 (2014-2018)	1 -0,0094* (0,0026)	2 -0,0188* (0,0036)	3 -0,0263* (0,0048)		-0,0145 * (0,0029)
e=4 (2014-2017)	1 -0,0089* (0,0028)	2 -0,0180* (0,0040)	3 -0,0241* (0,0048)	4 -0,0279* (0,0062)	-0,0164 * (0,0033)
e=5 (2014-2016)	2 -0,0152* (0,0041)	3 -0,0216* (0,0050)	4 -0,0244* (0,0062)	5 -0,0320* (0,0080)	-0,0171 * (0,0043)
e=6 (2014-2015)	2 -0,0226* (0,0054)	3 -0,0257* (0,0068)	4 -0,0322* (0,0081)	5 -0,0329* (0,0093)	-0,0227 * (0,0063)
e=7 (2014)			4 -0,0386* (0,0124)	5 -0,0503* (0,0141)	-0,0290 * (0,0102)

Fonte: elaborada pela autora.

Nota: * p-valor < 0,05.

APÊNDICE J – PROCEDIMENTO PARA CONSTRUÇÃO DOS INDICADORES

Indicador 1 – Desmatamento em imóveis rurais

- 1 – Download dos *shapefiles* do SICAR;
- 2 – Reprojetar para Sirgas 2000 (EPSG: 5880);
- 3 – Calcular área e dividir por 10000 (para obter em hectare);
- 4 – Corrigir geometrias;
- 5 – Remover geometrias;
- 6 – Remover imóveis CA e SU;
- 7 – Associar atributos por localização com o *shapefile* de municípios (IBGE);
- 8 – Classificar imóveis rurais quanto ao tamanho (Python);
- 9 – Identificar sobreposições (DSG Tools);
- 10 – Diferença entre o *shapefile* do passo 8 e o *shapefile* de sobreposições;
- 11 – Calcular área novamente;
- 12 – Reclassificar os imóveis (Python);
- 13 – Remover imóveis descaracterizados;
- 14 – Intersecção do *shapefile* proveniente de 13 e o de incremento anual de desmatamento do INPE.

Indicador 2 – Conformidade ao Código Florestal

- 1 – Download dos *shapefiles* do SICAR;
- 2 – Reprojetar para Sirgas 2000 (EPSG: 5880);
- 3 – Calcular área e dividir por 10000 (para obter em hectare);
- 4 – Corrigir geometrias;
- 5 – Remover geometrias;
- 6 – Remover imóveis CA e SU;
- 7 – Associar atributos por localização com o *shapefile* de municípios (IBGE);
- 8 – Identificar sobreposições (DSG Tools);
- 9 – Diferença entre o *shapefile* do passo 7 e o *shapefile* de sobreposições;
- 10 – Calcular área novamente;
- 11 – Realizar o merge entre a base final do indicador 1 e o *shapefile* do passo 10 (Python);
- 12 – Intersecção do *shapefile* proveniente de 11 e o de incremento anual de desmatamento do Inpe.